PIMECLA

Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño



Laboratorio Costero, Universidad de Antioquia. PIMECLA, 2023.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

1803

DAGRAN

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA
República de Colombia

PIMECLA

Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño

Programa Integral para el Monitoreo y la Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño.

PIMECLA

Compilación de resultados

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (DAGRAN)

Gobernación de Antioquia

Universidad de Antioquia

DEDICATORIA

A Iván D. Correa, quien honró con excelencia el título de Maestro, dejando huella con sus palabras, escritos y acciones. Su amor profundo por las costas antioqueñas y su incansable dedicación a estudiarlas y protegerlas fueron inspiración para todos nosotros. Nos queda el vacío de su partida y el deseo de más tiempo para aprender de su sabiduría y seguir su ejemplo.

Colaboradores nacionales

Ángela Duque Ramírez. *Arquitecta*
Juana Ossa Isaza. *Geologa*
Carlos Andrés Ríos Puerta, *Director del DAGRAN*

Colaboradores internacionales

Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM)
Rodolfo Silva. *Doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos*
Valeria Chávez. *Doctora en Ingeniería Civil*

Editores académicos

Iván Darío Correa Arango. *PhD Marine Geology*. (†)
Carlos Alberto Palacio Tobón (2). *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia (1). *PhD en Oceanografía Física*
[1] Grupo de Investigación en Sistemas Marinos y Costeros (GISMAC), Universidad de Antioquia
[2] Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Universidad de Antioquia

Autores de capítulos

Capítulo 1º

Alba Cecilia Bustamante Caro. *Magíster en Ciencias*: *Geomorfología y Suelos*
Luis Alfredo García Oquendo. *Magíster en Big Data, Data Scientics y Analítica de Datos*
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera. *MSc en Gestión Ambiental*
Isabel Cristina López Genes. *Ingeniera Oceanográfica.*
Diomer Eliécer Tobón Monsalve. *Oceanógrafo*
Juan Guillermo Torres Córdoba. *Ingeniero Oceanográfico*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 2º

Juan Guillermo Torres Córdoba. *Ingeniero Oceanográfico*
Carmen Isabel Aldana Benavides. *Especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones*
Luis Alfredo García Oquendo. *Magíster en Big Data, Data Scientics y Analítica de Datos*
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera. *MSc en Gestión Ambiental*
Isabel Cristina López Genes. *Ingeniera Oceanográfica*
David Santiago Toro Valencia. *Especialista en Gerencia de Proyectos*
Alfredo Jaramillo Vélez. *PhD(c) en Emergency Management.*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 3°

Alfredo Jaramillo Vélez. *PhD(c) en Emergency Management*
Juan Guillermo Torres Córdoba. *Ingeniero Oceanográfico*
Luis Alfredo García Oquendo. *Magíster en Big Data, Data Scientics y Analítica de Datos*
Isabel Cristina López Genes. *Ingeniera Oceanográfica*
Maria C. Aguirre Pérez. *Ingeniera Oceanográfica*
Marshall Diaz Londoño. *Ingeniero Oceanográfico*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 4°

Isabel Cristina López Genes. *Ingeniera Oceanográfica*
Kisay Yusira Vargas Coa. *Ingeniera Oceanográfica*
Esneider Julio Bravo. *Oceanógrafo*
Rosalyn Hoyos Gutiérrez. *MSc en Bosques y Conservación Ambiental*
Javier Andrés Venegas Ojeda. *Ecólogo de Zonas Costeras*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 5°

Víctor José Saavedra Mejía. *PhD(c) en Ingeniería de Recursos Hidráulicos.*
Alba Cecilia Bustamante Caro. *Magíster en Ciencias: Geomorfología y Suelos*
Luis Alfredo García Oquendo. *Magíster en Big Data, Data Scientics y Analítica de Datos*
Giner Andrey Jiménez Ruiz. *Ingeniero Oceanográfico*
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera. *MSc en Gestión Ambiental*
Isabel Cristina López Genes. *Ingeniera Oceanográfica*
Juan Guillermo Torres Córdoba. *Ingeniero Oceanográfico*
Diomer Eliecer Tobón Monsalve. *Oceanográfo*
José Manuel Zapata Pico. *Oceanógrafo*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 6°

Yenny Navarro Salcedo. *Especialista en Gestión Humana.*
Geraldin Morelo Muñoz. *Magíster en Ciencias del Mar*
Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*
Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 7°

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera. *MSc en Gestión Ambiental*

Luis Alfredo García Oquendo. *Magíster en Big Data, Data Scientics y Analítica de Datos*

Diomer Eliecer Tobón Monsalve. *Oceanógrafo*

Juan Guillermo Torres Córdoba. *Ingeniero Oceanográfico*

Ricardo Vega Pulgarín. *Ingeniero Civil*

Alba Cecilia Bustamante Caro. *Magíster en Ciencias: Geomorfología y Suelos*

Carlos Alberto Palacio Tobón. *PhD en Ingeniería de Recursos Hidráulicos*

Vladimir G. Toro Valencia. *PhD en Oceanografía Física*

Capítulo 8°

César Augusto Salazar Hernández. *Magister en Paisaje, Medio Ambiente y Ciudad.*

Luis Felipe Lalinde Castrillón. *PhD en Ingeniería de la Construcción.*

Ana Isabel Restrepo Martínez. *Arquitecta*

Isabella Marín Gil. *Arquitecta*

Juliana Vélez Amaya. *Arquitecta*

Ana María Osorio Serna. *Arquitecta*

Marcela Echeverri Palacio. *Arquitecta*

Pablo Arango Echeverri. *Arquitecto*

Melani Contreras Chavarría. *Estudiante de Arquitectura*

Colaboradores

Capítulo 1°

Diana Mercedes Barrios Barrios. *Líder Comunitaria*

Capítulo 2°

Carlos Ávila Paternina. *Ingeniero Civil*

Delyana Pájaro Morales. *Ingeniera Civil*

Julián Mejía Puerta. *Ingeniero Civil*

Heider Chica Nisperuza. *Apoyo mantenimiento Laboratorio Costero*

Nelton Gelez Guzmán. *Apoyo mantenimiento Laboratorio Costero*

Javier Antonio Hernández Vargas. *Coordinador Operativo Mantenimiento Laboratorio Costero*

Marcial Moya Cerezo. *Oceanógrafo*

Capítulo 3°

Maria C. Aguirre Pérez. *Ingeniera Oceanográfica*

Laura Arenas Álvarez. *Administradora de Empresas*

Cristian Yamid Torres Bedoya. *Administrador de Empresas*

Capítulo 5°

Francisco Javier Gambín Carrasquilla. *Oceanógrafo*

Paula Andrea Rey Herrera. *Oceanógrafa*

Capítulo 6°

Maria C. Aguirre Pérez. *Ingeniera Oceanográfica*

Capítulo 7°

Ricardo Vega Pulgarín. *Ingeniero Civil*

Coordinación Editorial

Mónica Marcela Ardila Vanegas. *Magister en Literatura*

Juliana Castro Ospina. *Comunicadora Audiovisual*

Sandra María Echeverri García. *Magíster en Gestión Ambiental*

Cítese como:

Referencia final

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (DAGRAN), Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia. (2025).

Programa Integral para el Monitoreo y la Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño - PIMECLA.

Compilación de resultados.

(Formatos impreso y digital).

© Medellín / Antioquia / Colombia.

Litografía GRAFISERVICIOS S.A.S

Primera cita en el texto (Estilo APA)

(Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia [DAGRAN], Gobernación de Antioquia [Gob.ANT], Universidad de Antioquia [UdeA], 2025)

Citas posteriores en el texto (Estilo APA)

(DAGRAN, Gob.ANT, UdeA, 2025)

Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño - PIMECLA. Compilación de resultados es una publicación de carácter científico.

Su edición cuenta con el ISBN 978-628-7706-52-1 para formato impreso y el

ISBN 978-628-7706-53-8 para formato digital, que amplía el alcance de la publicación impresa.

Este producto intelectual está protegido por el copyright ©.

Siglas, Acrónimos y Abreviaturas Utilizadas

A Arena

Al Aluminio

ARCORIM Atlantic Network for Coastal Risks Management

B Boro

Ca Calcio

CESET Centro de Extensión Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

CICE Capacidad de intercambio catiónico efectivo

CO Carbono orgánico

CoastSnap Coastal Snapshots

CORPOURABÁ Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá

Cu Cobre

DAGRAN Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia.

DEM Digital Elevation Model: Modelo de elevación digital

DGPS Differential Global Positioning System: Sistema de posicionamiento global

DSAS Digital Shoreline Analysis System: Sistema de análisis digital de la línea de costa

E Este

FArA Francoarcilloarenosa

FAr Francoarcillosa

Fe Hierro

Fósforo P

Hs Altura de ola significativa

K Potasio

Mg Magnesio

Mn Manganeso

MO Materia orgánica

N Dirección Norte

NW Noroeste

NE Noreste

N.A. No aplica

N.D. No detectable

NMS Net Shore Movement: Movimiento neto de arenas de playa

pH Potencial de Hidrógeno

PIMECLA Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño.

PIX4D mapper Programa de Fotogrametría para la cartografía a partir de drones

pW Humedad

RPAS Remotely Piloted Aircraft System (Drones)

RTK Real Time Kinematic: ajuste Cinemático en tiempo real

S Sur

SE Sureste

SPT Standard Penetration Test: ensayo de penetración estándar

SW Suroeste

Tp Período pico

UAV Unmanned Aerial Vehicle (drones)

VANT Vehículos Aéreos No Tripulados (drones)

W Oeste

ZCIT Zona de Convergencia Intertropical

Zn Zinc

Glosario

Acantilado: accidente geográfico que adquiere la forma de una pendiente abrupta. Se presenta junto a las costas, en montañas o a orillas de los ríos. Una costa acantilada es aquella que se corta verticalmente, mientras que el fondo del mar acantilado forma escalones o cantiles.

Acreción: en dinámica de costas, es el proceso de depósito de sedimentos por el oleaje, mareas, corrientes litorales o por aporte de sedimento de los ríos que desembocan en el mar. Se evidencia por el avance hacia el mar de la línea de costa.

Amenaza: evento natural que puede causar afectaciones al medio natural, edificaciones y personas que viven en un lugar.

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW, Multichannel Analisis of Surface Waves): método geofísico que permite obtener información del subsuelo, a partir de la propagación de ondas de superficie. El resultado es un perfil de la velocidad de las ondas en el subsuelo, a una profundidad de 20 a 60 m.

Azimut: el ángulo que forma el Norte y un cuerpo celeste, medido en el sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador.

Batimetría: levantamiento topográfico de las superficies cubiertas por el agua. El agua puede ser del mar, de ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, entre otros. Denota la cartografía de los fondos que subyacen diferentes cuerpos de agua.

Boya: baliza flotante situada en un río o en el mar, generalmente anclada al fondo. Tiene diversas finalidades, incluyendo la orientación de las embarcaciones, mediciones científicas y la señalización de objetos sumergidos.

Cárcava: zanja o surco paralelo a la dirección de la pendiente, originado por los flujos de escorrentía superficial.

Concentración de sedimentos: relación entre el peso del sedimento en una mezcla de sedimento-agua y el peso total de la mezcla.

Costas altas: costas de relieves montañosos, colinados o de terrazas y acantilados marinos. Pueden estar constituidas por rocas duras compactas y cohesivas, o por rocas con diversos grados de alteración, poco resistentes a los agentes erosivos marinos y subaéreos.

Costas bajas: costas con relieves de unos pocos metros de altura en la intersección tierra-mar, típicas de geoformas como los: deltas, planicies intermareales lagunas litorales, espigas, barras, playas, cordones de playas y terrazas de abrasión. En general están constituidas por depósitos sedimentarios no consolidados de origen aluvial, marino o eólico. Se exceptúan las terrazas de abrasión, conformadas en general por rocas duras.

Erosión: remoción de rocas, sedimentos o suelos por agentes erosionales como las corrientes y los vientos. En las zonas litorales se refiere a pérdidas de terreno generalmente asociadas a los efectos de oleajes, vientos y lluvias, entre otros factores. Se evidencia por desplazamientos hacia tierra de la línea de costa o por la profundización de los perfiles batimétricos sobre la plataforma continental somera.

Franja costera: franja que en cartografía representa la zona de contacto entre la tierra y el mar. Su posición es altamente variable en función principalmente del estado de las mareas, vientos, entre otros. Generalmente se define como la zona que representa el borde de tierra en las mareas altas normales de primavera (zonas con estaciones). En las costas donde la vegetación marca el límite tierra-mar, la línea de vegetación se asimila a la franja costera. En costas acantiladas, la línea de costa representa la intersección del talud acantilado con el nivel medio de las mareas altas con acantilados.

Geo rectificación: proceso mediante el cual se corrigen las distorsiones geométricas de imágenes del terreno obtenidas por sensores remotos

Grieta: zanja o surco perpendicular a la dirección de la pendiente, causada normalmente por la erosión de la superficie del terreno.

Hidrodinámica: rama de la hidráulica que estudia la dinámica de los fluidos.

Litoral: área de transición entre los ecosistemas terrestres y marinos. Se extiende entre el nivel de marea baja y la elevación de la tierra afectada por marea alta o por olas de tormenta.

Marea: cambio periódico del nivel del mar, producido principalmente por las fuerzas de atracción gravitatoria que ejercen el sol y la luna sobre la tierra. Aunque dicha atracción se ejerce de manera simultánea sobre todo el globo terrestre, en esta definición nos referimos a la atracción de la luna y del sol, sobre las aguas de los mares y océanos.

Modelación numérica: técnica basada en la física de los procesos que usa métodos numéricos para resolver las ecuaciones de movimiento. Es muy utilizada en muchos campos de estudio (ingeniería, ciencia, entre otros.) para comprobar o pronosticar condiciones oceanográficas a partir de observaciones.

Movimiento neto de playa: retroceso o avance neto de la playa, referenciado generalmente por los movimientos de la franja costera adoptada para cada sector litoral.

Onda: propagación de una perturbación con alguna propiedad en el espacio y en el tiempo, por ejemplo, densidad, presión, campos eléctricos o magnéticos. En general, se presenta un transporte de energía sin transporte de materia en un espacio que puede contener materia (aire, agua).

Ortofoto: presentación fotográfica de una superficie terrestre en la cual todos los elementos presentan la misma escala, sin errores ni deformaciones. La ortofoto tiene la misma validez de un plano cartográfico.

Playa: volumen de arena dispuesto cerca de la franja costera, que permite la disipación de la energía del oleaje.

Revegetalización: restablecimiento de la cobertura vegetal de un sector específico de terrenos, por medio de la siembra de diversas especies vegetales como herbáceos y arbustivos e inclusive árboles.

Riesgo: posibilidad de que se produzca un contratiempo o una desgracia que afecte adversamente a personas o a infraestructuras. Es la combinación entre vulnerabilidad y amenaza.

Smartphones: terminal móvil que ofrece servicios avanzados de comunicaciones como acceso a internet y correo electrónico.

Talud: superficie de terrenos inclinada con respecto a la horizontal, de manera temporal o permanentemente. Se forman sobre estructuras de suelo, roca, concreto armado u otro material que pueda contener la presión ocasionada por el suelo.

Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT: Electric Resistivity Tomography): método de prospección geofísica del terreno que permite obtener información del subsuelo, a partir de la resistencia aparente que ofrecen los materiales al paso de una corriente eléctrica.

Vulnerabilidad: incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante o, la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre.

Agradecimientos

El equipo del Laboratorio Costero agradece a los guardas de seguridad, los señores Edelmo Barrios Suárez y Carlos Antonio Martinez Pereira, y a toda la comunidad de la zona por su permanente colaboración y por el apoyo para el montaje y para la adecuación de la infraestructura instalada.

El equipo de la actividad *Inventario forestal* agradece al grupo de investigadores de PIMECLA, por la oportunidad de aportar elementos ecológicos de utilidad para la toma de decisiones ambientales.

El equipo de la actividad *Soluciones basadas en la naturaleza* expresa un sincero agradecimiento al DAGRAN, por permitir espacios de participación en tan relevante programa y fomentar la búsqueda de alternativas sostenibles para la problemática de la erosión costera en la región de Urabá.

El grupo de trabajo de *Mediciones oceanográficas* le agradece al DAGRAN por la oportunidad de aportar, desde el conocimiento, al entendimiento de la dinámica del litoral antioqueño para la toma oportuna de decisiones. Asimismo, a todo el personal de apoyo en las campañas de medición, capitanes y ayudantes lancheros y comunidad de pescadores de Arboletes.

El grupo de trabajo de la actividad *CoastSnap* agradece al Doctor Mitchell Harley y a su equipo de la UNSW, Australia, por compartir su experiencia, material y explicaciones para la instalación y uso de la metodología *CoastSnap*. A la Red Iberoamericana *Proplayas*, por servir de plataforma de intercambio de experiencias e ideas entre los diferentes investigadores que aplican esta metodología en diferentes costas iberoamericanas. A las alcaldías de Turbo, Necoclí, San Juan y Arboletes, por facilitar la instalación de estaciones en sus municipios. A los establecimientos comerciales: *BlueMoon* y *Simona del Mar* en Turbo, *Punta Palmeras* en Necoclí, *Restaurante Playa Munditos* en San Juan y *La Manuela* en Arboletes, por facilitar sus espacios y por su colaboración en la custodia de las estaciones.

El grupo de la actividad M*odelación numérica*, agradece al DAGRAN por financiar, gestionar y coordinar un proyecto como PIMECLA. Además, agradece al equipo por su entrega, responsabilidad y profesionalismo.

El grupo de la actividad *Talleres de capacitación* agradece la financiación del DAGRAN y el apoyo de la Universidad de Antioquia. También hace un reconocimiento especial a todo el personal de los *Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres* de los cinco municipios del litoral antioqueño, por su participación e interés durante el desarrollo del taller.

Prólogo

La erosión costera es un problema que llegó para quedarse. En los últimos años, la franja costera colombiana y antioqueña no han sido inmunes a este fenómeno. Y es que la erosión es un proceso multicausal en el cual se conjugan aspectos naturales y antrópicos. Entre las causas naturales encontramos algunas asociadas al cambio climático, como el ascenso del nivel del mar y el incremento de la intensidad del viento y, por ende, de la energía del oleaje; otros como el diapirismo de lodos y la subsidencia asociada a sitios con fallas geológicas. Del lado antrópico nos encontramos la extracción de la arena de la playa, la intervención de algunas obras costeras, la disposición inadecuada de aguas lluvias y servidas y la disponibilidad cada vez menor de sedimento fino, a grueso en la franja costera debido a la extracción de agua y a la construcción de represas, en la parte superior de las cuencas.

Causas como las mencionadas anteriormente, tienen su accionar sobre las costas antioqueñas en donde en los últimos años el retroceso promedio ha sido de hasta 5 m/año; en algunas zonas se han evidenciado retrocesos de hasta 15 m/año en lugares altamente intervenidos. Es de notar que los deltas de los ríos, medianamente caudalosos, se constituyen en los únicos sitios con agradación. Por consiguiente, estas tasas de erosión han ocasionando el desplazamiento de comunidades, la pérdida de viviendas y de zonas productivas en la zona rural.

Este es un panorama poco alentador, si además se tiene en cuenta que las obras costeras construidas de manera legal e ilegal, propenden por soluciones puntuales en las cuales no se tienen en cuenta las posibles afectaciones en las zonas aledañas. Es el caso de obras como espolones, los cuales han sido construidos uno tras otro en lugares con altas tasas de erosión, la mayoría de estas obras no han alcanzado a mitigar el problema a mediano y a largo plazo y, por el contrario, se constituyen en detonantes de una erosión más efectiva en lugares donde antes no existía. En general, se han buscado soluciones puntuales, abandonando la visión integral del problema.

Teniendo en cuenta las múltiples aristas asociadas al problema de la erosión costera, el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAN), en compañía de la Universidad de Antioquia, y de manera específica de profesores de la Facultad de Ingeniería y de la Corporación Académica Ambiental asociados a la Escuela Ambiental y a la Sede de Ciencias del Mar, han desarrollado en fases (I a IV), el Programa Integral para el Monitoreo y la Mitigación a la Erosión Costera en el Litoral Antiqueño (PIMECLA), el cual genera en primera instancia conocimiento necesario para la definición de las causas de la erosión. Con este fin se instalaron sensores de medición de parámetros oceanográficos, los cuales han realizado mediciones inéditas y continuas durante los últimos años. De la misma manera, se implementaron modelos numéricos, que han permitido, entre otras cosas, pronosticar condiciones oceanográficas a escala fina dentro y fuera del golfo, así como el estudio de diferentes escenarios de modificaciones de la franja costera.

Así pues, utilizando una metodología que incluye mediciones con drones e imágenes de satélite, se recorrió metro a metro la línea de costa del litoral antioqueño con el fin de actualizar el listado de los sitios críticos de erosión costera, y de paso, identificar los sitios con mayor acreción. Estas actividades no se hubieran podido cumplir exitosamente de no contar con la participación de las comunidades costeras, de colegios y de Consejos Municipales de Gestión del Riesgo, que fueron capacitados para ser partícipes del programa como científicos ciudadanos por medio de proyectos como el de *CoastSnap*. Este proyecto permitió, por medio de plataformas de bajo costo y con fotos tomadas desde celulares, monitorear las costas turísticas intervenidas y poco intervenidas de Urabá.

Importante mencionar que una de las falencias de la región es que no podía experimentarse a escala para probar la eficiencia de las intervenciones, y de manera particular, de las obras por construir como parte de la solución a un problema específico de erosión con el fin de conocer preliminarmente como esta solución estabiliza

el problema de erosión en un lugar. Es por esto que uno de los hitos más importantes de PIMECLA es la creación e instalación del Laboratorio Costero ubicado en el municipio de Arboletes. Este lugar se ha convertido en el espacio para la experimentación *in situ* de soluciones adaptativas y basadas en la naturaleza. Es de resaltar que algunas de estas soluciones tienen como base implementaciones comunitarias y que desde PIMECLA se han adaptado con diseños conceptuales a partir de ellas.

Lo anterior, demuestra que es importante involucrar y empoderar a la comunidad, en la ejecución y mantenimiento de este tipo de soluciones que, además, son soluciones que tienen un presupuesto por metro lineal mucho menor que las soluciones ingenieriles tradicionales o duras. Por lo tanto, el Laboratorio se convierte en un lugar desde donde se proponen, se diseñan y se ensayan soluciones para toda la franja litoral antioqueña. En el corazón de PIMECLA se ubican las comunidades, las cuales se apropian del nuevo conocimiento y proponen soluciones, como las mencionadas, con el fin de mitigar el problema de la erosión costera. Es así como este programa ha permitido crear las bases sobre las cuales el monitoreo de variables, el pronóstico y la propuesta de obras innovadoras seguirá siendo un reto para los habitantes de la región costera antiqueña, colombiana y del mundo entero. Por último, es de resaltar que este programa les ha permitido a muchos de los estudiantes y egresados de la región realizar investigación aplicada en temas de protección del medio costero, por lo cual estamos seguros que con algunos recursos económicos de las próximas administraciones, esta masa crítica desarrollará cada vez más proyectos integrales, de la mano de las comunidades.

Andrés Julián Rendón

Gobernador de Antioquia

Contenido

Coordinación Editorial 12

Referencia final 12

Primera cita en el texto (Estilo APA) 12

Citas posteriores en el texto (Estilo APA) 12

Siglas, acrónimos y abreviaturas utilizadas 14

Glosario 15

Agradecimientos 17

Prólogo 19

Indice de figuras 28

Indice de tablas 27

Capitulo 1

Monitoreo de línea de costa

1.1 Introducción 31

1.2 Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio 31

1.2.1 Geología 31

1.2.2 Geomorfología 32

1.3 Metodología 32

1.3.1 Línea de costa con imágenes satelitales 32

1.3.2 Línea de costa a partir de información colectada en campo. 33

1.4 Monitoreo con imágenes satelitales 33

1.4.1 Introducción 33

1.4.2 Resultados y análisis de resultados 33

1.4.3 Conclusiones 34

1.5 Muestreos mediante trabajo en campo. 36

1.5.1 Introducción 34

1.5.2 Resultados 35

1.5.3 Conclusiones 40

1.6 Referencias 41

Capitulo 2

Laboratorio Costero

2.1 Introducción 45

2.2 Características generales 45

2.2.1 Metodología 45

2.2.2 Resultados 48

2.3 Características topobatimétricas 48

2.3.1 Metodología 48

2.3.2 Resultados y análisis 48

2.3.3 Conclusiones 49

2.4 Características geotécnicas 49

2.4.1 Metodología 49

2.4.2 Resultados y su análisis 50

2.4.3 Conclusiones 52

2.5 Forestales 52

2.5.1 Introducción 52

2.5.2 Metodología 52

2.5.3 Resultados 53

2.5.4 Conclusiones 55

2.6 Monitoreo de la línea de costa del laboratorio Costero 56

2.6.1 Introducción 56

2.6.2 Metodología 56

2.6.3 Resultados y análisis de resultados 56

2.6.4 Conclusiones 57

2.7 Referencias 57

Capitulo 3

Estudio experimental, medición de parámetros físicos oceanográficos y proyecto Coast Snap para la determinación del retroceso de la línea de costa

3.1 Introducción 61

3.2 Estudio experimental del retroceso de la línea de costa 62

3.2.1 Metodología 62

3.2.2 Resultados 63
3.2.3 Conclusiones 64
3.3 Medición de los parámetros oceanográficos básicos 65
3.3.1 Zonas de medición 65
3.3.2 Metodología 65
3.3.3 Resultados de las mediciones 66
3.3.4 Conclusiones 71
3.4 Monitoreo ciudadano: *CoastSnap* 71
3.4.1 Metodología 71
3.4.2 Resultados 72
3.4.3 Conclusiones 75
3.5 Referencias 75

Capitulo 4

Implementación de soluciones a escala natural

4.1 Introducción 81
4.2 Área de estudio 81
4.3 Soluciones adaptativas 81
4.3.1 Experimento de espolón temporal 81
4.3.2 Experimento de barreras permeables 82
4.3.3 Conclusiones 83
4.4 Soluciones basadas en la naturaleza 83
4.4.1 Metodología 83
4.4.2 Resultados 84
4.4.3 Conclusiones 84
4.4.4 Referencias 85

Capitulo 5

Modelación Numérica

5.1 Introducción 89
5.2 Metodología 89
5.3 Resultados 91
5.4 Conclusiones 92
5.5 Otros trabajos 92
5.5.1. Pronóstico 92
5.5.2. Anomalía del nivel del mar 93
5.6 Referencias 95

Capitulo 6

Componente social y talleres de capacitación

6.1 Introducción 99
6.2 Estrategia de participación social y comunitaria 99
6.2.1 Metodología 99
6.2.2 Resultados 100
6.2.3 Conclusión 102
6.3 Talleres de capacitación 102
6.3.1. Introducción 102
6.3.2. Objetivo 102
6.3.3. Metodología 103
6.3.4. Desarrollo del taller 103
6.3.5. Conclusiones 105
6.3.6. Referencias 105

Capitulo 7

Volcán de lodo

7.1 Contexto geológico general 109
7.2 Topo Barimetría del domo volcán 110
7.2.1 Metodología 110
7.2.2 Resultados y análisis de resultados 110
7.2.3 Conclusiones 111
7.3 Mediciones Geoeléctricas, sísmicas y caracterización del lodo, del volcán de lodo de Arboletes 111
7.3.1 Metodología 111
7.3.2 Resultados 112
7.3.2.1 Prospección geotécnica, sísmica y de resistividad eléctrica 112
7.3.2.2 Caracterización del lodo 113
7.4 Monitoreo de la morfología del domo volcán de lodo 114
7.4.1 Metodología 114
7.4.2 Resultados y análisis de resultados 114

7.4.2.1 Desplazamientos del terreno 114
7.4.2.2 Monitoreo de grietas en la zona de estudio.....115
7.4.2.3 Monitoreo de cárcavas en la zona de estudio 115
7.4.2.4 Monitoreo de estructuras (Construcciones) 116
7.4.2.5 Conclusiones y recomendaciones 116
7.5 Zonificación del predio del volcán de lodo de Arboletes 116
7.5.1 Marco legal 116
7.5.2 Recomendaciones 117
7.5.2.1 Zona 1 117
7.5.2.2 Zona 2, Zona 3..... 118
7.5.2.3 Zona 4..... 118
7.5.2.4 Zona 5 118
7.5.2.5 Zona 6 118
7.5.2.6 Zona 7..... 118
7.5.2.7 Zona 8 118
7.5.2.8 Zona 9..... 118
7.5.2.9 Zona 10 118
7.6 Referencias 119

Capitulo 8

Diseños conceptuales paisajísticos en procura de una ocupación sostenible del litoral antioqueño

8.1 Introducción.....123
8.2 Metodología 123
8.2.1 Resultados 124
8.2.2 Conclusiones.....141
8.2.3 Referencias.....141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.1 Unidades geológicas desde boca Tarena a río Caimán Nuevo. Fuente: Modificado de las planchas 69 y 79 GEOTEC Ltda, 2003. 32

Figura 1.2.2 Unidades geológicas de la línea de costa desde río Caimán Nuevo a punta Arenas. Fuente: modificado de las planchas 69 y 79 GEOTEC Ltda, 2003. 32

Figura 1.4.2. Litoral antioqueño en el año 1978. Fuente: Diseño propio a partir de una imagen satelital LandSAT 1 del 21/12/1978 (2021). 33

Figura 1.4.3. Litoral antioqueño en el año 2020. Fuente: Diseño propio a partir de una imagen satelital SENTINEL 2 del 30/10/2020 (2021). 34

Figura 1.4.4. Estimación de la velocidad de los cambios morfológicos en la línea de costa del litoral antioqueño en el periodo 1978 – 2020. Fuente: Diseño propio, 2021. 34

Figura 1.5.1 Litoral Antioqueño: en rojo, el litoral protegido por el interior del golfo de Urabá, en cian, el litoral sobre mar abierto. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 34

Figura 1.5.2 Puntos de control en el litoral de los municipios de Turbo y Necoclí. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 35

Figura 1.5.3 Línea de costa Playa Tarena. En rojo y en azul, la posición de la línea de costa en el 2009 y en el 2021 respectivamente. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 35

Figura 1.5.4 Línea de costa desembocadura de rio León y bahía aledaña. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 35

Figura 1.5.5 Línea de costa sector *Leoncito* – Río Suriquí. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 36

Figura 1.5.6 Línea de costa sector Leoncito – Río Suriquí. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 36

Figura 1.5.7 Línea de costa sector Piedrecitas. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 36

Figura 1.5.8 Línea de costa sector Cope. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 36

Figura 1.5.9 Línea de costa sector 27 de diciembre - sur. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 37

Figura 1.5.10 Línea de costa sector 27 de diciembre - centro. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 37

Figura 1.5.11 Línea de costa sector 27 de diciembre - norte.Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 37

Figura 1.5.12 Línea de costa sector Bajo Cirilo. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 37

Figura 1.5.13 Línea de costa sector Tie. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 37

Figura 1.5.14 Línea de costa sector Alto Caimán. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 38

Figura 1.5.15 Línea de costa sector Caimán Nuevo. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 38

Figura 1.5.16 Línea de costa sector La Ceibita. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.17 Línea de costa sector El Totumo. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.18 Línea de costa sector Caimán viejo. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.19 Línea de costa sector Casa Blanca. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.20 Línea de costa sector Virgen del cobre. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.21 Línea de costa del casco urbano de Necoclí. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 39

Figura 1.5.22 Línea de costa sector San Sebastián. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 40

Figura 1.5.23 Línea de costa sector Río Necoclí. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 40

Figura 1.5.24 Línea de costa sector El Caballo. Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 40

Figura 1.5.25 Línea de costa sector El Lechugal. Fuente: Imagen satelital Bing del 20202 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón. 40

Figura 2.1.1 Ubicación del Laboratorio Costero. Ilustración: Isabel López, 2022. 45

Figura 2.1.2 Ubicación del predio en el municipio de Arboletes. Fuente: Google Earth; imagen obtenida el día 24 de octubre de 2021. 45

Figura 2.2.1 Talud característico de la línea de costa del Laboratorio Costero. Fotografía: Isabel López, 2020. 46

Figura 2.2.2 Representación gráfica del corte del talud. Ilustración: Isabel López, 2022. 46

Figura 2.2.3 Intervención de retroexcavadora. Fotografía: Isabel López, 2022. 46

Figura 2.2.4 Resultado final del corte del talud. Fotografía: Isabel López, 2022. 46

Figura 2.2.5 Construcción del filtro. Fotografía: Isabel López, 2022. 47

Figura 2.2.6 Pendiente de 35° protegida con material vegetal. Fotografía: Isabel López, 2022. 47

Figura 2.2.7 Área no protegida con material vegetal. Fotografía: Juan Torres, 2022. 47

Figura 2.2.8 Contenedor instalado para funcionamiento de oficina. Fotografía: Isabel López, 2022. 47

Figura 2.2.9 Manejo de zonas verdes en el Laboratorio Costero. Fotografía: Isabel López, 2022. 47

Figura 2.3.1 Distribución espacial de los puntos geográficos en el Laboratorio Costero. Fuente: Diseño propio, 2020. 48

Figura 2.3.2 Modelo de elevación digital. Fuente: Diseño propio, 2021. 49

Figura 2.3.3 Mapa de pendientes de la zona de estudio. Fuente: Diseño propio, 2021. 49

Figura 2.4.1 Ejecución de sondeos exploratorios de campo. Fuente: Diseño propio, 2021. 50

Figura 2.4.2 Localización sección de análisis. Fuente: Diseño propio, 2021. 50

Figura 2.4.3 Análisis en condición actual No drenada (corto plazo) Laboratorio Costero. Fuente: Diseño propio, 2021. 51

Figura 2.4.4 Análisis en condición actual Drenada (largo plazo) Laboratorio Costero. Fuente: Diseño propio, 2021. 51

Figura 2.4.5 Análisis con intervención en sacos de suelo cemento. Fuente: Slide ® v6.0. 51

Figura 2.4.6 Esquema y análisis con intervención en muro enrocado. Fuentes: Slide ® v6.0. 51

Figura 2.4.7 Comparativa de estabilidad entre varias alternativas de intervención. Fuente: Diseño propio, 2021. 51

Figura 2.5.1 Esquema instructivo para la medición del diámetro en tallos con raíces expuestas. Fuente: Barreto et al., 2018. 53

Figura 2.5.2 Esquema gráfico de la medición de altura de los individuos. Fuente: Barreto et al., 2018. 53

Figura 2.5.3 Perímetro para cerramiento. Fuente: Diseño propio, 2021. 53

Figura 2.5.4 Punto de siembra de mangle. Fuente: Diseño propio, 2021. 53

Figura 2.5.5 Número de individuos registrados, familia, géneros y especies identificados en el terreno del Laboratorio Costero. Fuente: Diseño propio, 2021. 54

Figura 2.5.6 Estado fitosanitario de los individuos. Fuente: Diseño propio, 2021. 54

Figura 2.5.7 Abundancia relativa de las especies identificadas en el terreno del Laboratorio Costero. Fuente: Diseño propio, 2021. 55

Figura 2.6.1 Monitoreo de la línea de costa desde el 21/01/2021 hasta el 23/04/2022. Fuente: Diseño propio, 2022. 56

Figura 2.6.2 Retroceso de la línea de costa para el periodo de análisis. Fuente: Diseño propio, 2022. 57

Figura 2.6.3 Variación de la base del talud durante el periodo de análisis. Fuente: Diseño propio, 2022. 57

Figura 3.2.1 Nube de puntos topo batimétricos tomada desde el 14 de agosto de 2021 hasta el 6 de noviembre de 2021. Fuente: Diseño propio. 62

Figura 3.2.2 Señalización usada como puntos de control. Fuente: Diseño propio. 62

Figura 3.2.3 Resultados del retroceso de costa visualizado mediante la herramienta DSAS aplicando los dos criterios: línea de agua y base del talud. Fuente: Diseño propio. 63

Figura 3.2.4 Perfiles topográficos para la observación de su evolución en el tiempo. Fuente: Diseño propio. 64

Figura 3.2.5 Evolución de los nueve perfiles entre agosto de 2021 y abril de 2022. Fuente: Diseño propio. 64

Figura 3.3.1 Localización geográfica de la zona de estudio; los puntos de colores corresponden a cada una de las zonas donde se realizaron mediciones *In situ*. Fuente: Diseño propio. 65

Figura 3.3.2 Boyas de deriva, con sistema de posicionamiento geográfico. Fuente Torres, 2022. 66

Figura 3.3.3 Diseño de anclajes y esquema de instalación en el fondo del mar. Fuente: Torres, 2022. 66

Figura 3.3.4 Trayectorias del derivador con draga, dirección del viento y curva de marea meteorológica original y desfasada; trayectoria 1 (07:08-13:42) y trayectoria 2 (14:07-16:41). Fuente: Diseño propio. Los datos de viento fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad de Antioquia – sede Ciencias del Mar. 67

Figura 3.3.5 Trayectorias del derivador con draga, dirección del viento y curva de marea meteorológica original y desfasada; trayectoria 1 (07:08-13:42) y trayectoria 2 (14:07-16:41). Fuente: Diseño propio. Los datos de viento fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad de Antioquia – sede Ciencias del Mar. 67

Figura 3.3.6 Trayectorias de los derivadores en Arboletes; a) derivador #1 y b) derivador #2. Fuente: Diseño propio. 67

Figura 3.3.7 Trayectorias de los derivadores en la zona de fondeo *Alpha* – Turbo. Fuente: Diseño propio. 68

Figura 3.3.8 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 1 en Arboletes. Fuente: Diseño propio. 68

Figura 3.3.9 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 2 y 3 en Arboletes. Fuente: Diseño propio. 69

Figura 3.3.10 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 4 en Arboletes. Fuente: Diseño propio. 69

Figura 3.3.11 Probabilidad conjunta entre altura de ola significante y período pico. Fuente: Diseño propio MATLAB Handle Graphics 69

Figura 3.3.12 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico, dirección y marea para la campaña 1 en Necoclí. Fuente: Diseño propio. 70

Figura 3.3.13 Serie temporal de las corrientes a 10.5 m de profundidad en Necoclí. Fuente: Diseño propio. 71

Figura 3.3.14 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico, dirección y marea para la campaña 2 en Necoclí. Fuente: Diseño propio. 71

Figura 3.3.15 Serie temporal de las corrientes en la columna de agua en Necoclí. Fuente: Diseño propio. 71

Figura 3.4.1 Estaciones *CoastSnap* instaladas a nivel mundial (200 estaciones hasta mayo de 2022). Tomado de Harley y Kinsela, 2022. 72

Figura 3.4.2 Diagrama paso a paso para el monitoreo de playas bajo la metodología *CoastSnap*. Fuente: Diseño propio. 72

Figura 3.4.3 Diseño y dimensiones (en cm) de las plataformas para dispositivos móviles. Fuente: Diseño propio. 74

Figura 3.4.4 Carteles instalados en las estaciones *CoastSnap*. A) cartel de estaciones #1, 2 y 3, en Laboratorio Costero, Arboletes; B) cartel de estación en Playa Dulce, Turbo; C) cartel de estación en playa El Pescador, Necoclí. Fuente: Diseño propio. 74

Figura 3.4.5 Diseños de las estaciones CoastSnap en Laboratorio Costero: A) Estación #1; B) Estación #2; C) Estación #3 y río Hobo; D) Estación playa Arboletes #1; E) Estación playa Volcán, Arboletes #1; F) Estación playa Dulce, Turbo; G) Estación playa El Pescador, Necoclí. Fuente: Diseño propio. 74

Figura 3.4.6. Principales parámetros de posición de las plataformas *CoastSnap*. Arriba: sentido y signos. Abajo: obtención del Azimut. Fuente: Diseño propio. 75

Figura 4.3.1 Instalación de los primeros cuerpos de andamio. Fotografía: Sandra María Echeverri G, 2021. 82

Figura 4.3.2 Trampas de sedimento instaladas en andamios. Fotografía: Isabel López, 2021. 82

Figura 4.3.3 Montaje experimento de barreras permeables. Fotografía: Isabel López, 2022. 82

Figura 4.3.4A Playa el 4 de mayo de 2022. Fotografía: Isabel López, 2022. 83

4.3.4B Depósito de sedimentos el 7 de mayo de 2022. Fotografía: Isabel López, 2022. 83

Figura 4.4.1 Especies seleccionadas para revegetalización del talud: R. colorata (A) y M. pudica (B). Fuente: Javier Venegas. 83

Figura 4.4.2 Esquema de revegetalización del talud con especies nativas. Las imágenes incluidas son representaciones simbólicas sin escala. Diseño: Rosalyn Hoyos-Gutiérrez y Javier Venegas (2021). 84

Figura 5.1 Área de estudio: Ubicación municipios del Urabá antioqueño. Fuente: Diseño propio..... 90

Figura 5.2 Municipio de Arboletes. volcán de lodo y punta Rey. Fuente: Diseño propio. 90

Figura 5.3 Metodología. Fuente: Diseño propio. 90

Figura 5.4 Batimetría sector municipio de Arboletes. Fuente: Diseño propio. 90

Figura 5.5 Levantamiento batimétrico sector Arboletes. Fuente: Diseño propio. 91

Figura 5.6 Dique en talud como protección a la vía Urabá – Montería – Urabá. Fotografía: Giner Jiménez, 2019. 91

Figura 5.7 Modelación de oleaje con *Wave Watch III* en el Caribe y golfo de Urabá. Fuente: Diseño propio..... 91

Figura 5.8 Corriente de deriva (a), oleaje (b) y transporte de sedimentos (c). Fuente: Diseño propio..... 92

Figura 5.9 Hidrodinámica superficial Arboletes (estructuras) (a), transporte de sedimentos Arboletes (estructuras) (b), Hidrodinámica superficial Arboletes (punta Rey) (c), transporte de sedimentos Arboletes (punta Rey) (d). 92

Figura 5.10. Boletín meteomarino. Fuente: PIMECLA,2024 93

Figura 5.11. Boletín meteomarino, puntos de interés. Fuente: PIMECLA,2024..... 93

Figura 5.12. Ilustración de anomalías del nivel del mar global para 01/09/2020. Fuente: Tomado de https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-sea-level-global?tab=overview 94

Figura 5.13. Área para análisis de anomalía del nivel del mar, parte colombiana. Fuente: Elaboración propia..... 94

Figura 5.14. Área para análisis de anomalía del nivel del mar, parte panameña. Fuente: Elaboración propia. 94

Figura 5.15. Diagrama de Hovmöller de anomalías del nivel del mar del Caribe sur – golfo de Urabá. Fuente: Elaboración propia. 95

Figura 5.16. Diagrama de Hovmöller de anomalías del nivel del mar del Caribe panameño – Golfo de Urabá. Fuente: Elaboración propia..... 95

Figura 6.1 Monitoreo de la línea de costa, en el sitio de estudio playa corregimiento Zapata. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 99

Figura 6.2 Pre-recorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa corregimiento Mulatos, municipio de Necoclí. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 100

Figura 6.3 Pre-recorrido en la línea de costa en el sitio de estudio sector La Curva, municipio de Turbo. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 100

Figura 6.4 Prerecorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa vereda Tie, municipio de Turbo. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 100

Figura 6.5 Prerecorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa vereda punta de Piedra, municipio de Turbo. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 101

Figura 6.6 Socialización de *CoastSnap*. Arboletes, Laboratorio Costero. Fotografía: Yenny Navarro, 2022..... 101

Figura 6.7 Socialización de *CoastSnap*. Arboletes, Laboratorio Costero. Fotografía: Yenny Navarro, 2022. 101

Figura 6.8A. Tema trabajado: conceptos y definiciones básicas de zona costera. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021..... 103

Figura 6.8B. Tema trabajado: geomorfología costera apoyada en mapas físicos. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021..... 103

Figura 6.8C. Tema trabajado: medición de perfil de playa por medio del método Puleo. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021..... 104

Figura 6.8D. Tema trabajado: medición de la corriente superficial de la costa utilizando cocos. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021..... 104

Figura 6.9A. Presentación con los asistentes e inicio de explicación de los procesos costeros de la zona. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021. 104

Figura 6.9B. Charla sobre contaminación marina. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021. 104

Figura 6.9C. Explicación y demostración de método Puleo para mediciones de perfiles de playa. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021. 104

Figura 6.9D. Ejercicio, utilizando cocospara medir corriente superficial de la costa. Fotografía: Geraldin Morelo, 2021. 105

Figura 6.10. Asistencia promedio por módulo del taller. Elaborado por Geraldin Morelo, 2021. 105

Figura 6.11. Porcentaje de estudiantes que obtuvieron certificado de participación en el tallesr y porcentaje de estudiantes que no fueron certificados. Elaborado por Geraldin Morelo, 2021. 105

Figura 7.1.1. Ubicación del volcán de lodo de Arboletes. Fuentes: Imagen Satelital SENTINEL II del 2020, ortofotos PIMECLA de 2019 y 2020; Red vial nacional: arcGIS online del 2020..... 109

Figura 7.1.2. Domo diapírico del volcán de lodo de Arboletes con el flanco oeste colapsado. Fuente: Imagen Satelital SENTINEL II del 2020, ortofoto PIMECLA del 2020; Red vial nacional: arcGIS online del 2020..... 110

Figura 7.2.2. Modelo de pendientes de la zona: volcán de lodo. Fuente: Proyecto PIMECLA (2020). 110

Figura 7.3.1. Localización de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica. Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2021)..... 112

Figura 7.3.2. Localización de las líneas sísmicas. Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2021)..... 112

Figura 7.3.3. Localización de los sondeos. Fuente: Consultorías Geotecnia y Ambiente S.A.S. (2021)..... 112

Figura 7.3.4. Modelo de la cámara de lodo obtenido mediante líneas de ERT. Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2020). 113

Figura 7.4.1. Puntos de control en el volcán de lodo. Fuente: Luis Alfredo García Oquendo (2020)..... 114

Figura 7.4.2. Plan de vuelo de dron para el área de estudio volcán de lodo. Fuente: Diseño propio (2020)..... 114

Figura 7.4.3. Mapa de desplazamientos promedio para los puntos de control instalados en la zona de estudio. Fuente: Diseño propio (2022). 114

Figura 7.4.4. Zonas de desplazamiento para la zona de estudio. Fuente: Diseño propio (2022)..... 115

Figura 7.4.5. Grietas presentes en el terreno del área de estudio. Fuente: Diseño propio (2022)..... 115

Figura 7.4.6. Cárcavas registradas en el área de estudio. Fuente: Diseño propio (2022). 116

Figura 7.4.7. Estructuras presentes y retiradas en el domo durante el periodo de estudio. Fuente: Diseño propio (2022). 116

Figura 7.5.1. Mapa de Zonificación del predio del volcán de lodo de Arboletes Fuente: Diseño propio (2022)..... 117

Figura 8.1. Fotografías de entrevistas y talleres comunitarios liderados por los estudiantes de arquitectura UPB en Turbo, Necoclí y San Juan de Urabá para la consulta de las percepciones del riesgo costero y del acompañamiento del equipo PIMECLA-UdeA en dichas actividades. 124

Figura 8.2A. Paisajes resilientes a la erosión costera y a las inundaciones (Vélez, J., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora. 126

Figura 8.2B. Paisajes resilientes a la erosión costera y a las

inundaciones (Vélez, J., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 127

Figura 8.3A. Arquitectura del paisaje en las costas inundables (Restrepo, A., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 128

Figura 8.3B. Arquitectura del paisaje en las costas inundables (Restrepo, A., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 129

Figura 8.4A. Alternativas para recuperar el paisaje costero con potencial turístico en riesgo de inundación (Echeverry, A., 2023). Corregimiento de Uveros (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 130

Figura 8.4B. Alternativas para recuperar el paisaje costero con potencial turístico en riesgo de inundación (Echeverry, A., 2023). Corregimiento de Damaquiel (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 131

Figura 8.5A. Arquitecturas para la recuperación de playas (Arango, P., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son del autor. ... 132

Figura 8.5B. Arquitecturas para la recuperación de playas (Arango, P., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son del autor.... 133

Figura 8.6A. Red de espacios públicos entorno a la desembocadura del caño Jaime (Osorio, A., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 134

Figura 8.6B. Red de espacios públicos entorno a la desembocadura del caño Jaime (Osorio, A., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.. 135

Figura 8.7A. Configuración de paisajes rurales costeros (Marín, I., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 136

Figura 8.7B. Configuración de paisajes rurales costeros (Marín, I., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 137

Figura 8.8A. Infraestructura mixta habitable (Contreras, M., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 138

Figura 8.8B. Infraestructura mixta habitable (Contreras, M., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.... 139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.5.1 Movimiento neto de línea de costa entre los años 2009 – 2021, en los tramos monitoreados en el municipio de Turbo; los valores se presentan ordenados de mayor a menor. Fuente: Datos del monitoreo 2021.... 38

Tabla 1.5.2 Áreas perdidas y ganadas para los sitios de monitoreo, litoral de Turbo. Fuente: datos del monitoreo 2021.... 38

Tabla 1.5.3 Retrocesos y avances de Línea de Costa de Necoclí. Fuente: Datos del monitoreo 2022.... 40

Tabla 1.5.4 Áreas ganadas y perdidas en el litoral de Necoclí. Fuente: Datos del monitoreo 2022.... 40

Tabla 2.4.1 Factores de seguridad básicos mínimos directos. (*) Nota: Los parámetros sísmicos pseudo estáticos de construcción serán el 50% de los de diseño. Fuente: Tomado de la tabla H.2.4-1. *Normas Colombianas de diseño y construcción Sismoresistente*, 2010.... 50

Tabla 2.4.2 Parámetros geotécnicos determinados para el depósito aluvial. Fuente: Diseño propio, 2021.... 50

Tabla 2.4.3 Parámetros geotécnicos determinados para la arcillolita. Fuente: Diseño propio, 2021.... 50

Tabla 2.5.1 Categorías de tamaño y variables a medir en campo. Fuente: Barreto et al., 2018.... 52

Tabla 2.5.2 Resumen general del inventario forestal. Fuente: Diseño propio, 2021.... 54

Tabla 2.5.3 Ficha descriptiva del mangle rojo. Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2022).... 55

Tabla 3.2.1 Retroceso de la costa a partir de dos criterios usados: línea de agua y base de talud. Fuente: Diseño propio, 2021.... 63

Tabla 3.2.2 Estimación del volumen de material erosionado entre agosto de 2021 y abril de 2022 a partir de la proyección de 20 m del área transversal erosionada en los perfiles topográficos. Fuente: Diseño propio 2021.... 64

Tabla 3.3.1 Lugar, fecha y equipos utilizados en las campañas de medición. Fuente: Diseño propio.... 66

Tabla 3.3.2 Velocidades máximas, mínimas y promedio de los derivadores en el sector punta Las Vacas, durante las dos trayectorias. Fuente: Diseño propio.... 66

Tabla 3.3.3 Velocidades máximas, mínimas y promedio de los derivadores en Arboletes durante las diferentes trayectorias. Fuente: Diseño propio, 2021.... 68

Tabla 3.3.4 Velocidades máximas, mínimas y promedio y distancias recorridas por los derivadores en la zona de fondeo *Alpha* - Turbo. Fuente: Diseño propio.... 68

Tabla 3.4.1 Especificaciones de las estaciones *CoastSnap* instaladas en el litoral antioqueño. Fuente: Diseño propio, 2021.... 72

Tabla 3.4.2. Ángulos para la parametrización de las estaciones instaladas. Fuente: Diseño propio, 2021.... 74

Tabla 4.4.1 Resultados análisis de suelo, área de estudio franja inferior y superior. Fuente: Diseño propio, 2021.... 84

Tabla 5.1. Descripción de mediciones de la base de datos. Fuente: Diseño propio, 2021.... 94

Tabla 6.1 Localidades de la línea de costa antioqueña. Fuente: Diseño propio. 2021.... 100

Tabla 6.2 Bases de *CoastSnap* instaladas en la línea de costa antioqueña. Fuente: Diseño propio 2021.... 101

Tabla 6.3 Contenido temático del taller de riesgo costero. Fuente: Diseño propio.... 103

Tabla 7.3.1. Metales, hidrocarburos totales, pH y conductividad eléctrica del lodo del volcán. Fuente: Laboratorio de Estudios ambientales, UdeA; 2021.... 113



CAPÍTULO

1°

Monitoreo de línea de costa

PIMECLA

Programa Integral para el Monitoreo
y Mitigación de la Erosión Costera
en el Litoral Antioqueño

Capítulo 1º

Monitoreo de línea de costa

Autores:

Alba Cecilia Bustamante Caro.
Luis Alfredo García Oquendo.
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera.
Isabel Cristina López Genes.
Diomer Eliécer Tobón Monsalve.
Juan Guillermo Torres Córdoba.
Carlos Alberto Palacio Tobón.
Vladimir G. Toro Valencia.

1.1 Introducción

La exploración biofísica del sur del litoral Caribe (departamentos de Antioquia y Chocó), específicamente del litoral del golfo de Urabá, se ha abordado en numerosos estudios: Aristizábal, O. C., Betancur, M. J., & Vásquez, C. I. (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necocli-golfo de Urabá (Antioquia-Colombia) (Doctoral dissertation, Tesis Geología, Univ Eafit, Medellín), Franco, 1992; Velásquez y Rave, 1996; Correa y Vernette, 2004; Bernal et al, 2005; Posada y Henao, 2008; García y Valencia, 2007; Prüssmann, 2012; Paniagua, 2013; Vélez y Aguirre, 2016; Correa, et al., 2016; Urrego et al., 2016; Blanco, 2016; Leal, 2017; Gómez, 2021, Rojas 2021, entre otros.

Estos estudios son básicos para conocer los procesos ecosistémicos de este territorio tan diverso, así como también para conocer las dinámicas de ocupación y de apropiación del espacio por parte de las comunidades allí asentadas.

Uno de los objetivos del proyecto PIMECLA es inspeccionar e inventariar el estado actual del litoral antioqueño. Para ello, existen varias técnicas que permiten realizar monitoreos sobre las líneas de costa, entre ellas, los métodos topográficos que emplean equipos como niveles de precisión, estaciones totales o sistemas de posicionamiento global (GPS), sin embargo, cualquiera de estos métodos requiere de personal trabajando directamente sobre el terreno. Cuando la zona de estudio es relativamente grande, los métodos topográficos pueden no ser las mejores alternativas para monitorear las distintas variables.

Teniendo en cuenta lo anterior, los sensores remotos como satélites, radares, cámaras instaladas en aviones o vehículos aéreos no tripulados (VANT, UAV, RPAS comúnmente conocidos como drones) son muy útiles y se vuelven imprescindibles, puesto que, se pueden levantar grandes áreas en tiempos cortos y dependiendo de la precisión requerida, la adquisición de datos se hace con el detalle y a la escala pedida.

El litoral antioqueño se encuentra en jurisdicción de los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes. El monitoreo de este litoral se hizo mediante imágenes de satélites y muestreos en campo, con el objetivo de identificar la dinámica morfológica expresada en avances o retrocesos de la línea de costa, comparando imágenes actuales y pasadas de la línea de costa.

Se usaron un conjunto de imágenes satelitales desde 1978 hasta el 2020 (sensores Landsat y Sentinel 2) y para el muestreo en campo, la información se acopió usando un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) y fotografías aéreas tomadas con un dron MAVIC PRO-2.

Para, finalmente, con esa información, estimar las tasas de evolución del litoral y para construir la línea base de monitoreos futuros, redactando criterios para la toma de decisiones frente a los problemas asociados a la erosión costera y a los cambios relativos del nivel del mar, asociados o no al cambio climático.

1.2 Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio

1.2.1 Geología

Geológicamente, el golfo de Urabá es parte de una cuenca de sedimentación (geosinclinal Bolívar) que se extiende longitudinalmente a la costa Pacífica colombiana, desde el norte de Ecuador hasta el golfo de Urabá; esta cuenca presenta espesores mayores a 5 km y está constituida por rocas del Cretáceo, Paleógeno y Neógeno, con una cubierta de sedimentos del cuaternario (Nygren, 1950; Duque-Caro, 1980 en Prüssmann (2012)).

La Figura 1.2.1 presenta la litología superficial en la franja litoral del municipio de Turbo. El mapa es modificado de las planchas 69 y 79 escala 1:100.000 del SGC (GEOTEC Ltda., 2003).

La margen este del golfo de Urabá está constituida

por rocas sedimentarias pertenecientes al Cinturón del Sinú (Figura 1.2.2).

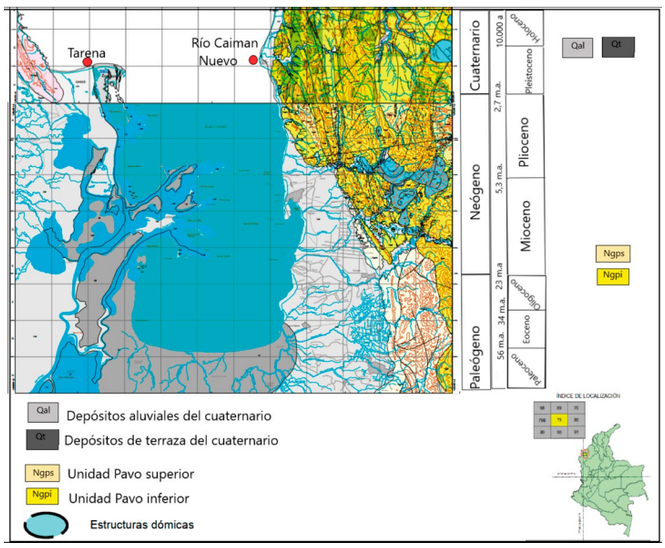


Figura 1.2.1 Unidades geológicas desde boca Tarena a río Caimán Nuevo.

Fuente: Modificado de las planchas 69 y 79 GEOTEC Ltda, 2003.

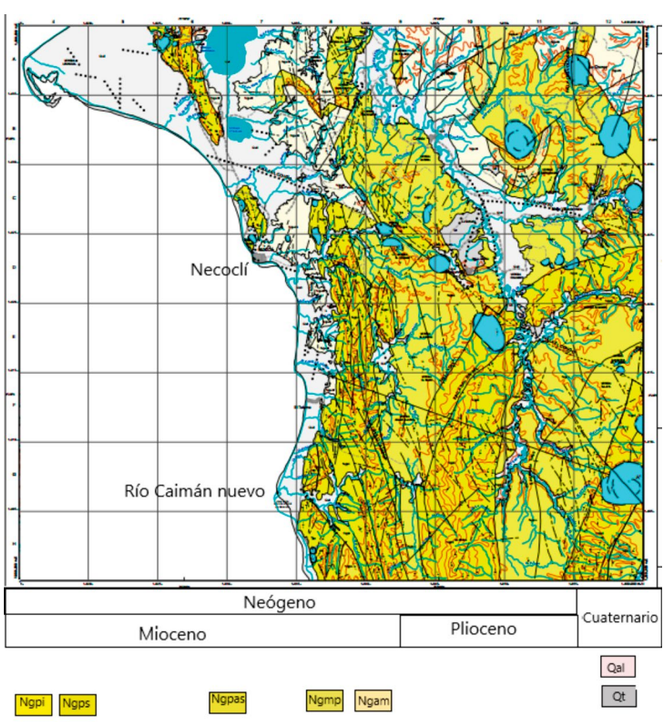


Figura 1.2.2 Unidades geológicas de la línea de costa desde río Caimán Nuevo a punta Arenas.

Fuente: modificado de las planchas 69 y 79 GEOTEC Ltda, 2003.

1.2.2 Geomorfología

El litoral protegido por el golfo de Urabá, desde Boca Tarena (costa oeste) hasta los límites con la vereda Cope (costa este), es una costa de inmersión o costa baja, con geoformas de deltas, lagunas estuarinas, planicies intermareales, espigas litorales, playas y cordones de playa. A partir de la vereda *Cope* y hasta el *Lechugal*, se encuentran acantilados modelados en rocas sedimentarias del neógeno, con baja litificación.

1.3 Metodología

1.3.1 Línea de costa con imágenes satelitales

Dada la poca resolución espacial de muchas imágenes satelitales y la ausencia de datos de campo que validen su información, se seleccionó una ventana temporal de 10±1 años para garantizar que los cambios observados correspondan realmente a cambios morfológicos y no a posibles errores atribuibles a la resolución de la imagen o a efectos de marea (si bien el régimen de mareas para el golfo de Urabá es micromareal, estos cambios podrían tener algún tipo de injerencia en el análisis de las diferentes imágenes).

Se seleccionó un conjunto de imágenes perteneciente a la familia de satélites LandSAT (1978, 1987, 1998, 2008 y 2016) con resolución espacial de 60 m para la imagen de 1978 y de 30 m para las otras imágenes. Adicionalmente se obtuvieron dos imágenes de la familia de satélites SENTINEL II (2016 y 2020) con una resolución espacial de 10 m por píxel.

Con las imágenes aéreas (2020 y 2021) del banco de datos de la Universidad de Antioquia, se validó y se calibró la información de línea de costa para la imagen SENTINEL II del 2020. Con esta nueva información se calibraron a su vez las imágenes del 2016 para los dos rangos del infrarrojo de la SENTINEL II y LandSAT. Con la imagen LandSAT del 2016 calibrada, se repitió el proceso de validación de información del resto de imágenes LandSAT (2008, 1998, 1987 y 1978). Para la calibración e identificación de las franjas marina y terrestre, se empleó el índice de agua normalizado (NDWI) lo cual permite diferenciar la zona de agua de la zona de superficie sin cobertura vegetal y de las zonas con cobertura vegetal.

La línea de costa para el litoral con playa y con ecosistemas de manglar (costas bajas) se definió en la línea de vegetación. En los sitios donde hay presencia de acantilados (costas altas), dicha línea se marcó en la base de los taludes. La línea de costa de los litorales bajos se definió con base en la premisa de que la vegetación suele ser mucho más estable en el tiempo, que la línea que marca la marea alta o baja.

Una vez delimitada la línea de costa en las imágenes (1978, 1987, 1998, 2008), se procedió a la comparación de sus trazos respectivos, con el fin de identificar las zonas con cambios morfológicos. Estos cambios reflejan pérdidas de terrenos y erosión litoral cuando la línea de costa se desplaza hacia tierra y, en el caso contrario, ganancias de terrenos y acreción/ progradación litoral, cuando la línea de costa avanza, en dirección al mar.

Finalmente, para delimitar una línea costa más completa del litoral antioqueño para el 2020, se seleccionaron imágenes con una ventana temporal muy próxima (aproximadamente un mes). Estas imágenes tienen poca cobertura nubosa y permitieron cubrir las áreas con deficiencias de información en otras imágenes.

1.3.2 Línea de costa a partir de información colectada en campo

Igual que en el monitoreo por medio de imágenes satelitales, la línea de costa se definió como la línea de vegetación. Para los sobrevuelos con el dron se delimitaron transectos con un eje longitudinal a la línea de costa y con un ancho de 250 m a cada lado de dicho eje, ya en campo se recorrió la línea de costa con presencia de playa y de acantilados litoral y se geo-referenciaron los transectos con el DGPS y puntos de control (en adelante PC) ubicados cada 500 m.

El conjunto de imágenes aéreas obtenidas se procesó y se ortorectificó con el programa PIX4D mapper para compararlas con las ortofotos de la base de datos del año 2009 usadas por Prüssmann (2012). En ambos conjuntos de ortofotos (2009 y 2021) se trazaron las líneas de costa para calcular el desplazamiento entre ellas, mediante el programa *DSAS: Digital Shoreline Analysis System* versión 5.0 (Himmelstoss y otros, 2018).

La diferencia entre ambas líneas de costa permite estimar el avance (progradación o acreción) o pérdida (retroceso o erosión) de las mismas. La estimación del área ganada o perdida y la cartografía final se hizo con ArcGIS.

1.4 Monitoreo con imágenes satelitales

1.4.1 Introducción

Las imágenes de sensores remotos son herramientas de gran utilidad para el estudio de los cambios geológicos, geomorfológicos, oceanográficos, de cobertura vegetal, etc. que ocurren en la superficie terrestre. Para el área de estudio de PIMECLA hay disponibles imágenes satelitales tomadas desde la década de 1970, y de fotografías aéreas pancromáticas tomadas desde 1930. Para estudios científicos de detalle, la información que puede obtenerse del procesamiento de estas imágenes requiere ser validada por verificaciones de campo y mediciones "*in situ*". Esta actividad busca aplicar el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas para determinar los cambios morfológicos del litoral antioqueño durante los últimos 40 años.

1.4.2 Resultados y análisis

El análisis de los cambios morfológicos en el litoral antioqueño hasta el año 2020 se realizó con base en el estudio de la primera imagen bien posicionada de la familia de satélites LandSAT (1978) (ver Figura 1.4.2). A pesar de que la resolución de esta imagen es baja, tan sólo de 60 m, pueden encontrarse en ellas rasgos morfológicos como la incipiente espiga litoral cerca de la cabecera municipal de Turbo. Esta espiga constituirá posteriormente a la punta Yarumal. (ver Figura 1.4.2).

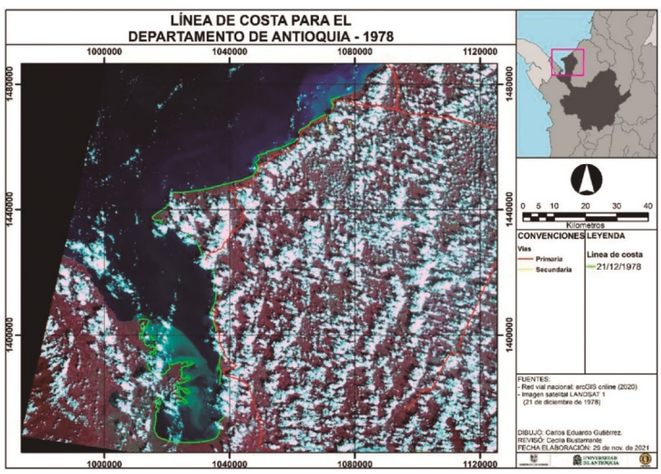


Figura 1.4.2. Litoral antioqueño en el año 1978.

Fuente: Diseño propio a partir de una imagen satelital LandSAT 1 del 21/12/1978 (2021).

Como se mencionó en la metodología, la línea del litoral 2020 (ver Figura 1.4.3) será la nueva base para establecer los cambios que han sucedido durante los últimos 40 años. Al comparar esta línea con sus predecesoras se evidencian fenómenos importantes de erosión en la zona de punta Rey (Arboletes), la parte SW de bahía Colombia y boca Tarena (brazo del río Atrato).

En la Figura 1.4.3 se identifican los cambios de la morfología de la línea de costa en los últimos 40 años y también puede estimarse la velocidad de dichos cambios. Se identifican procesos de acreción bastante notables en la zona del río León, en el brazo León del río Atrato y al oeste del brazo "El Roto" del mismo río (estas zonas presentan velocidades de acreción mayores de 8.0 m por año). En el litoral del municipio de Necoclí, concretamente en la ensenada o ciénaga de Rionegro, punta Caribana y playa Bobalito (zona de protección ecológica) se evidencia estabilidad litoral, incluso un ligero proceso de acreción durante estos últimos 40 años. En el área dónde se ubica la cabecera municipal de Necoclí, también es posible ver cómo los cambios morfológicos de la línea de costa son muy pequeños o

nulos, definiendo como resultado una zona muy estable (ver Figura 1.4.4).

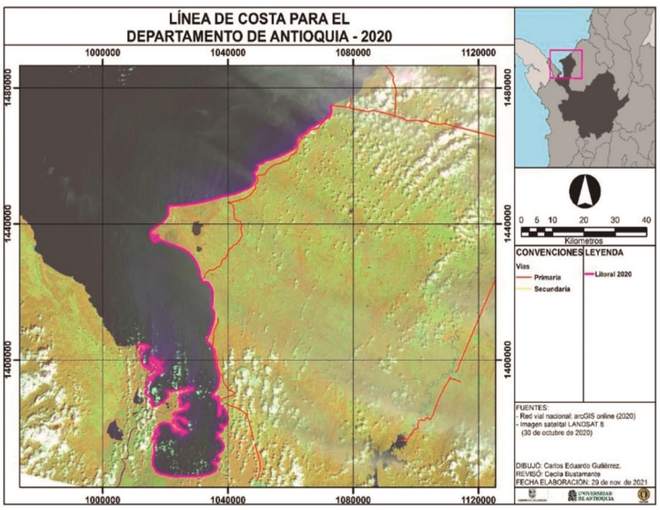


Figura 1.4.3. Litoral antioqueño en el año 2020.

Fuente: Diseño propio a partir de una imagen satelital SENTINEL 2 del 30/10/2020 (2021).

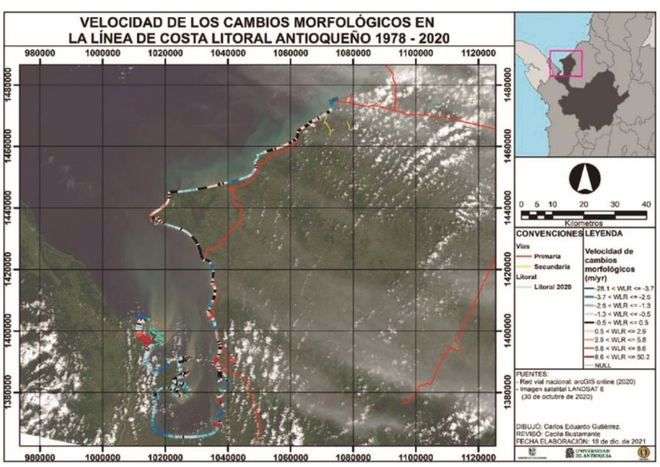


Figura 1.4.4. Estimación de la velocidad de los cambios morfológicos en la línea de costa del litoral antioqueño en el periodo 1978 – 2020.

Fuente: Diseño propio, 2021.

1.4.3 Conclusiones

- Los litorales son entornos muy dinámicos, caracterizados por cambios morfológicos importantes en el tiempo. El litoral antioqueño no es la excepción y presenta condiciones erosionables a lo largo de aproximadamente el 62% de su longitud. Para poder proponer soluciones adecuadas que mitiguen o reduzcan el retroceso de la línea de costa, estas condiciones deben seguirse monitoreando y analizando.

- Los procesos de acreción identificados se encuentran principalmente en las desembocaduras de los ríos que aportan cantidades importantes de sedimentos; caso de los ríos Atrato, León, Currulao, Turbo, Caimán Nuevo, Caimán Viejo y Bobal. Cabe resaltar la importante progradación sobre el golfo que se identifica en la desembocadura del río León, en el área de influencia del futuro Puerto Antioquia.

- Es importante controlar estos procesos de acreción puesto que pueden poner en riesgo la operación de la infraestructura portuaria.

1.5 Muestreos mediante trabajo en campo

1.5.1 Introducción

Se monitorearon las playas y acantilados del litoral interno del golfo de Urabá, desde la desembocadura del brazo *Tarena* (costado occidental del golfo), hasta la vereda El Lechugal, cerca de la Ciénaga de Rionegro (municipio de Necoclí), extremo NE del golfo (ver Figura 1.5.1).

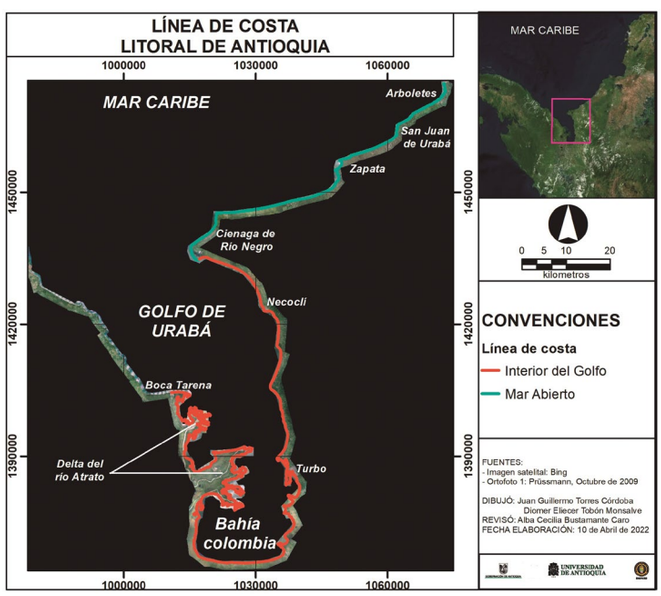


Figura 1.5.1 Litoral Antioqueño: en rojo, el litoral protegido por el interior del golfo de Urabá, en cian, el litoral sobre mar abierto.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Los círculos en la Figura 1.5.2 ubican a los sitios monitoreados; los demás sitios no se monitorearon por la dificultad para posicionar la base del DGPS. Algunos de los sitios son zonas militares y tienen acceso restringido.

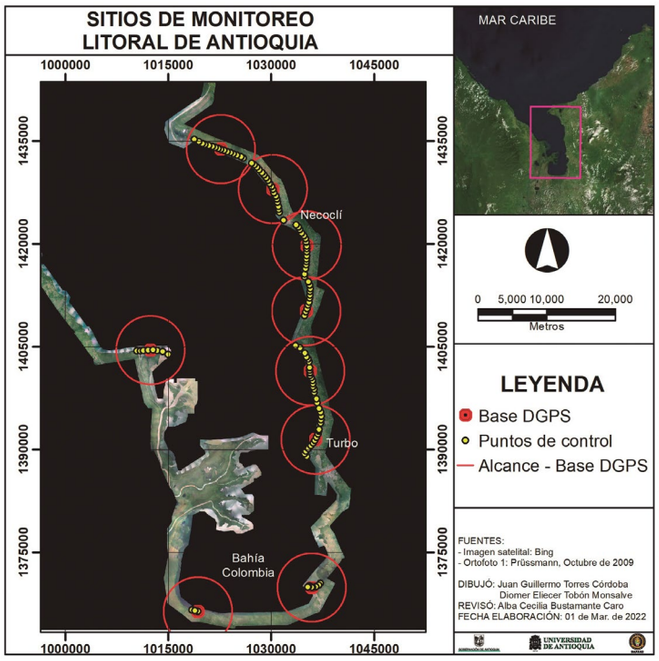


Figura 1.5.2 Puntos de control en el litoral de los municipios de Turbo y Necoclí.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

1.5.2 Resultados Turbo Sector boca Tarena – punta Yerbazal (vereda Bocas del Roto)

Franja de playa con orientación oeste – este con una longitud aproximada de 5.6 km desde boca Tarena a punta Yerbazal, en dirección Este. La Figura 1.5.3 muestra las líneas de costa de los años 2009 (rojo) y 2021 (cian) y los puntos de control (amarillo). El espacio entre las dos líneas es el desplazamiento entre el 2009 y el 2021. El área de playas perdida se estimó en aproximadamente 60.7 ha; el área ganada fue cerca de 5.2 ha, ubicada en la espiga de punta Yerbazal. El sector con mayor retroceso se ubica en la desembocadura del río con 238 m, mientras el mayor avance fue de 195 m en punta Yerbazal.

Desembocadura del río León y bahía aledaña (vereda Nueva Unión)

Este sector comprende la desembocadura del río León y la bahía formada en dirección NE de la margen derecha de la desembocadura. Se presenta una ganancia de línea de costa representada en un crecimiento de la desembocadura del río hacia el mar con una longitud de 913 m. y con una ganancia de área cercana a 28 ha, no hay erosión o retroceso de la línea de costa en la desembocdura; la bahía aledaña presentó una ganancia de cerca de 27.6 ha mientras que perdió 2.8 ha (Figura 1.5.4 y portada).

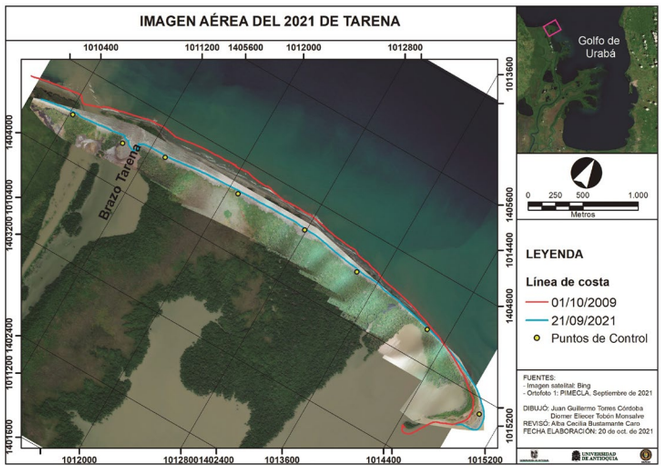


Figura 1.5.3 Línea de costa playa Tarena. En rojo y en azul, la posición de la línea de costa en el 2009 y en el 2021 respectivamente.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

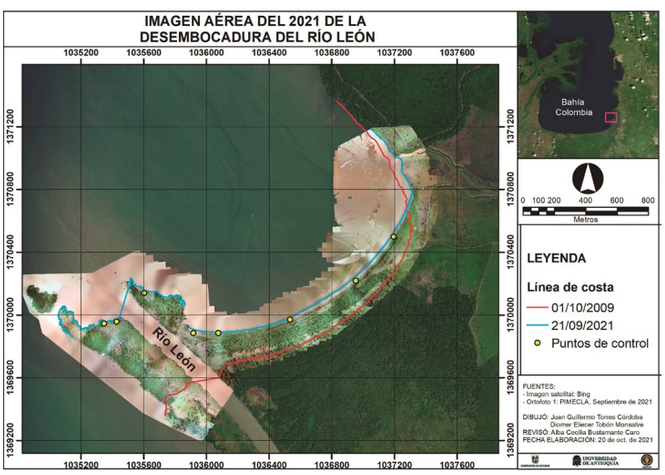


Figura 1.5.4 Línea de costa desembocadura de rio León y bahía aledaña.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Bahía Colombia: Sector entre el brazo Leoncito y el río Suriquí (vereda Leoncito)

Ubicado hacia el costado SW de bahía Colombia, con una línea de costa vegetada con ecosistema de manglar es un sector (al igual que playa Tarena) donde no hay población asentada y presenta tasas importantes de retroceso entre los años 2009 y 2021.

El retroceso de la línea de costa está entre 30 m a 94.5 m, con un área perdida de 15.1 ha (Figura 1.5.5).

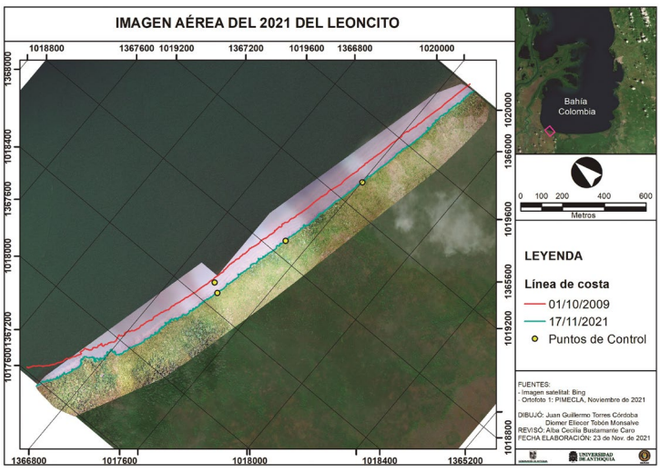


Figura 1.5.5 Línea de costa sector Leoncito – Río Suriquí.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Desembocadura del río Turbo (vereda Bocas del río Turbo)

El sector comprende desde la desembocadura del río Turbo hasta la espiga de punta Yarumal. No se registraron retrocesos, pero si hay avance de la línea de costa, con valores entre 67 m a 547.7 m, con un área ganada de 30ha (Figura 1.5.6).

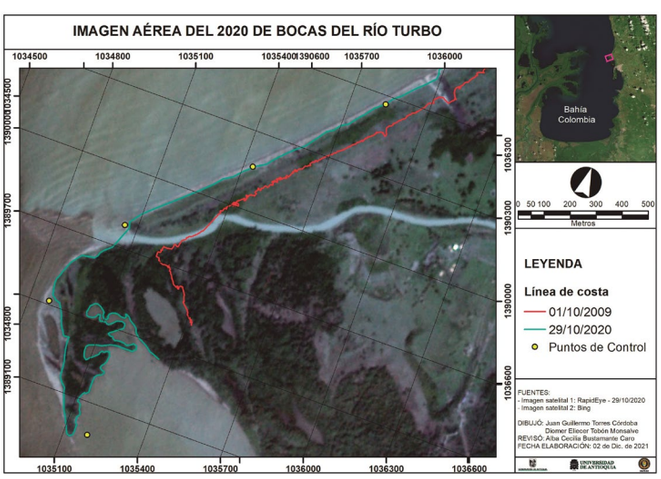


Figura 1.5.6 Línea de costa sector Leoncito – río Suriquí.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Sector Piedrecitas (vereda Piedrecitas)

Ubicado al norte de la desembocadura del río Turbo y hasta el sur del río Cope, este sector ha tenido un avance en la línea de costa entre los 75.3 m y los 91 m de longitud, y un área ganada de cerca de 12.6 ha (Figura 1.5.7).

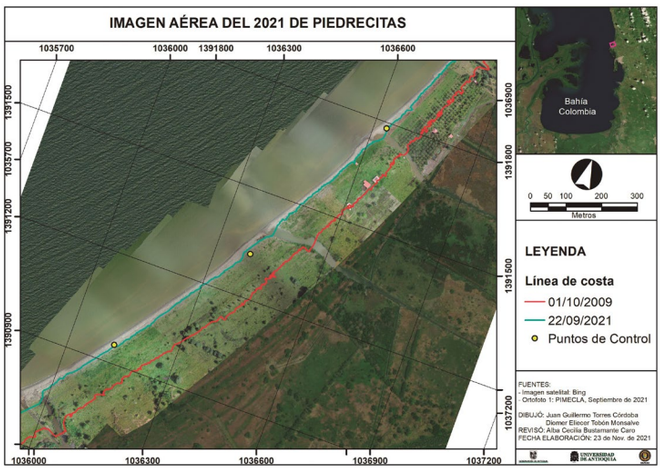


Figura 1.5.7 Línea de costa sector Piedrecitas.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Sectores: Cope, 27 de diciembre: sur-centro-norte, Bajo Cirilo, Tie (veredas: Cope, 27 de diciembre, Bajo Cirilo, Tie)

La geomorfología de línea de costa en las veredas Cope, 27 de diciembre, Bajo Cirilo y Tie se caracteriza por acantilados con escarpes casi verticales y alturas entre 0,5m a 1m, estos sectores presentan menores tasas de retroceso en su línea de costa que los sectores conformados por playas: playa Tarena, Alto Caimán, Leoncito- Suriquí y bahía del río León (Tabla 1.5.1). Las Figuras 1.5.8 a 1.5.13 ilustran los sectores mencionados.

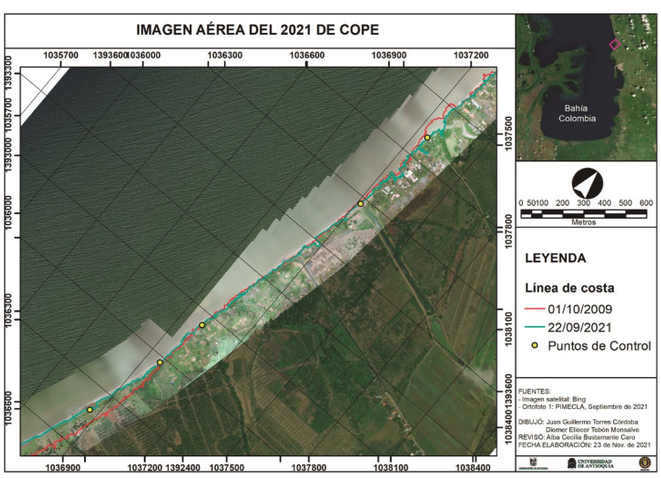


Figura 1.5.8 Línea de costa sector Cope.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

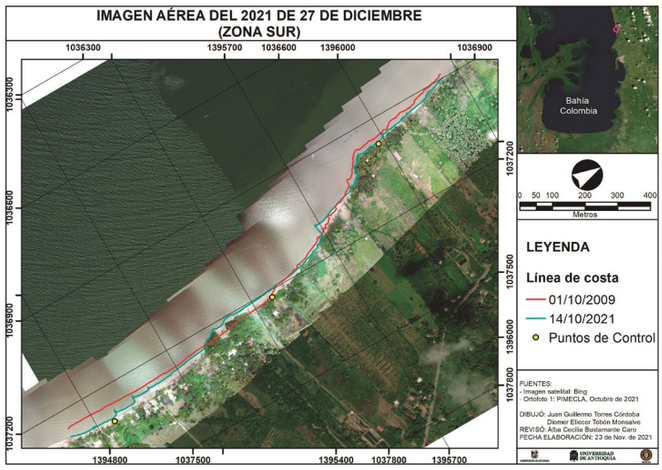


Figura 1.5.9 Línea de costa sector 27 de diciembre - sur.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

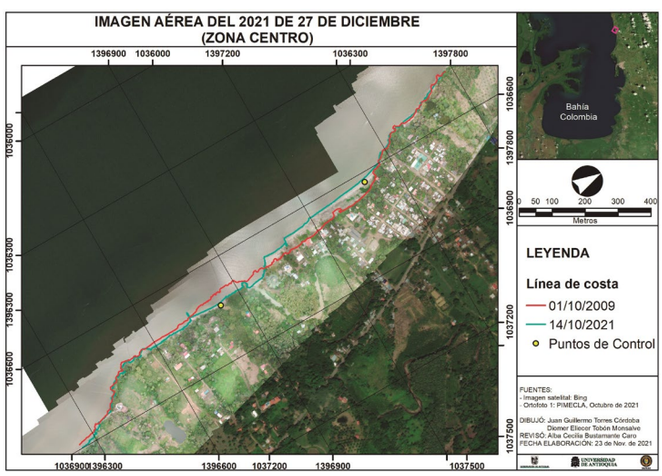


Figura 1.5.10 Línea de costa sector 27 de diciembre - centro.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

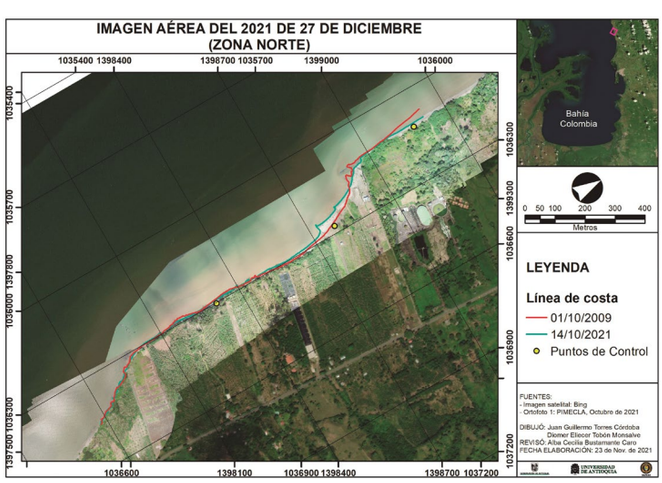


Figura 1.5.11 Línea de costa sector 27 de diciembre - norte.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

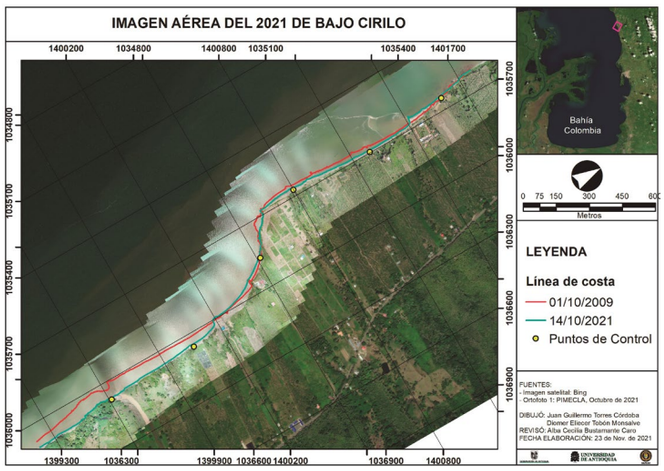


Figura 1.5.12 Línea de costa sector Bajo Cirilo.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

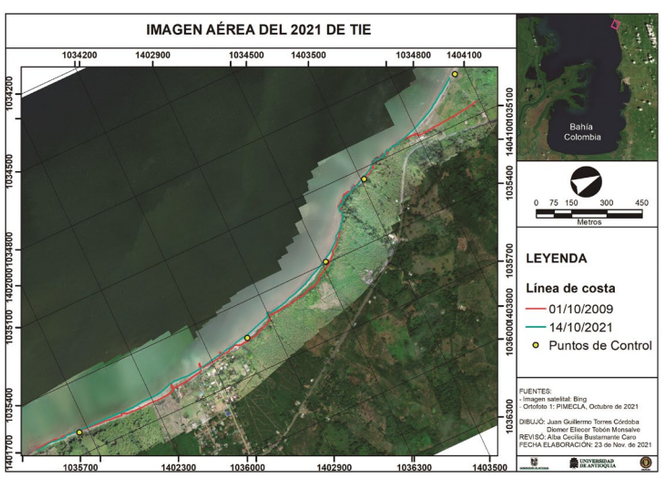


Figura 1.5.13 Línea de costa sector Tie.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Sector Alto Caimán

A lo largo de la línea de costa de Alto Caimán se evidencia tanto retrocesos como avances. Los avances han sido de entre 27 m y 203 m y son dominantes hacia el sur y el norte del sector. En su centro predomina la erosión, con retrocesos de la línea de costa entre 8.3 m a 149 m. El área ganada es 23.2 ha y el área perdida es 6.7 ha (Figura 1.5.14)

La tabla 1.5.1 resume los retrocesos y avances máximos de cada sector muestreado del litoral de Turbo.

La tabla 1.5.2 presenta las áreas perdidas y ganadas en cada sitio monitoreado, en el litoral de Turbo.

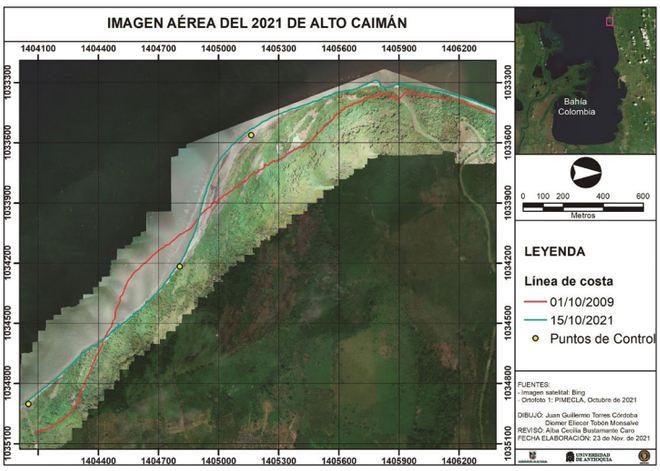


Figura 1.5.14 Línea de costa sector Alto Caimán.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

Sector	Retroceso máximo		Sector	Progradación máxima	
	m	km		m	km
Playa Tarena	238	0.238	Desembocadura río León	913.1	0.913
Alto Caimán	149.5	0.150	Bocas del río Turbo	547.7	0.547
Leoncito- Suriquí	94.7	0.095	Bahía río León	319.5	0.319
Bahía río León	79.6	0.080	Alto Caimán	203.4	0.203
Bajo Cirilo	67.3	0.067	Playa Tarena(espiga)	195.3	0.195
Cope	63.5	0.064	Tie	140.3	0.140
27 de diciembre_sur	41.6	0.042	Piedrecitas	91.6	0.092
27 de diciembre_centro	33.4	0.033	Cope	61.9	0.062
27 de diciembre_norte	22.1	0.022	27 de diciembre_centro	43.0	0.043
Tie	14.2	0.014	27 de diciembre_norte	35.7	0.036
Río León	0.0	0.000	27 de diciembre_sur	33.6	0.034
Bocas del río Turbo	0.0	0.000	Bajo Cirilo	27.2	0.027
Piedrecitas	0.0	0.000	Leoncito- Suriquí	0.0	0.000
Total	804.0	0.805	**Total**	2612.3	2.6

Tabla 1.5.1 Movimiento neto de línea de costa entre los años 2009 – 2021, en los tramos monitoreados en el municipio de Turbo; los valores se presentan ordenados de mayor a menor.

Fuente: Datos del monitoreo 2021.

Sector	Erosión		Sector	Acreción	
	km^2	ha		km^2	ha
Tarena	0.61	60.7	desembocadura río León	0.283	28.3
Leoncito - Suriquí	0.15	15.1	Río León bahía	0.276	27.6
Alto Caimán	0.07	6.7	Bocas río Turbo	0.297	29.7
Bajo Cirilo	0.06	6.0	Alto Caimán	0.232	23.2
Cope	0.017	1.7	Piedrecitas	0.126	12.6
Río León bahía	0.03	2.8	Tarena	0.052	5.2
27 de diciembre sur	0.02	1.9	Tie	0.049	4.9
27 de diciembre centro	0.01	1.0	Cope	0.041	4.1
27 de diciembre norte	0.01	0.5	27 de diciembre centro	0.016	1.6
Tie	0.002	0.2	27 de diciembre sur	0.007	0.7
Río León desembocadura	0.00	0.00	Bajo Cirilo	0.007	0.7
Bocas río Turbo	0.00	0.0	27 de diciembre norte	0.006	0.6
Piedrecitas	0.00	0.0	Leoncito - Suriquí	0.000	0.0
Área total	0.979	97.9	**Área total**	1.39	139.2

Tabla 1.5.2 Áreas perdidas y ganadas para los sitios de monitoreo, litoral de Turbo.

Fuente: Datos del monitoreo 2021.

Necoclí

Sectores Caimán Nuevo, la Ceibita, el Totumo, Caimán Viejo, Casa Blanca, Virgen del Cobre, Casco urbano de Necoclí, San Sebastián, río Necoclí, El Caballo y el Lechugal

El municipio de Necoclí presenta un tramo de línea de costa protegida por el GU que comienza desde Caimán Nuevo en límite con el Distrito de Turbo y que llega hasta punta Arenas en el costado este del golfo, a partir de allí y hasta el límite con el municipio de San Juan de Urabá la línea de costa está sobre mar abierto el extremo NE del golfo.

La geomorfología que predomina es acantilada, con alturas entre los 50 cm y los 4m. Se presentan algunas franjas largas y estrechas de playa, descubiertas en marea baja. Los acantilados le han dado más estabilidad a la línea de costa y los retrocesos y avances son menores que los identificados en la línea de costa modelada en las playas del municipio de Turbo.

Los sitios con mayor progradación se ubican cerca de las desembocaduras de los ríos (Figuras 1.5.15 a 1.5.26).

El monitoreo de la línea de costa de Necoclí se hizo en el 2022.

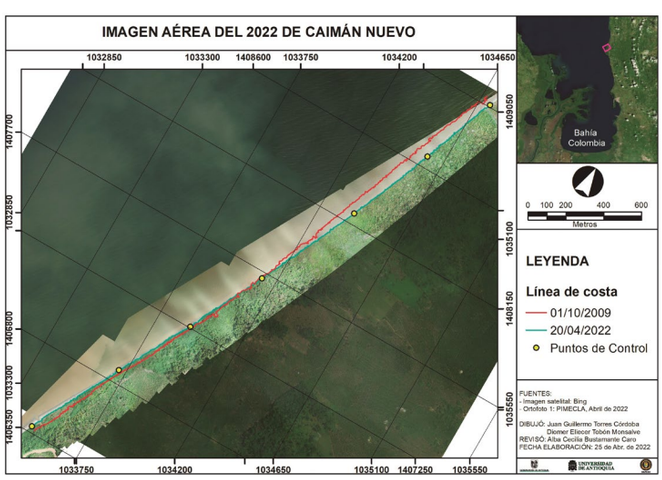


Figura 1.5.15 Línea de costa sector Caimán Nuevo.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

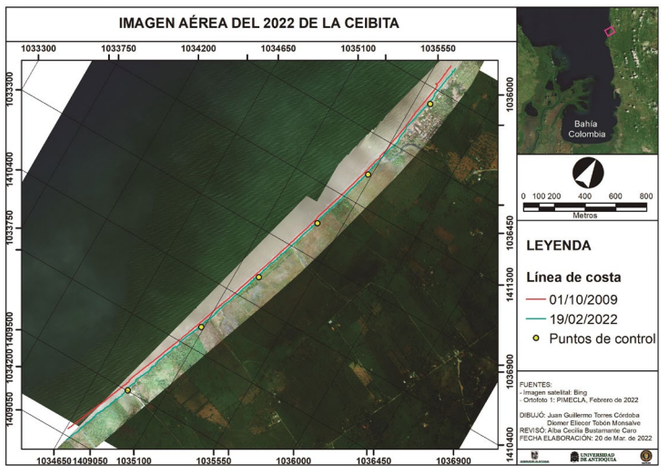


Figura 1.5.16 Línea de costa sector La Ceibita.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

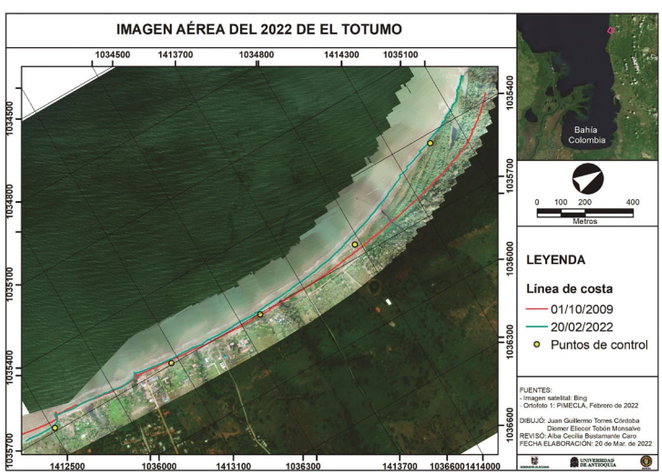


Figura 1.5.17 Línea de costa sector El Totumo.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

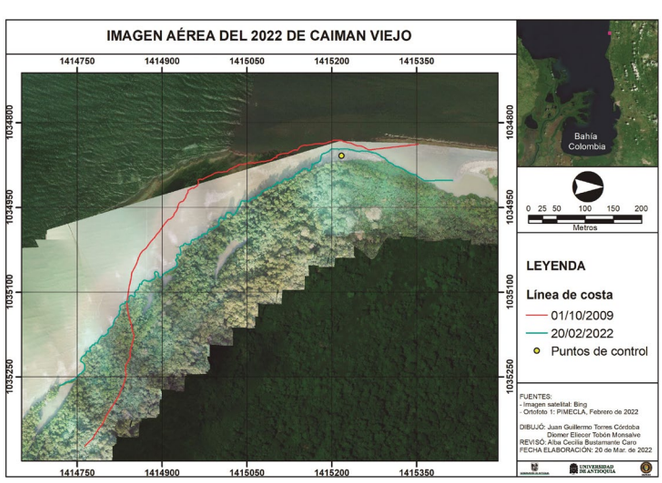


Figura 1.5.18 Línea de costa sector Caimán Viejo.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

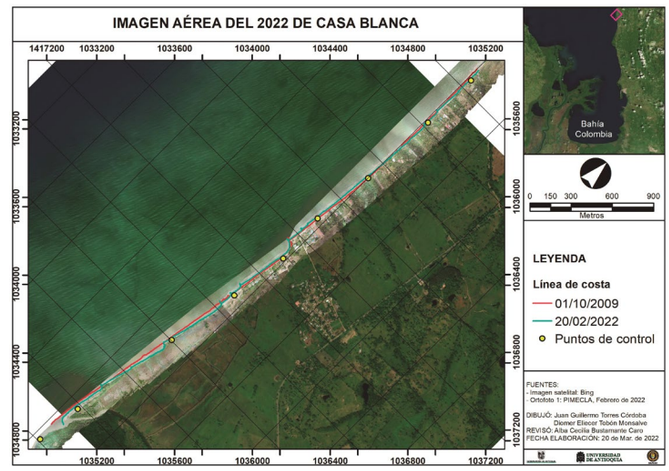


Figura 1.5.19 Línea de costa sector Casa Blanca.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

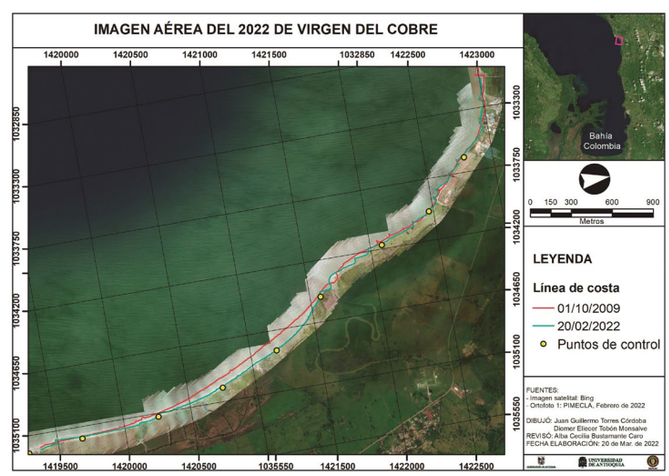


Figura 1.5.20 Línea de costa sector Virgen del cobre.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

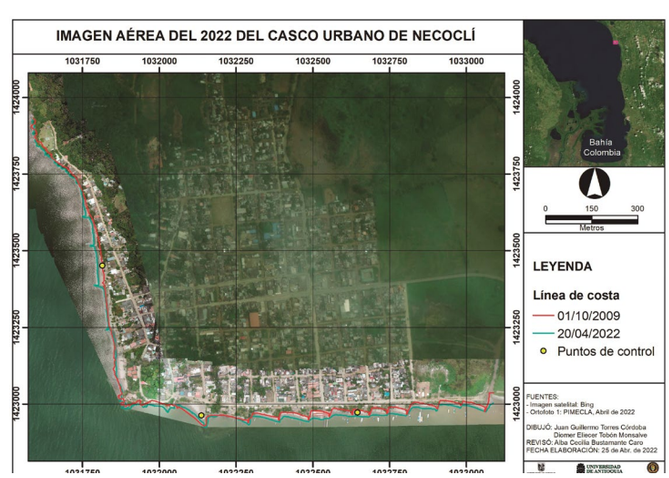


Figura 1.5.21 Línea de costa del casco urbano de Necoclí.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

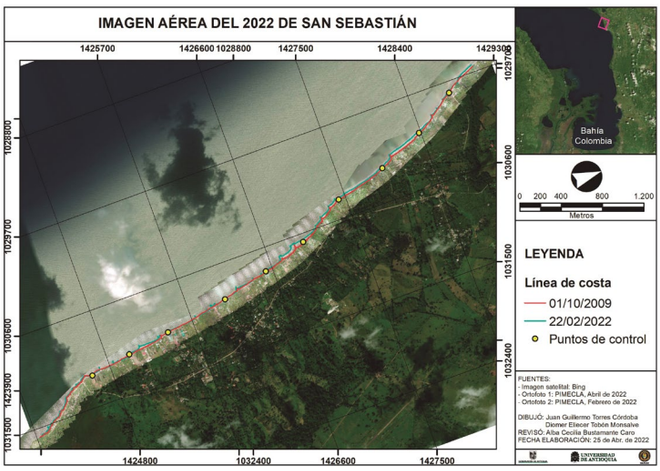


Figura 1.5.22 Línea de costa sector San Sebastián.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

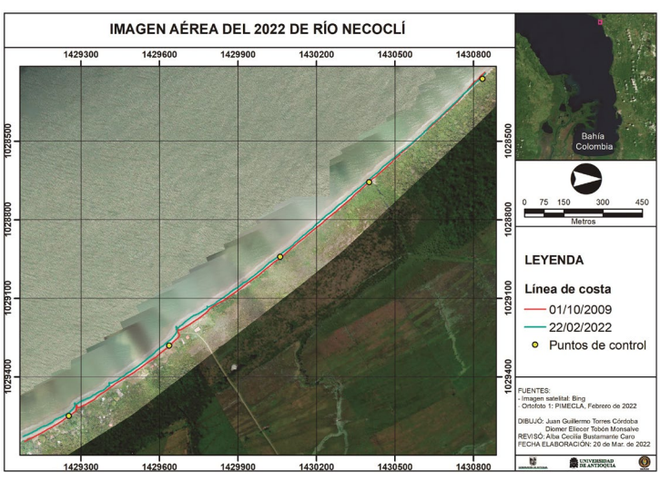


Figura 1.5.23 Línea de costa sector río Necoclí.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

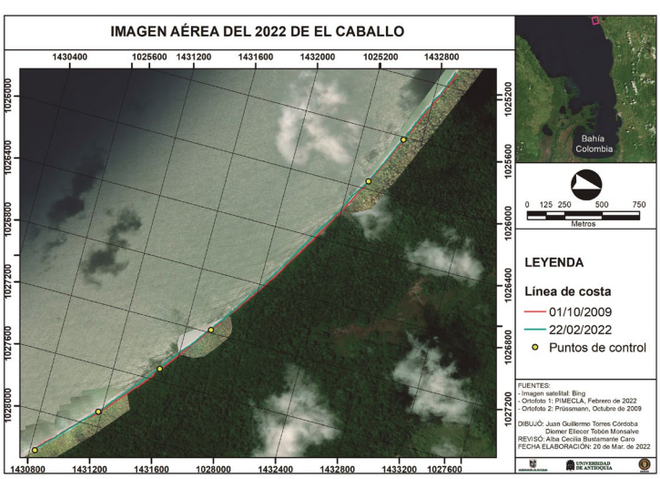


Figura 1.5.24 Línea de costa sector El Caballo.

Fuente: Imagen satelital Bing del 2020 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

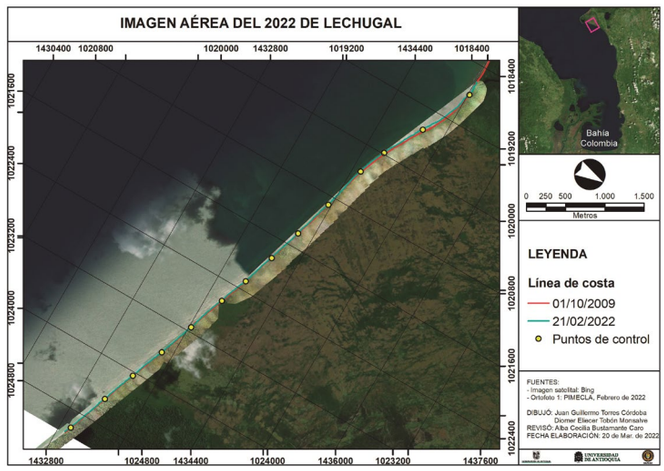


Figura 1.5.25 Línea de costa sector El Lechugal.

Fuente: Imagen satelital Bing del 20202 y ortofoto del 2009; Dibujó: J. Torres y D. Tobón.

La tabla 1.5.3 resume los retrocesos y avances de la línea de costa del litoral de Necoclí y la tabla 1.5.4 presenta las áreas perdidas y ganadas en cada sector.

Sector	Retroceso (m)		Sector	Progradación (m)	
	Máximo	Mínimo		Máxima	Mínima
Caimán Nuevo	64.5	2.6	Caimán Nuevo	38.6	7.7
La Ceibita	45.0	2.9	La Ceibita	7.6	3.0
El Totumo	16.6	1.8	El Totumo	132.1	13.1
Caimán Viejo	34.5	4.5	Caimán Viejo	115.6	10.5
Casa Blanca	31.1	1.7	Casa Blanca	27.6	4.1
Virgen del Cobre	71.9	6.2	Virgen del Cobre	37.5	4.7
Casco Urbano de Necoclí	22.3	0.1	Casco Urbano de Necoclí	33.0	5.3
San Sebastián	7.4	1.4	San Sebastián	52.8	4.6
Río Necoclí	2.8	0.1	Río Necoclí	24.0	2.5
El Caballo	5.4	0.3	El Caballo	19.7	2.1
Lechugal	9.9	1.2	Lechugal	33.3	3.1
Longitud total	311.4	22.8	**Longitud total**	521.8	60.7

Tabla 1.5.3 Retrocesos y avances de línea de costa de Necoclí.

Fuente: Datos del monitoreo 2022.

Sector	Erosión		Sector	Acreción	
	km²	ha		km²	ha
Caimán Nuevo	0,06	6,6	Caimán Nuevo	0,02	2,5
La Ceibita	0,059	5,9	La Ceibita	0,001	0,15
El Totumo	0,004	0,4	El Totumo	0,09	9,1
Caimán Viejo	0,003	0,34	Caimán Viejo	0,049	4,9
Casa Blanca	0,038	3,8	Casa Blanca	0,009	0,9
Virgen del Cobre	0,09	8,9	Virgen del Cobre	0,004	0,44
Casco urbano de Necoclí	0,004	0,36	Casco urbano de Necoclí	0,02	2,5
San Sebastián	0,003	0,3	San Sebastián	0,06	6,9
Río Necoclí	0,0002	0,024	Río Necoclí	0,018	1,8
El Caballo	0,001	0,14	El Caballo	0,024	2,4
El Lechugal	0,004	0,4	El Lechugal	0,053	5,3
Área total	0,272	27,2	**Área total**	0,394	39,4

Tabla 1.5.4 Áreas ganadas y perdidas en el litoral de Necoclí.

Fuente: Datos del monitoreo 2022.

1.5.3 Conclusiones

Los sitios con mayor retroceso en la línea de costa se encuentran en el litoral del municipio de Turbo: playa Tarena (238 m), Alto Caimán (149 m), Leoncito - Suriquí (95 m) y en la bahía aledaña al río León (79.6

m); corresponden a geoformas típicas de costas bajas caracterizadas por playas y planicies intermareales, sitios de depósito donde los sedimentos están sin consolidar.

En el litoral de Necoclí, el mayor retroceso en la línea de costa se define en el sector de la Virgen del Cobre (71.9 m); seguido de Caimán Nuevo (64.5 m).

La línea de costa con mayor avance igualmente se ubica en el litoral del municipio de Turbo: desembocadura del río León (913 m), bocas del río Turbo (548 m), bahía rio León (319.5), Alto Caimán (203m), punta Yerbazal en Tarena (195 m), Tie (140 m). En los demás sitios se identifican avances menores a los 100 m de longitud. En el litoral de Necoclí la línea de costa con mayor avance se encuentra en El Totumo (132 m) y en Caimán Viejo (116 m). Igualmente, las mayores pérdidas de área están en el litoral de Turbo. Las líneas de costa definidas sobre playas, planicies intermareales, espigas y cordones de playa son las que presentaron mayores desplazamientos y cambios entre 2009 y 2021. Las líneas de costa sobre cuya morfología es relieve costero (acantilados) en el costado este del golfo tuvieron los menores cambios morfológicos

1.6 Referencias

Bernal, G., Montoya, L., Garizábal, C., & Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del golfo de Urabá. *Gestión y Ambiente*, *8* (1), 123-135.

Blanco, J. (2013). exploración del golfo de Urabá 2007-2013, Crónicas de la expedición Antioquia. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/272166317_Exploracion_del_Golfo_de_Uraba_2007-013_Cronicas_de_la_Expedicion_Antioquia.

Correa, I., & Vernette, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en el litoral del golfo de Urabá (Sector Arboletes - Turbo). Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marino Costeras, 33*, 7-28.

Correa, I., Prüssmann, J., & Garrido, A. (2016). Geomorfología del contorno litoral Urabá-Darién, departamentos de Antioquia y Chocó, Caribe colombiano. En J. Blanco-Libreros, & M. Londoño-Mesa (Edits.), Expedición Caribe Sur. Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Oceáno (págs. 47-71).

Franco, J. (1992). Geomorfología y aspectos erosivos del litoral caribe colombiano: sector punta Caribana. Boca Tarena (Río Atrato). Cartagena: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS).

García- Valencia (Ed). (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar- y Gobernación de Antioquia. *Serie de publicaciones especiales de Invemar Nº 12*. Santa Marta. 180 p.

GEOTEC Ltda. (2003). Geología de las planchas 69 Necoclí y 79 Turbo. Escala 1:100.000. Bogotá: Ingeominas.

Gómez, D. (2021). Evaluación paisajística de las playas en la Unidad Ambiental Costera (UAC) Urabá-Darién con el método CSES, mediante el diseño del ejecutable DproLitore en AppDesigner de MATLAB. Tesis de pregrado en Ingeniería Ocenográfica. Universidad de Antioquia

Leal, J. (2017). Lineamientos Prioritarios para la Formulación de un Ordenamiento Pesquero del Golfo de Urabá - LOPEGU. (Informe Técnico). Turbo, Colombia: Universidad de Antioquia - Gobernación de Antioquia.

Paniagua, J. (2013). Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar. Recuperado el 20 de julio de 2021, de https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/1266

Posada, B., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR.

Prüssmann, J. (2012). Nuevos elementos para el manejo Integrado de la región de Urabá, costa Caribe colombiana. Base de datos espacial geomorfológica de la franja litoral de los departamentos de Antioquia y Chocó. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT. Medellín.

Urrego, L., Molina, E., Suárez, J., Ruíz, H., & Polanía, J. (2016). Distribución, composición y estructura de los manglares del golfo de Urabá. Expedición Caribe Sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Oceáno. Bogotá: Blanco Libreros, J. F. & Londoño-Mesa (eds.).

Velásquez, C., & Rave, J. (1996). Dinámica costera y geomorfología en el golfo de Urabá Antioqueño. Sector Boca Tarena – Espiga de Turbo. Trabajo de grado, Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. 136 p.



CAPÍTULO

2°

Laboratorio Costero

PIMECLA
Programa Integral para el Monitoreo
y Mitigación de la Erosión Costera
en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 2º

Laboratorio Costero

Autores:
Juan Guillermo Torres Córdoba.
Carmen Isabel Aldana Benavides.
Luis Alfredo García Oquendo.
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera.
Isabel Cristina López Genes.
David Santiago Toro Valencia.
Alfredo Jaramillo Vélez.
Carlos Alberto Palacio Tobón.
Vladimir G. Toro Valencia.

2.1 Introducción

Los estudios sobre los 512 km de longitud del litoral antioqueño han identificado varios sectores con fuertes tendencias históricas erosionales, evidenciadas, entre otros aspectos, por retrocesos rápidos y continuos de la línea de costa, que han alcanzado hasta 100 metros en los puntos más críticos. Estos eventos han afectado seriamente a las comunidades de los cuatro municipios costeros del departamento de Antioquia (Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes), lo que motivó al Departamento Administrativo de Gestión de Riesgo de Antioquia (DAGRAN) y a la Universidad de Antioquia, a implementar el Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA). El objetivo principal de PIMECLA es originar conocimientos científicos sobre las causas y posibles medidas de control y mitigación de la erosión costera por medio de una estrategia de trabajo conjunta y coordinada, que vincule a toda la comunidad. Como parte de esa estrategia, PIMECLA creó el Laboratorio Costero de la Universidad de Antioquia, diseñado para el estudio de temas marino-costeros y también para facilitar a estudiantes, profesores, y demás interesados, la obtención de los conocimientos necesarios para controlar/mitigar acertadamente las pérdidas de terrenos litorales. El Laboratorio se ubica sobre terrenos de la Universidad en el municipio de Arboletes (Figura 2.1.1 y Figura 2.1.2)

El principal objetivo de este capítulo es exponer las intervenciones que se han llevado a cabo dentro del lote de la Universidad de Antioquia, en pro de adecuar su infraestructura física y administrativa para constituir el Laboratorio Costero y obtener un espacio adecuado para la investigación.

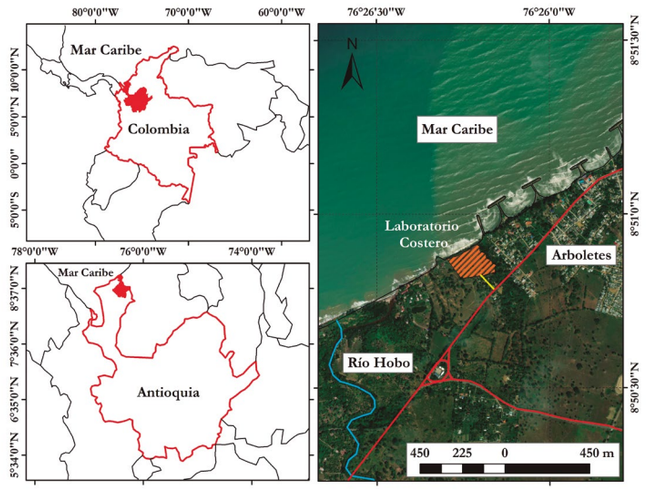


Figura 2.1.1 Ubicación del Laboratorio Costero.

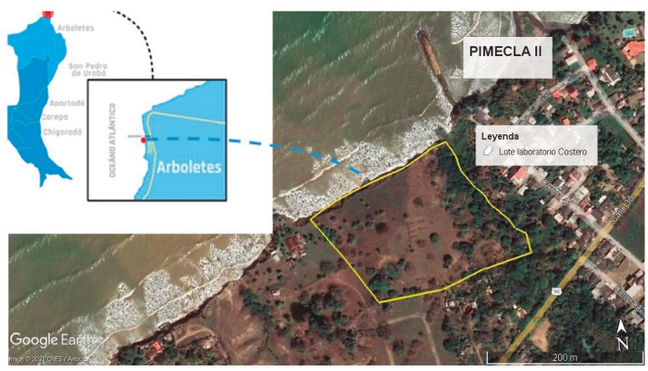


Figura 2.1.2 Ubicación del predio en el municipio de Arboletes.

Fuente: Google Earth; imagen obtenida el día 24 de octubre de 2021.

2.2 Características generales

2.2.1 Metodología

El límite noroeste del Laboratorio Costero es el mar Caribe, con un límite tierra-mar constituido por un talud acantilado cuasi vertical (entre 70° y 80° de inclinación) y de ocho a diez metros de altura (Figura 2.2.1). Este acantilado recibe en su base la incidencia directa del oleaje reflejada por fenómenos de socavación en su base y seguidos por movimientos de masa de la parte superior (coincidentes comúnmente con las precipitaciones). En su conjunto, el talud acantilado presentaba tasas de erosión anuales estimadas entre 0.5 a 1m (la condición inicial es un terreno despejado, donde no se han realizado actividades de ningún tipo).

La primera intervención se realizó a lo largo de 100 metros del frente de playa, y consistió en disminuir la pendiente del talud, definiendo ángulos de 15° en su parte inferior y de 35° en su perfil medio y superior

(Figura 2.2.2). Con estos nuevos perfiles se buscó estabilizar el talud y evitar las pérdidas de terrenos y retrocesos recientes. La configuración y corte del nuevo talud se realizó mediante su intervención con máquina retroexcavadora (Figura 2.2.3); el material sobrante de la explanación se dispuso en el lote y en lugares cercanos a la zona de intervención, evitando la caída de material sobre el mar. El resultado final de este corte se puede observar en la Figura 2.2.4.

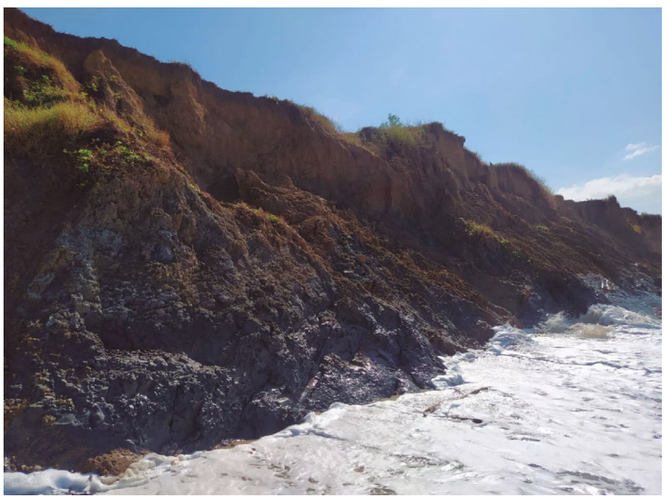


Figura 2.2.1 Talud característico de la línea de costa del Laboratorio Costero.

Fotografía: Isabel López, 2020.

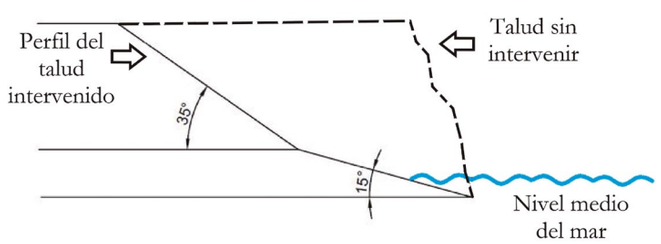


Figura 2.2.2 Representación gráfica del corte del talud.

Ilustración: Isabel López, 2022.



Figura 2.2.4 Resultado final del corte del talud.

Fotografía: Isabel López, 2022.



Figura 2.2.3 Intervención de retroexcavadora.

Fotografía: Isabel López, 2022.

Como complemento al corte del talud, se construyó sobre la superficie del terreno un filtro de aguas, adecuado para captar la escorrentía de aguas lluvias, impedir su percolación e ingreso al nuevo talud, y evitar la formación de surcos y cárcavas, reconocidos como aspectos claves de la erosión de los taludes del litoral antioqueño (Figura 2.2.5). Este filtro tiene su salida por un extremo del talud y no representa en sí mismo peligro de erosión, sin embargo, las gotas de lluvia que caían sobre la pendiente de 35° estaban induciendo la formación de surcos, razón por la cual se disminuyó su impacto directo por medio de la disposición de una capa de material vegetal (*Brachiaria decumbens*). Se formó así una capa de protección y amarre del talud con las raíces en crecimiento (Figura 2.2.6). En la Figura 2.2.7, puede observarse que una parte del talud no fue protegida con el material vegetal (esta área se omitió debido a que allí se practicaron otro tipo de experimentos que serán descritos en el capítulo 4 de este libro inciso 4.4 Soluciones basadas en la naturaleza).



Figura 2.2.5 Construcción del filtro.
Fotografía: Isabel López, 2022.



Figura 2.2.6 Pendiente de 35° protegida con material vegetal.
Fotografía: Isabel López, 2022.



Figura 2.2.7 Área no protegida con material vegetal.
Fotografía: Juan Torres, 2022.

La implementación física del Laboratorio Costero incluyó la instalación de un contenedor, adecuado para labores de oficina y para procesar y analizar las variables de los experimentos realizados (Figura 2.2.8), la construcción del portón de ingreso y la definición de los linderos y zonas de parqueo.



Figura 2.2.8 Contenedor instalado para funcionamiento de oficina.
Fotografía: Isabel López, 2022.

Además, se cumplió un plan de manejo ambiental y poda de zonas verdes, para permitir el libre desplazamiento de las personas encargadas de los monitoreos del proyecto y de los visitantes (Figura 2.2.9); también se sembró un seto vivo, abonado con material de un productor de composta construido en el Laboratorio.



Figura 2.2.9 Manejo de zonas verdes en el Laboratorio Costero.
Fotografía: Isabel López, 2022.

2.2.2 Resultados

La intervención en el talud de la línea de costa del Laboratorio Costero ha mostrado ser exitosa, el tramo intervenido presenta actualmente una estabilidad notable, que contrasta con las altas tasas de erosión que afectan a taludes acantilados cercanos, no intervenidos. Es evidente que este método de estabilización de taludes ofrece aspectos interesantes para el control/mitigación de la erosión de sectores similares. Se ha cumplido un gran avance en la adecuación de la infraestructura física y administrativa del Laboratorio Costero; todas las intervenciones han contribuido a mejorar las condiciones laborales del lugar, y se sigue trabajando en pro de construir un espacio agradable para recibir a los visitantes.

2.3 Características topobatimétricas

2.3.1 Metodología

El levantamiento topobatimétrico de la zona del Laboratorio Costero y sectores adyacentes es la base indispensable para los análisis de futuros desarrollos, de experimentos y de modelaciones en el área, caracterizada por su morfología particular de terraza marina emergida, acantilados y muy posibles influencias tectónicas.

En esencia, el levantamiento se realizó en dos fases: una primera se centró en la topografía e incluyó la zona emergida y su transición hacia el mar, hasta aproximadamente los 0.6 m de profundidad; la segunda fase correspondió al levantamiento batimétrico propiamente dicho, e incluyó la plataforma marina somera (la zona con profundidades desde 1 m hasta 5 m). La cobertura se extendió hacia el sur del Laboratorio, hasta la desembocadura del río Hobo.

El levantamiento topográfico utilizó un *Sistema de Posicionamiento Global Diferencial* (DGPS) y aplicó la metodología de nube de puntos para toda el área del Laboratorio Costero (ver Figura 2.3.1). Debido a la morfología plana de este sector no se privilegió ninguna zona, exceptuando su costado noroccidental (NW), en el cual se ubica el talud reconformado (por esta razón en ese sector se encuentra una mayor concentración de puntos). Como información adicional, los puntos topográficos fueron clasificados según sus atributos físicos y correspondencia a vegetación arbórea, talud, playa, infraestructura, punto de control, río, o cárcavas.

El levantamiento batimétrico se realizó con un ecosonda monohaz con una frecuencia de 200 kHz para obtener la profundidad, y con un DGPS, para obtener la posición en el plano horizontal. La metodología empleada para este levantamiento se diseñó a partir de líneas hidrográficas con separaciones de 20m, en dirección perpendicular a la línea de costa al frente de la zona de estudio. Hacia el NE se trazó una línea adicional a una distancia de 50m y, en dirección SW se realizaron siete líneas adicionales, las primeras cuatro espaciadas a 50m y las últimas tres espaciadas a 100m (con la intención de que el levantamiento cubriera toda la zona desde el Laboratorio Costero hasta la desembocadura del río Hobo). Para todas las líneas hidrográficas se plantearon longitudes de 1 km a partir de la línea de costa, o se extendieron hasta la profundidad de 5 m sobre la plataforma somera. Posteriormente, estos dos conjuntos de datos se fusionaron en un solo grupo, con el fin de crear un *Modelo de Elevación Digital* (DEM) y el correspondiente mapa de pendientes.

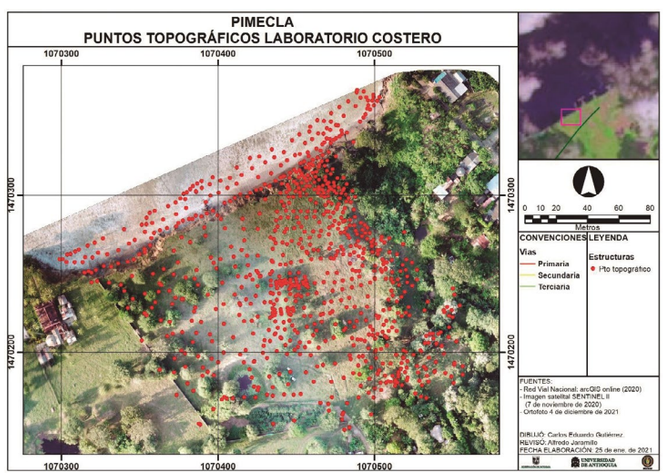


Figura 2.3.1 Distribución espacial de los puntos geográficos en el Laboratorio Costero.

Fuente: Diseño propio, 2020.

2.3.2 Resultados y análisis

El levantamiento topobatimétrico define un terreno con una zona emergida aterrazada, con una altura media de 10msnm (ver Figura 2.3.2). En esta superficie se presentan muy pocos cambios altimétricos, exceptuando su costado noroccidental (NW), donde hay pendientes fuertes con cobertura boscosa abundante.

En la zona de transición de la cima de la terraza a la zona de playa se presentaba antes del año 2021 un acantilado con pendientes cercanas a los 90°. Sin embargo, a principios del año 2021, esta ladera fue intervenida para generar un talud compuesto, con una pendiente mixta, de 35° en su zona media-superior, y de 15° en su base y parte inferior (hasta la zona de rompiente), como se explico antes.

En la zona sumergida, se presenta un cambio moderado de pendiente hasta los primeros 10 m aguas adentro (en el plano horizontal) con valores

que oscilan entre 3% - 7% después de este punto se puede encontrar un terreno con pocos cambios de cota, alcanzando apenas 2 m de profundidad en apenas los primeros 75 m de distancia costa afuera, y 3 m cerca de los 900 m de distancia de la costa lo que significa menos de 1% de pendiente.

El mapa de pendientes que se representa en la Figura 2.3.3 es un producto agregado del DEM y contiene información complementaria a la incluida en el mapa topográfico. De igual manera, para la zona emergida en la parte superior de la terraza, se evidencia un terreno con una pendiente plana y algunas zonas con pendientes suaves (pendientes hasta el 7%).

En la zona sumergida se presenta una rápida variación de pendientes, que van desde el tipo montañoso, hasta pendientes suaves del orden de 3%. Después de finalizar esta fase de transición se encuentra una superficie con pendientes inferiores al 3%, dando como resultado una zona con denominación plano en toda la extensión del área levantada.

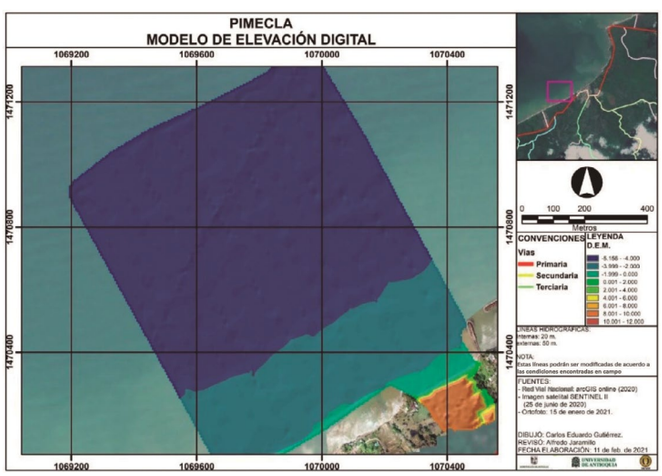


Figura 2.3.2 Modelo de elevación digital.

Fuente: Diseño propio, 2021.

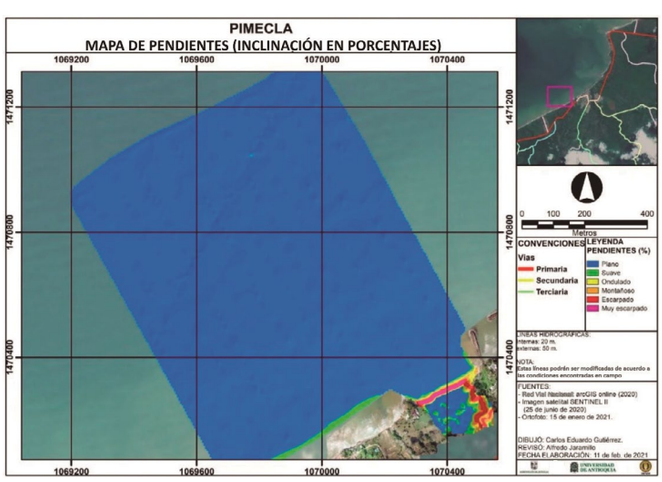


Figura 2.3.3 Mapa de pendientes de la zona de estudio.

Fuente: Diseño propio, 2021.

2.3.3 Conclusiones

Como conclusiones, se tienen: - La zona emergida se caracteriza por una terraza con una altura media de 10 m sobre el nivel medio del mar, la cual se presenta como una superficie con pendientes de tipo plano. - La zona sumergida presentó una superficie plana en toda su extensión, probablemente como resultado de los sedimentos transportados por el río Hobo, el cual se encuentra al SW de la zona de estudio principal.

2.4 Características geotécnicas

2.4.1 Metodología

El desarrollo del componente geotécnico del Laboratorio Costero se realizó en cuatro etapas: la primera comprendió el análisis de la información existente de la zona (geológica, geotecnia y de ingeniería en general); la segunda correspondió a una exploración de campo para reconocer la zona de estudio con las condiciones de frontera (estas consisten en aquellos aspectos y condiciones en el contorno de los taludes que pueden verse afectados ante los movimientos de masa) y realizar sondeos exploratorios (ver Figura 2.4.1).

Dichos sondeos se ejecutaron por medio del ensayo de penetración estándar (SPT).

La norma INV E-111-13 establece que este método de ensayo consiste en hincar en el frente de avance de la perforación un muestreador de cuchara partida, para obtener muestras alteradas representativas del suelo. Deben contarse los golpes requeridos para lograr tres avances de 15 centímetros, utilizando una masa de 70 kilogramos, desde una altura de aproximadamente 76 centímetros.

En la tercera etapa se ejecutaron ensayos de laboratorio de las muestras recolectadas en campo y, por último, se realizó la evaluación y el procesamiento de datos para la recomendación geotécnica del sitio (básicamente un análisis de estabilidad en el que se modelan las condiciones topográficas y geotécnicas con el fin de determinar las condiciones de seguridad en términos del factor de seguridad).

Este análisis identifica los aspectos que afectan la estabilidad de los taludes del proyecto y permite valorar las soluciones planteadas y su efecto en la estabilidad de los taludes.

Los factores de seguridad se analizan según la NSR-10, en su tabla H.2.4-1, (ver Tabla 2.4.1).



Figura 2.4.1 Ejecución de sondeos exploratorios de campo.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta+Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta+Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta+Carga Viva Normal+ Sismo de Diseño Pseudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes-Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes-Condición Pseudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Tabla 2.4.1 Factores de seguridad básicos mínimos directos.

(*) Nota: Los parámetros sísmicos pseudo estáticos de construcción serán el 50% de los de diseño.

Fuente: Tomado de la tabla H.2.4-1. *Normas Colombianas de diseño y construcción Sismoresistente*, 2010.

2.4.2 Resultados y su análisis

Durante la exploración de campo se identificaron dos mantos, un depósito aluvial y una arcillolita. Los parámetros geotécnicos se determinaron para cada manto, como se muestra en la Tabla 2.4.2 y Tabla 2.4.3.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Promedio	Cov (%)	Parámetro elegido
Φ' (°)	17	29	4	21	17.0%	21
C' (kPa)	3	19	5	9	53.6%	9
Φ (°)	-	-	-	-	-	30
Su (kPa)	20	63	14	36	37.8%	18
E (kPa)	3900	11100	2135	5890.91	36.2%	5890.91

Tabla 2.4.2 Parámetros geotécnicos determinados para el depósito aluvial.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Promedio	Cov (%)	Parámetro elegido
Φ' (°)	18	30	6	25	22.3%	25
C' (kPa)	8	56	20	34	58.5%	34
Φ (°)	17.75	26.32	6.06	22.04	27.5%	22.04
Su (kPa)	30.89	53.08	15.69	41.99	37.4%	41.99
E (kPa)	8100	19500	7924	14550.00	54.5%	14550.00

Tabla 2.4.3 Parámetros geotécnicos determinados para la arcillolita.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Con los parámetros geotécnicos y la topografía del sector es posible abordar el análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales y futuras. Con este fin, se analizó una sección del lote del Laboratorio Costero, cuya ubicación se presenta en la Figura 2.4.2

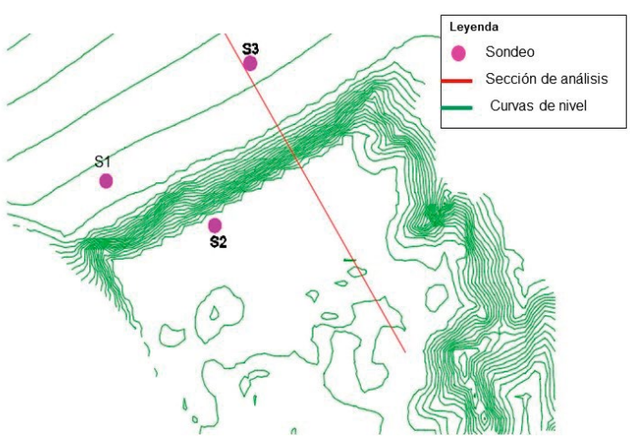


Figura 2.4.2 Localización sección de análisis.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Para el análisis se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- En la exploración geotécnica ejecutada no se reportó el nivel freático. Sin embargo y según lo observado en campo, se consideró una profundidad desde superficie de aproximadamente 6.5 m.
- No se consideran cargas sísmicas, viento, impacto, entre otras.
- Para la estabilidad se consideran dos métodos GLE/Morgensten-Price y Spencer.
- La resistencia de los materiales se considera constante en profundidad.

Debido a las condiciones evidenciadas en el sitio, y a las condiciones topográficas reportadas, se evaluaron las condiciones de estabilidad actual de la sección de análisis (ver Figura 2.4.3 y Figura 2.4.4).

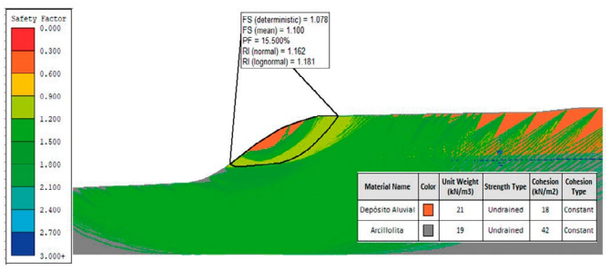


Figura 2.4.3 Análisis en condición actual No drenada (corto plazo) Laboratorio Costero.

Fuente: Diseño propio, 2021.

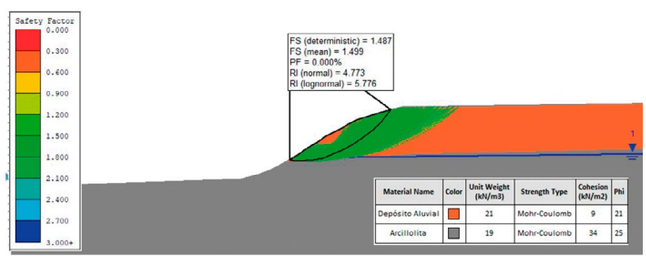


Figura 2.4.4 Análisis en condición actual Drenada (largo plazo) Laboratorio Costero.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Los resultados anteriores evidencian que, sin intervención (solo con abatimiento), los taludes se encuentran en una condición de estabilidad marginal a estable en condiciones de corto plazo (factor de seguridad en equilibrio límite), y estable para condiciones de largo plazo, con un factor de seguridad cercano de 1.5, que fue evidenciado en campo.

A continuación, se muestran los análisis con distintas alternativas para la protección del talud:

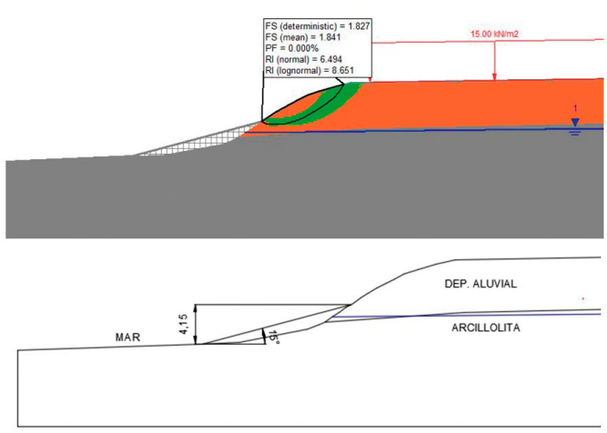


Figura 2.4.5 Análisis con intervención en sacos de suelo cemento.

Fuente: Slide ® v6.0.

- Análisis de estabilidad de sacos de suelocemento en pata de talud

En la zona intervenida del Laboratorio Costero se plantea colocar sacos de cemento en la pata del talud, con el fin de mitigar la erosión de su base (Figura 2.4.5).

(*) Nota: FS (deterministic): Factor de seguridad determinístico; FS (Mean): Factor de seguridad promedio; PF: Probabilidad de falla.

- Análisis de estabilidad de muro enrocado en talud

El análisis se muestra en la Figura 2.4.6.

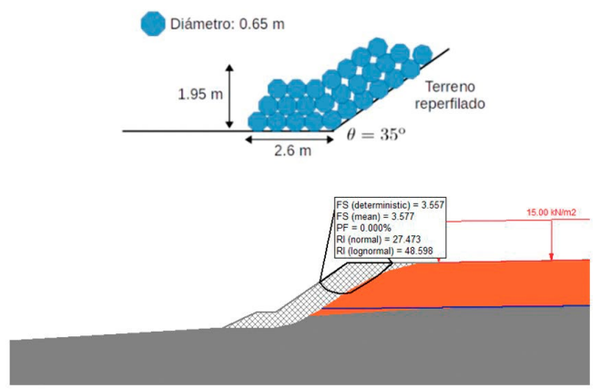


Figura 2.4.6 Esquema y análisis con intervención en muro enrocado.

Fuente: Slide ® v6.0.

La Figura 2.4.7 evidencia que las intervenciones en suelocemento y muro en roca, incrementan notablemente la estabilidad global del talud. Considerando sólo el abatimiento para este sector del Laboratorio, la estabilidad cumple. Sin embargo, deben implementarse otras alternativas como medidas adicionales para mitigar la erosión de su base y la consecuente generación de cambios en su pendiente.

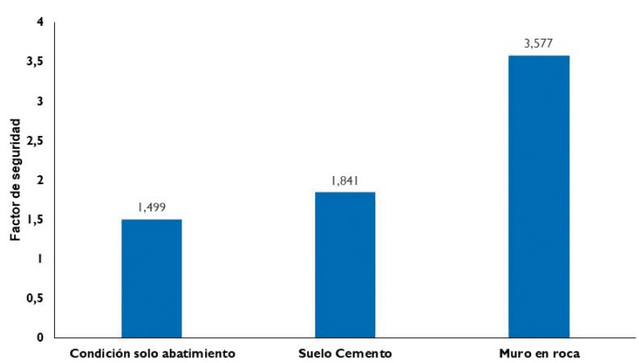


Figura 2.4.7 Comparativa de estabilidad entre varias alternativas de intervención.

Fuente: Diseño propio, 2021.

2.4.3 Conclusiones

La topografía actual del Laboratorio Costero presenta un abatimiento. Las alternativas propuestas para la protección del talud cumplen con el factor de seguridad mínimo requerido; sin embargo, según lo evidenciado en campo, es indispensable que esas intervenciones vayan acompañadas de obras hidráulicas (filtros).

Igualmente, es indispensable la protección contra la erosión por el oleaje en el pie del talud, y en su cara, por la precipitación. Al proyectarse un abatimiento, la cara del talud queda más expuesta a que la lluvia incida directamente y forme surcos, tal como se evidenció en campo.

También se observó un funcionamiento correcto de la cobertura vegetal en la cara del talud, ya que esta cobertura permite una distribución uniforme de la precipitación y mitiga la erosión por la lluvia.

2.5 Forestales

2.5.1 Introducción

El primer paso para reconocer un sitio y entender su valor e importancia es inventariar su vegetación. Los inventarios forestales son una herramienta a través de la cual se realiza una recolección sistemática de datos sobre los recursos forestales de una zona determinada. De acuerdo con esta información, se evalúa el estado actual del sitio y se establecen las bases del análisis y la planificación, que constituyen el punto de partida de una gestión forestal sostenible. Los datos preliminares que arrojan los inventarios forestales permiten conocer el grado de importancia de las especies que se encuentran en el sitio, así como sus categorías de conservación. La identificación de los individuos es clave para determinar indicadores del área y para proponer tipos de manejo. En el terreno del Laboratorio Costero, se quiere sembrar un seto vivo y se requiere realizar enriquecimiento a un afluente donde se pretende sembrar individuos de la zona, de gran importancia para los ecosistemas de agua dulce; para esto se tendrá el apoyo de la unidad de manejo forestal de Tulenapa (UdeA), con personal especializado en la reproducción de esta especie (mangle). Estas actividades serán descritas en este capítulo, y enmarcadas en el oficio 400-06-01-0239 de CORPOURABÁ, sobre medidas y precauciones para evitar daños al medio ambiente¸ Laboratorio Costero (PIMECLA)

2.5.2 Metodología

A continuación, se describen las actividades desarrolladas.

Inventario forestal

Se realizó un inventario forestal del lote, midiendo variables para conocer el estado de los árboles y las diferentes familias, géneros y especies del lugar (ver Tabla 2.5.1).

Es de aclarar que las especies descritas en este documento fueron identificadas en campo, y no se colectaron muestras para su identificación en herbario.

Categoría	Variable	
Brinzal	Número de individuos	Altura total (m)
Latizal	Condición	DAP (cm)
	Tipo de fuste	
	Altura de medición del DAP (m)	
	Distancia (m)	Forma del fuste
	Azimut	Daño
Fustal	Condición	DAP (cm)
	Tipo de fuste	Altura total (m)
	Altura de medición del DAP (m)	Altura del fuste (m)
	Distancia (m)	Forma del fuste
	Azimut	Daño
Fustal grande	Condición	DAP (cm)
	Tipo de fuste	Altura total (m)
	Altura de medición del DAP (m)	Altura del fuste (m)
	Distancia (m)	Forma del fuste
	Azimut	Daño

Tabla 2.5.1 Categorías de tamaño y variables a medir en campo.
Fuente: Barreto et al., 2018.

El inventario se realizó considerando fustales, en los que se midieron variables como DAP (diámetro a la altura del pecho) y altura total, y se registró el estado fitosanitario; en el caso de especies de raíces zanconas, se sigue la metodología específica para éstas, al momento de realizar las mediciones (Figura 2.5.1). Para la medición de la altura total y la altura del fuste se utilizó una aplicación que genera esta información (Figura 2.5.2).

Indicadores ecológicos

La abundancia relativa es un componente de biodiversidad y se refiere a cuán común o rara es una especie en comparación con otras especies en una comunidad biológica o una ubicación definida. Se calculó la abundancia relativa de los taxones identificados para conocer los grupos dominantes en el sitio de estudio. La abundancia relativa puede representarse como el porcentaje de un organismo, donde el 100% es el número total de organismos en el área. Para obtener más información sobre aspectos

ecológicos del lugar y tener mayor claridad respecto a la diversidad de especies en el sitio, se calcularon tres índices: índice de diversidad de Margalef, índice de diversidad de Menhinick, e índice de Simpson.



Figura 2.5.1 Esquema instructivo para la medición del diámetro en tallos con raíces expuestas.

Fuente: Barreto et al., 2018.



Figura 2.5.2 Esquema gráfico de la medición de altura de los individuos.

Fuente: Barreto et al., 2018.

Árboles seto vivo

Teniendo en cuenta el inventario forestal, y observando las especies de mejor adaptabilidad o pertenecientes a la zona de vida, se propuso el uso de especies para sembrar un seto vivo para aislar el lote de personas externas, y facilitar el control de ingreso del personal al Laboratorio (ver Figura 2.5.3).

Zona de siembra de mangle

Se hicieron observaciones y mediciones en la ribera del cauce que pasa por el lote del Laboratorio Costero que tiene desembocadura al mar. En este cauce se planea sembrar individuos de la especie llamada mangle, para enriquecer la zona costera y mejorar la estabilidad de la desembocadura de estas aguas al mar (ver Figura 2.5.4).



Figura 2.5.3 Perímetro para cerramiento.

Fuente: Diseño propio, 2021.



Figura 2.5.4 Punto de siembra de mangle.

Fuente: Diseño propio, 2021.

2.5.3 Resultados

Inventario forestal

Se realizó un inventario forestal al 100% del lote, en el cual se marcaron y se midieron todos los árboles presentes, 148 individuos en total. Se identificaron las familias, géneros y especies, y se cuantificaron distintas variables para conocer el estado de los individuos; en la Figura 2.5.5 se presenta el número de grupos identificados en cada nivel taxonómico.

En la tabla 2.5.2 se muestran los resultados preliminares del inventario (el cual todavía se encuentra en desarrollo). Con estos datos se determinarán algunos indicadores para obtener más información sobre la comunidad vegetal que se encuentra en el sitio.

Se identificaron 12 familias, 17 géneros y 19 especies; y se constató la presencia de cuatro especies de importancia para la extracción de madera, como son el guayacán rosado, la teca, la ceiba y el hobo. Se registraron dos especies de importancia ecológica dentro de los géneros Ceiba y Pseudobombax, que pertenecen a bosque secundario / primario; son especies que pueden crecer en terrenos talados y abandonados, su rango de crecimiento es amplio

y tienen potencial para reforestación productiva en zonas degradadas.

Durante el inventario forestal se determinó el estado fitosanitario de los árboles, para lo cual se observaba su estado físico y si estaban siendo atacados por hongos o insecto. Se evidenció que algunos árboles son de edad avanzada y presentaban pudrición general. Al respecto, los resultados se presentan en la Figura 2.5.6.

De 148 individuos, sólo 11 están en estado de pudrición. Estos deberían ser los primeros a manejar, para evitar accidentes por la caída o desprendimiento de ramas.

Etiquetas de fila	Suma de N de individuos (ni)
Anacardiaceae	**13**
Mangifera indica L.	7
Spondias mombin L.	6
Arecaceae	**1**
Acrocomia aculeata	1
Bignoniaceae	**42**
Crescentia cujete L.	32
Tabebuia rosea (Bertol.) Bertero ex A.DC.	10
Bombacaceae	**18**
Pseudobombax septenatum (Jacq.)Dugand	18
Boraginaceae	**8**
Cordia collococca L.	5
Cordia Eriostigma	3
Fabaceae	**49**
Pithecellobium lanceolatum (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Benth.	42
Pithecellobium	7
Malvaceae	**6**
Ceiba pentandra (L.) Gaertn.	1
Guazuma ulmifolia Lam	3
Sterculia apetala	2
Myrtaceae	**2**
Psidium guajava L.	2
Urticaceae	**1**
Cecropia peltata L.	1
Verbenaceae	**5**
Tectona grandis L.f.	5
Cesalpinácea	**1**
Cercis siliquastrum	1
Euphorbiacea	**2**
Sapium macrocarpum	1
Croton draco Schltdl.	1
Total general	**148**

Tabla 2.5.2 Resumen general del inventario forestal.

Fuente: Diseño propio, 2021.

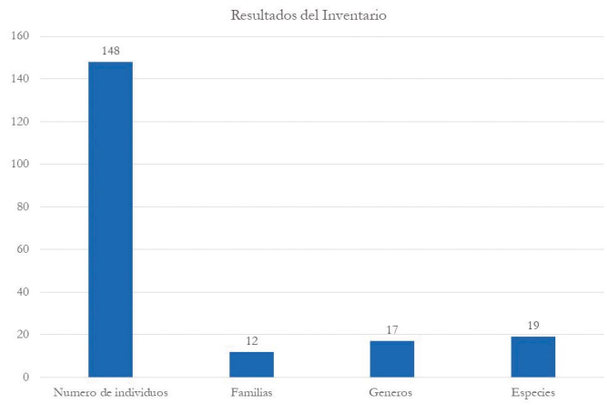


Figura 2.5.5 Número de individuos registrados, familia, géneros y especies identificados en el terreno del Laboratorio Costero.

Fuente: Diseño propio, 2021.

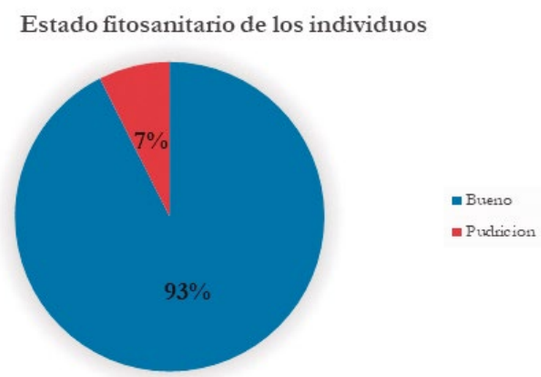


Figura 2.5.6 Estado fitosanitario de los individuos.

Fuente: Diseño propio, 2021.

Indicadores ecológicos

- *Abundancia relativa*

La abundancia relativa es un indicador que muestra la proporción de una especie respecto a todas las especies presentes en un sitio. En la Figura 2.5.7 se muestra la abundancia relativa de los taxones identificados en área de estudio. Puede observarse que *Pithecellobium lanceolatum* es la especie más abundante, ya que tiene un potencial alto de reproducción. En sus primeros estados utiliza un cebo en su semilla lo que lo hace apetecible a la fauna del sitio lo que ayuda a una reproducción más efectiva.

Se evidencia que el mayor número de individuos corresponden a la especie *Pithecellobium lanceolatum.* Para obtener más información sobre la ecología del lugar, y para tener mayor claridad de la diversidad del sitio en especies, se utilizarán los siguientes indicadores:

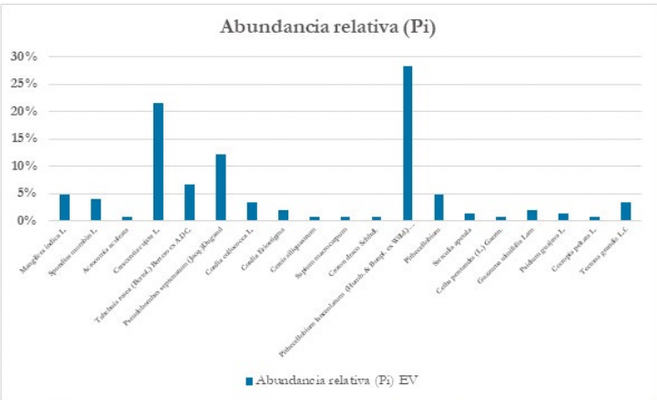


Figura 2.5.7 Abundancia relativa de las especies identificadas en el terreno del Laboratorio Costero.

Fuente: Diseño propio, 2021.

- *Índice de diversidad de Margalef (Dmag)*

Es una medida usada en ecología para estimar la diversidad de una comunidad, con base en la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada donde Dmag= (S-1) /Ln N, donde S= el número de especies, N= número total de individuos. El estimado para este índice es 3.6, valor que significa una diversidad media alta, dado que se tiene un buen número de especies para un área significativa.

- *Índice de diversidad de Menhinick.(Dmnk)*

Se basa en la relación entre el número de especies y el número total de individuos observados, que aumenta al aumentar el tamaño de la muestra. Donde Dmnk= S/RaizN, donde S= número total de especies presentes, N= número total de individuos. El estimado para este índice es 1.5, esto quiere decir que se tiene una riqueza alta, que refleja la existencia de un buen número de especies.

- *Índice de Simpson (D)*

Tiene la tendencia de ser más pequeño cuando la comunidad es más diversa. D es interpretado como la probabilidad de un encuentro intraespecífico, esto quiere decir, la probabilidad de que si se toman dos individuos al azar de la comunidad ambos sean de la misma especie. Donde Smp= ∑pi2. El estimado para este índice es 0.15, lo cual significa que se tiene una diversidad alta, acorde con el índice de la abundancia relativa, confirmación de la diversidad alta en el sitio.

Zona de siembra de mangle

Se han encontrado dos zonas para el establecimiento de esta especie. Se midieron en campo y suman un área de 400 metros cuadrados. En estos sitios existen pocas especies ya establecidas y están en la rivera del cuerpo de agua que sirve como lindero. Con esta información, y con ayuda de Corpourabá y Tulenapa, se gestionarán los individuos de la especie de mangle rojo, ideal para estas dos zonas propuestas. Su valor ecológico se relaciona con su actuación como barrera protectora entre el agua y la tierra, previniendo la erosión de las costas y reduciendo el efecto de oleajes y marejadas. Ver tabla 2.5.3

Familia	Rhizophoraceae
Nombre científico	*Rhizophora mangle*
Autor	(L.)
Nombre común	Mangle rojo
Altura máxima (m)	30
Diámetro (cm)	50
Amplitud de copa	Media (15 - 20 m)
Persistencia hoja	Perennifolio, halófito
Atributos florales	Con 4 sépalos y 4 pétalos, pequeños de color blanco
Sistema de dispersión	Principalmente viento
Tasa de crecimiento	Lenta
Longevidad	Alta (> 60 años)
Zonas de humedad	Seca, Húmeda
Rango altitudinal	0 - 1000 msnm
Requerimiento de luminosidad	Media
Tipo de suelo	Suelos salinos y bien drenados
Uso	El mangle colorado es usado como fuente de carbón de buena calidad de la madera en la mayoría de las costas de América tropical y África occidental; igualmente es utilizado para elaborar construcciones e instrumentos rústicos como juguetes, postes para cercas, estaquillas, postes eléctricos y traviesas de ferrocarril. La madera es adecuada para la producción de pulpa disolvente a pesar de que su uso como una fuenta de papel parece verse excluido debido al gran grosor de las paredes celulares.
Estado de conservación	A nivel global: Preocupación menor

Tabla 2.5.3 Ficha descriptiva del mangle rojo.

Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2022).

2.5.4 Conclusiones

En el terreno del Laboratorio Costero se encuentran individuos forestales, tanto de importancia maderera como ecológica.

En el área del Laboratorio Costero se evidencia la reproducción natural y la abundancia de material vegetal. Esta zona puede considerarse como un semillero natural; con individuos que ya presentan adaptabilidad. Sólo sería necesario reubicarlos en el caso de que se necesite repoblar otras zonas con especies nativas.

Según los resultados del inventario forestal, no se tienen especies en estado vulnerable o en el peligro.

Se presenta un bosque con especies autóctonas, de las cuales la *Pithecellobium lanceolatum* se reproduce muy bien en la zona y es la que tiene más individuos.

Según los valores de los indicadores ecológicos calculados, se tiene un buen bosque con riquezas y diversidades altas. Puede mejorarse el área con siembra de nuevos individuos para mejorar la conectividad entre los parches ecológicos de la zona.

2.6 Monitoreo de la línea de costa del Laboratorio Costero

2.6.1 Introducción

El Laboratorio Costero de la Universidad de Antioquia se localiza aproximadamente a un kilómetro (1km) al SW del casco urbano de Arboletes (Figura 2.6.1). Está ubicado sobre una terraza marina con una altura promedio de 10 msnm. El límite de la terraza con el mar es un talud acantilado sometido a la acción erosiva del oleaje en su base y a la erosión subárea por aguas de escorrentía. Para mitigar o detener el retroceso de este acantilado y evitar la consecuente pérdida de terreno, se diseñaron y se construyeron varias acciones de protección, entre estas acciones esta la construcción de filtros subterráneos en la superficie de la terraza y la modificación de la pendiente del escarpe, posteriormente revegetalizada. Para disminuir la energía del oleaje incidente se colocaron rocas en la base del escarpe. Para seguir la evolución del talud reconformado y evaluar los resultados de estas acciones se diseñó un plan sistemático de monitoreos.

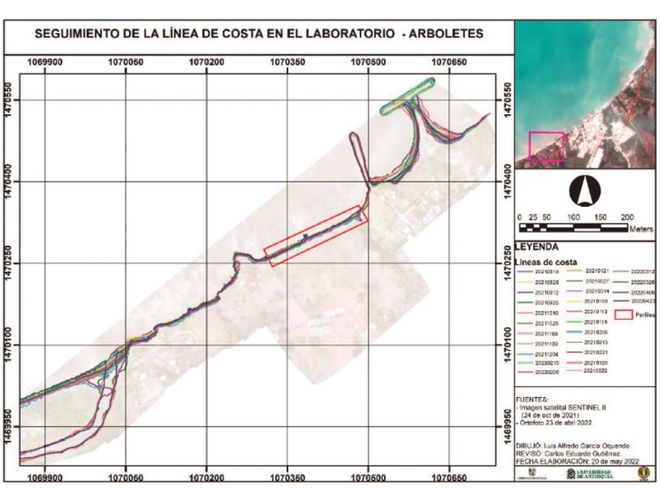


Figura 2.6.1 Monitoreo de la línea de costa desde el 21/01/2021 hasta el 23/04/2022.

Fuente: Diseño propio, 2022.

2.6.2 Metodología

El monitoreo de esta línea de costa se hizo mediante un dron Mavic PRO 2 (se programaron planes de vuelo con periodicidades de 15 días, a una altura que oscila entre los 90 m. y 120 m. para obtener detalles con una resolución de 3 cm por píxel. Los vuelos se realizaron en marea baja, buscando mantener de forma uniforme una posible línea de costa (línea costa asociada a la marea baja). Las orfotofotos son rectificadas a partir de puntos de control en tierra para garantizar que las imágenes queden correctamente georreferenciadas y puedan ser comparables. Una vez se realiza este procedimiento, se traza la línea de costa definida como la línea de interfaz tierra – agua en marea baja para cada una de las escenas. Al comparar estas diferentes imágenes es posible caracterizar la evolución temporal de la línea de costa en el intervalo que duró el proyecto.

2.6.3 Resultados y análisis de resultados

En la Figura 2.6.2 se representa el retroceso de la línea de costa con líneas de colores verde, amarillo, naranja y rojo; el rojo representa las mayores longitudes de retroceso o erosión (entre 2,6 a 4 m). Sin embargo, la erosión en este segmento es de magnitudes menores a la determinada para los sectores cercanos con las mismas características geomorfológicas, incluyendo el sector de la terraza en la margen derecha de la desembocadura del río Hobo.

En la Figura 2.6.2 se observa cómo en el área donde hay rocas en la zona de rompiente (perfiles 4 a 8) el proceso erosivo tiende a ser muy débil o incluso nulo. Hacia la zona centro e izquierda de la misma Figura 2.6.2, el escarpe no se perfiló, por lo cual se conservó la pendiente vertical original (perfiles 1 y 2); es allí donde se identificó el retroceso mayor del acantilado (líneas rojas). Hacia el centro de la imagen (perfiles 5, 6, 7), parte del sector donde se perfiló la pendiente, la magnitud del retroceso de la línea de costa fue menor (entre 0 a 2.57 m, líneas verde, amarilla y naranja).

Las imágenes aéreas permiten igualmente analizar el comportamiento de la base del talud. Son muy útiles para evaluar si el experimento de su perfilamiento y las obras complementarias han logrado detener o disminuir el retroceso del acantilado o, por el contrario, no han cumplido con las expectativas.

En la Figura 2.6.3 se aprecia el comportamiento del talud durante el tiempo en el que se realizó el monitoreo. Dadas las características geotécnicas de la base del talud (estratos arcillosos) y teniendo en cuenta la incidencia del oleaje, se observa que en los



Figura 2.6.2 Retroceso de la línea de costa para el periodo de análisis.

Fuente: Diseño propio, 2022.

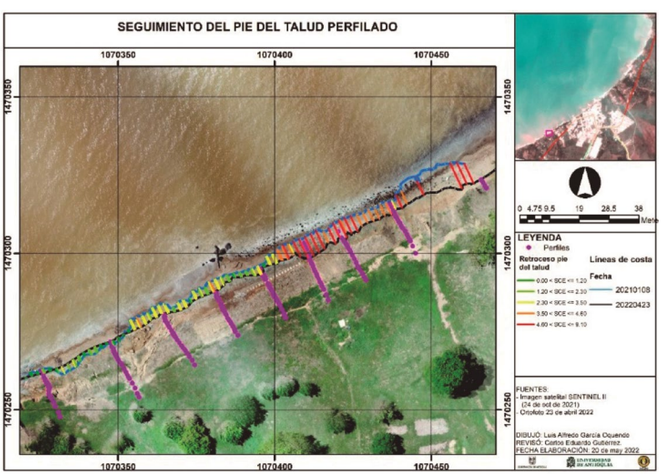


Figura 2.6.3 Variación de la base del talud durante el periodo de análisis.

Fuente: Diseño propio, 2022.

sitios de los perfiles 1 y 2 hay una aparente progradación de la base del talud; esta progradación se relaciona con la acumulación de material proveniente de los movimientos en masa en el sector. En el resto de la zona se evidencia el retroceso de la línea de costa, ubicado en la base del talud en la zona asociada a los perfiles 3,4 y 5. Este retroceso es del orden de 1 a 3 m.

2.6.4 Conclusiones

No es posible asociar de forma directa el retroceso de la línea de costa y la variación de la base del talud.

Si bien el fenómeno erosivo persiste en la línea de costa del Laboratorio, es claro que se ha ralentizado, como lo indican las comparaciones con las líneas de costa de los sectores vecinos, no protegidos con ninguna acción (sector aledaño al rio Hobo). Se demuestra que el experimento de perfilamiento del talud ha sido exitoso para mitigar su retroceso y la erosión consecuente.

La presencia de obstáculos (rocas o elementos rígidos aislados) en la zona de rompiente es un factor importante para reducir la energía del oleaje y, al reducir el arrastre de sedimentos, proteger mejor la línea de costa.

2.7 Referencias

Barreto, J. S., Ramírez, S. E., Peña. M. A., Capachero, C., Barbosa, A. P., Panev, M., Phillips, J. F. y Moreno, L. M. (2018). *Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM-. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia. Bogota.

Correa, I.D., Vernette, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes – Turbo) Costa Caribe colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, volumen (33).

UEIA. (2014). Rutaceae - Murraya paniculata. Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. Recuperado el día 25 de octubre de 2021, de https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/95.

Estudio experimental, medición de parámetros físicos oceanográficos y proyecto Coast Snap para la determinación del retroceso de la línea de costa

CAPÍTULO

3°



PIMECLA

Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 3º

Estudio experimental, medición de parámetros físicos oceanográficos y proyecto Coast Snap para la determinación del retroceso de la línea de costa

Autores:

Alfredo Jaramillo Vélez.
Juan Guillermo Torres Córdoba.
Luis Alfredo García Oquendo.
Isabel Cristina López Genes.
Maria C. Aguirre Pérez.
Marshall Diaz Londoño.
Carlos Alberto Palacio Tobón.
Vladimir G. Toro Valencia.

3.1 Introducción

Las costas son lugares estratégicos donde concurren diversas actividades productivas y un importante desarrollo de las comunidades (Barragán y de Andrés, 2015). Por lo tanto, cualquier fenómeno como la erosión, que representa una amenaza crítica en el litoral, se vuelve un tema prioritario. El análisis de las causas y el monitoreo del fenómeno cobra entonces importancia, como una de las bases científicas necesarias para la toma de decisiones con respecto a las acciones de control y de mitigación. En general, la erosión costera es un proceso natural con déficits de sedimentos en el sistema litoral, generados principalmente, a corto plazo, por acciones de las corrientes y de los oleajes. La erosión costera es uno de los factores más importantes en la evolución de los límites tierra-mar a todas las escalas de tiempo y, es actualmente, debido a sus afectaciones, uno de los mayores problemas ambientales del mundo (Casella et al., 2016).

Los procesos erosivos y de sedimentación en el litoral son reconocidos como dos de los ejes de los problemas ambientales fundamentales en las zonas costeras colombianas (Bernal et al., 2005). Por ello diversas instituciones de orden nacional, departamental y municipal han venido evaluando la extensión de esta problemática y la importancia de comprender mejor el fenómeno de la erosión.

En la región de Urabá se han registrado diversos grados de impactos importantes derivados de la erosión. Se han documentado retrocesos de la línea de costa a velocidades máximas de 40 m/año en el sector de Arboletes – punta Rey, y a velocidades menores desde 1 a 5 m/año entre San Juan y la punta Caribaná (Correa y Vernette, 2004; Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia, 2019). Por el contrario, cerca de la desembocadura del río Turbo, los aportes de sedimentos han sido suficientes para la formación de depósitos sedimentarios (playas y bajos submareales).

Dado que los procesos marinos y costeros se dan en un rango variable de escalas espaciales y temporales, de días a siglos y, de metros a kilómetros (Komar, 1998), se hace complejo plantear estrategias para su monitoreo. Estas deben tener en cuenta la mejor relación costo beneficio en cuanto al tipo, la cantidad y la calidad de la información a recopilar, además de las diferentes metodologías y tecnologías (video digital, fotografía digital, radar, sensores, drones, entre otras), que varían en costo y precisión (Osorio et al., 2008). Si bien en todo el mundo se han realizado extensos monitoreos costeros en los cuales se han recopilado conjuntos de datos completos de forma casi continua durante décadas (utilizando métodos *in situ* y múltiples tecnologías de detección remota), en Colombia los trabajos de monitoreo continuo no han sido tan extendidos. Sin embargo, se destacan las labores del Invemar y su programa GEO (Geociencias Marinas y Costeras) activo desde el año 2006, con el inicio de los levantamientos a detalle de la erosión costera para el Caribe (Posada, B., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. INVEMAR.), para la costa Pacífica (Posada et al., 2009) y para las zonas insulares colombianas (Posada et al., 2011).

El auge tecnológico ha permitido alternativas metodológicas y avances en el estudio de procesos costeros continuos. Por ejemplo, Osorio et al. (2008) describe los resultados obtenidos en las playas de Bocagrande, Cartagena, mediante el uso de un sistema de monitoreo de playa por medio de cámaras de video llamado HORUS. Este método fue desarrollado en conjunto por diversos investigadores de los grupos de investigación GIOC de la Universidad de Cantabria (España) y OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia (Osorio et al. 2010).

En el golfo de Urabá se han efectuado estudios puntuales (Aristizábal et al., 1990; Correa, 1992; Franco,

1992; Velásquez, 2000; Correa, et al., 2010, Paniagua, 2013; Alcantara, et al., 2019) que han proporcionado información sobre la evolución e intervención de línea de costa, balances sedimentológicos e identificación de zonas de erosión y de acreción. Se destacan los trabajos de Aristizábal et al. (1990), Correa (1992), Franco (1992), Velásquez (2000), Correa et al. (2010), Paniagua (2013), entre otros. Sin embargo, no se cuenta aún con un conjunto de registros continuo y estandarizado de esta zona, necesario para tener una visión completa de la dinámica cambiante típica de un sistema costero como este (Jaramillo-Vélez, 2016).

La Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA), como autoridad ambiental de la zona, ha desarrollado proyectos para obtener datos geográficos del golfo de Urabá - monitoreos y medición de perfiles y líneas de costa (CORPOURABA, 2018a), e incluso diagnósticos de infraestructura costera instalada en los municipios de la región (CORPOURABA, 2018b).

Dada la importancia de los procesos erosivos que han afectado y que afectan a gran parte del litoral antioqueño, y teniendo en cuenta que la dinámica oceanográfica es uno de los principales factores de estos procesos, PIMECLA tiene entre sus objetivos el estudio sistemático de los factores oceanográficos de la costa antioqueña, incluyendo a sus oleajes, mareas, corrientes marinas y temperaturas. La información de estos estudios es, además, fundamental para implementar, calibrar y validar los modelos numéricos que permitan evaluar escenarios en contextos diferentes.

3.2 Estudio experimental del retroceso de la línea de costa

3.2.1 Metodología

A lo largo de esta sección se abordará el proceso de monitoreo topográfico a partir de datos de campo sistemáticos (con precisión centimétrica) realizado para evidenciar, la estabilidad o inestabilidad del terreno después de las acciones implementadas para el control de la erosión en el Laboratorio Costero. Estas medidas incluyeron el perfilamiento del talud en un doble ángulo y la disposición de rocas o concresacos de suelocemento en ubicaciones específicas.

Con el fin de tener una línea base, se realizó un levantamiento topográfico de todo el predio por medio de un GPS diferencial (DGPS), lo cual permitió tener precisiones hasta de dos centímetros, y al usarlos en su función RTK permiten generar una nube de puntos significativa para una correcta interpolación. Adicionalmente, se instalaron desde la primera fase del proyecto diez puntos de control para orientar diez perfiles topo batimétricos perpendiculares a la cabecera del talud y a la línea de costa, con una distancia entre ellos de aproximadamente 20 m. Estos perfiles, se midieron constantemente, con estación total, durante una fase inicial del proyecto. Durante la segunda fase se usó solamente DGPS, tomando una nube de puntos (Figura 3.2.1) para hacer el levantamiento topográfico de la parte sumergida y de la playa, con miras a obtener un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés) del terreno en cada campaña. En la ladera del talud se midieron en detalle (metro a metro) los perfiles con el fin de comparar su evolución en el tiempo.

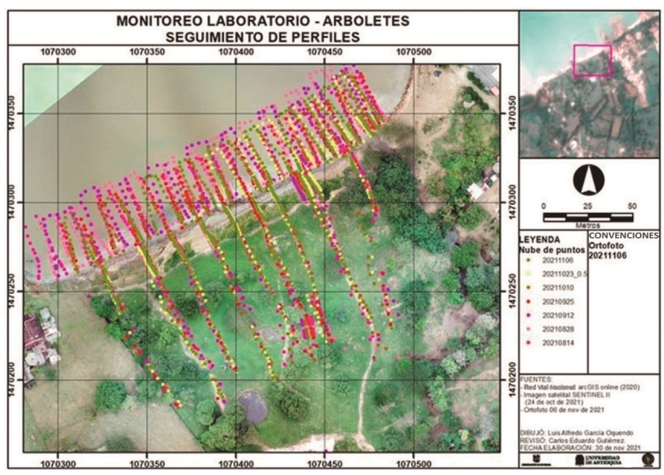


Figura 3.2.1 Nube de puntos topo-batimétricos tomada desde el 14 de agosto de 2021 hasta el 6 de noviembre de 2021.

Fuente: Diseño propio.

Como puede verse a continuación en la Figura 3.2.2, los puntos de control eran altamente visibles y robustos con el fin de que fueran duraderos en el tiempo y de fácil visualización desde tierra y aire durante los sobrevuelos con dron, permitiendo así la georreferenciación de las fotos.

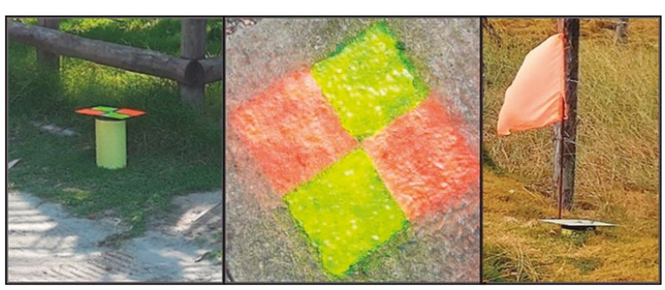


Figura 3.2.2 Señalización usada como puntos de control.

Fuente: Diseño propio.

En la segunda fase del proyecto, el monitoreo se llevó a cabo durante 16 salidas, con una periodicidad de 15 días. Una vez obtenidos los datos de campo, se depuraron los que no cumplieron alguno de los

siguientes criterios de precisión: ± 0,02 m en el plano XY y ± 0,04 m en la altura: Con el resto de puntos se calcularon los DEM y se graficaron los perfiles para las respectivas comparaciones de evolución en el tiempo.

3.2.2 Resultados

Los resultados están enfocados en el retroceso de línea de costa y en la variación topográfica de los perfiles de playa y acantilados. En el primer enfoque de los resultados se analizan dos posibles criterios de definición de línea de costa para el litoral antioqueño.

Retroceso de línea de costa

Mediante los perfiles topográficos se estimó el desplazamiento de la línea de costa, teniendo en cuenta las distancias perpendiculares existentes entre la ubicación de los puntos de referencia de cada perfil y la línea de costa. Se consideraron dos criterios: la base del talud y la línea de agua, siendo este último criterio más susceptible a un enmascaramiento por el nivel de la marea en cada ocasión. A continuación, en la Tabla 3.2.1 se presentan los resultados del retroceso obtenidos bajo los dos criterios, los valores negativos hacen referencia a la erosión y los positivos al avance de la línea de costa sobre el mar.

Según los resultados (ver Tabla 3.2.1 y Figura 3.2.3) bajo el criterio de la línea de agua, los perfiles 2 y 3 presentan los mayores retrocesos en la línea de agua, con -3,15 m y -2,65 m respectivamente. En la zona central se presenta un retroceso de aproximadamente -1.5 m en promedio; y en el perfil 4 y 5 se evidencia una acreción de 0,73 m y 1,10 m de costa, respectivamente.

Perfil	Retroceso	
	Línea de agua	Base de talud
1	-0.52	-1.33
2	-3.15	-1.23
3	-2.65	-3.48
4	-0.73	-3.58
5	1.10	-2.88
6	-1.42	-6.59
7	-1.58	-5.00
8	0.30	-2.98
9	N/A	N/A
10	0.63	-6.94

Tabla 3.2.1 Retroceso de la costa a partir de dos criterios usados: línea de agua y base de talud.

Fuente: Diseño propio.

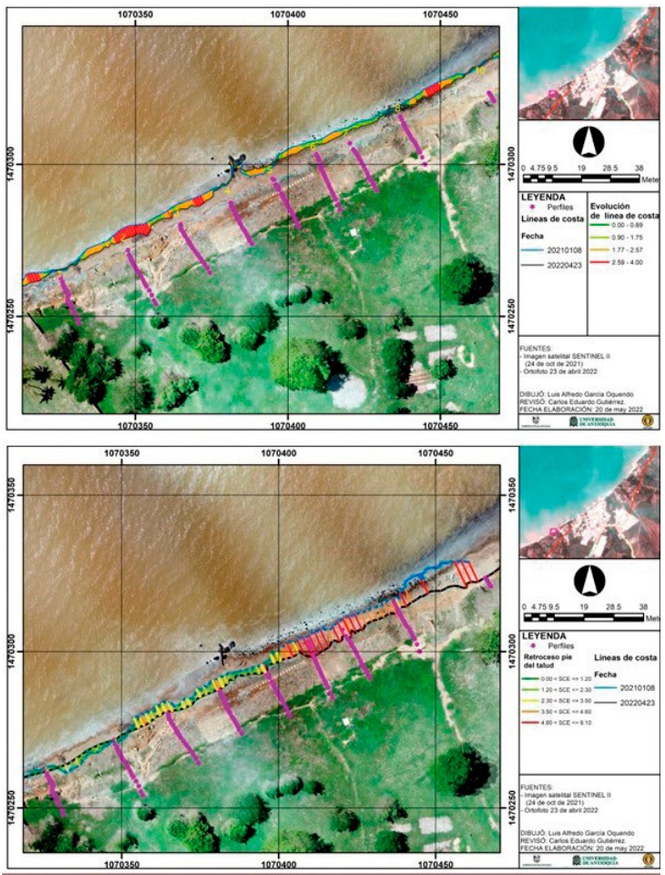


Figura 3.2.3 Resultados del retroceso de costa visualizado mediante la herramienta DSAS aplicando los dos criterios: línea de agua y base del talud.

Fuente: Diseño propio.

Considerando el criterio de pie de talud se encontró que las zonas de mayor retroceso corresponden a los perfiles 6, 7 y 10 con valores de -6,59 m, -5 m y -6,94 m, respectivamente (ver Tabla 3.2.1), y las zonas con menor retroceso corresponden a los perfiles 1 y 2 con valores de -1,33 m y -1,23 m. Nótese que desde este criterio no va a ser posible identificar ningún proceso de acreción, debido a que el talud por sí mismo es una consecuencia de un proceso erosivo y no es una geoforma que pudiera reconstruirse de manera natural. El retroceso del pie del talud se debe a (1) la incidencia del oleaje, afectando directamente la estabilidad del talud, (2) las bajas propiedades portantes del suelo del pie del talud (arcilla), y (3) la erosión subaérea en la cual influye el viento, la escorrentía y el impacto de la precipitación, en la cara del talud desprotegido.

Variación topográfica de los perfiles

En la primera fase del proyecto PIMECLA (2021), se establecieron y se midieron diez perfiles, sin embargo, en la segunda fase (2022), se realizaron 16 mediciones quincenales a 9 de los 10 perfiles iniciales, no se pudo medir el perfil # 9 establecido en el 2021 debido al riesgo que implicaba su medición para el personal a

causa del cambio del terreno. En la Figura 3.2.4 se muestran los perfiles 1 al 8 y el perfil 10 (ordenados de suroeste a noreste), comparando cada perfil entre 14 de agosto de 2021 y 23 de abril de 2022, para determinar la cantidad erosionada durante poco más de ocho meses en cada perfil, y a partir de ahí estimar el volumen de material perdido.

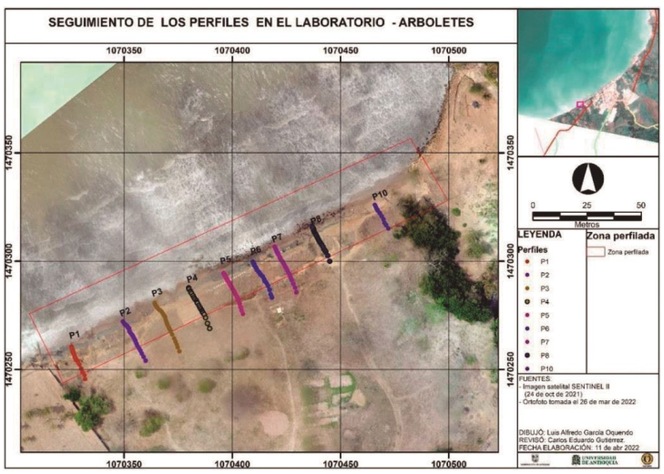


Figura 3.2.4 Perfiles topográficos para la observación de su evolución en el tiempo.

Fuente: Diseño propio.

Cualitativamente, los perfiles seleccionados tienen diferentes niveles de inclinación: los perfiles 1 y 2 se encuentran en una zona que no fue perfilada, por lo que aun se evidencia el acantilado en el perfil 1 con ángulo entre 80° y 90°, mientras que el perfil 3 cuenta con un perfilado de menor pendiente en la cima y uno de mayor pendiente desde la mitad del perfil hasta la parte inferior: Los perfiles 4 al 8 presentan un perfilado constante hasta el pie de los taludes, luego varía la pendiente debido a las rocas dispuestas sobre la línea de playa.

En la Figura 3.2.5, se recopila la cantidad de terreno erosionado en cada uno de los perfiles, desde el día 14 de agosto de 2021 hasta el 23 de abril de 2022 y expresada tanto en área transversal (sector sombreado en cada perfil), como en volumen. Se asume homogeneidad en los 10 m a lado y lado contiguos de cada perfil (Tabla 3.2.2).

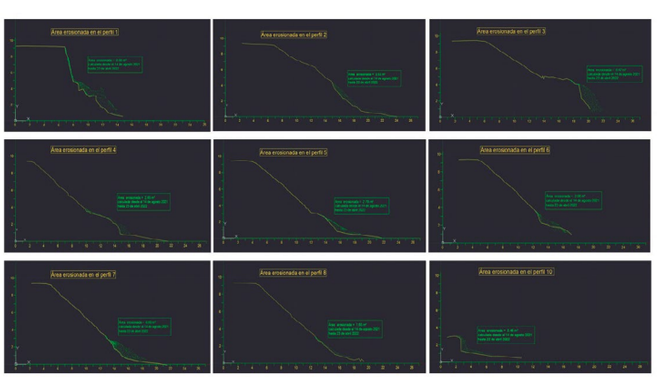


Figura 3.2.5 Evolución de los nueve perfiles entre agosto de 2021 y abril de 2022.

Fuente: Diseño propio.

Perfil	Área transversal erosionada	Volumen aproximado de material perdido
1	8.60 m^2	172 m^3
2	3.83 m^2	76 m^3
3	6.47 m^2	130 m^3
4	2.45 m^2	48 m^3
5	2.79 m^2	56 m^3
6	2.08 m^2	42 m^3
7	6.00 m^2	120 m^3
8	1.65 m^2	34 m^3
10	2.46 m^2	50 m^3
		Total: 728 m^3

Tabla 3.2.2 Estimación del volumen de material erosionado entre agosto de 2021 y abril de 2022 a partir de la proyección de 20 m del área transversal erosionada en los perfiles topográficos.

Fuente: Diseño propio.

3.2.3 Conclusiones

La orientación general de la línea de costa determina la incidencia casi perpendicular del oleaje proveniente del norte, e influye en que las corrientes de deriva sean mínimas y no alcancen a transportar grandes cantidades de sedimento a lo largo de las playas. Sin embargo, el transporte mar afuera (*offshore*) cobra más importancia al encontrar más acantilados que playas en la costa, lo cual hace que la erosión predomine.

Es asi como al observar los perfiles topográficos, se evidencia estabilidad en la parte superior del acantilado debido al perfilamiento y a la revegetalización realizada. Sin embargo, debe prestarse atención a la formación y al sellado oportuno de cárcavas y grietas para garantizar su estabilidad y evitar la erosión subaérea por escorrentía. Así mismo, se evidencia que la erosión del talud se da aproximadamente en los primeros 4 m, lo que implica que los siguientes esfuerzos de protección deben estar enfocados a controlar la interacción del oleaje con su base, en lo posible reconstituyendo la playa con pendiente menor a 15° y material de tamaño adecuado.

Con respecto a los dos criterios usados para medir los cambios de línea de costa, se concluye que analizar estos desplazamientos desde el criterio de distancia a la línea de agua, requiere de una corrección por la marea,

lo cual implica que haya certeza en la curva de marea para el sitio. Este requerimiento no puede cumplirse a la fecha, para las costas del litoral antioqueño, ya que el pronóstico de marea ofrecido por la autoridad marítima de Colombia se basa en datos de una boya ubicada en Sapzurro, con un desfase significativo de la onda de marea por su distancia hasta cualquier punto del litoral. Hernández et al. (2021) describen que para la playa del municipio de Turbo puede haber un desfase de aproximadamente 80 minutos, pudiendo ser un poco más, si se consideran el detalle de las condiciones geométricas del golfo de Urabá.

Por otro lado, el uso del criterio de la línea de la base del talud es el mejor para definir la línea de costa en litorales que presentan una erosión crónica y, por lo tanto, analizar su retroceso solo es aplicable si se tienen en cuenta tres consideraciones importantes:

1. Deben existir acantilados o escarpes de mínimo un metro de altura.
2. No es posible evaluar acreción de la línea de costa, por lo que la geoforma de acantilado costero es de naturaleza erosiva y no progradará de manera natural.
3. A pesar de que existan acantilados en el litoral, debe considerarse su aplicación si durante el ciclo de marea viva las olas presentan incidencia sobre la base del acantilado, ya que, si se recupera playa delante del acantilado, la variabilidad de esta no podría identificarse con el criterio de retroceso de base de talud.

3.3 Medición de los parámetros oceanográficos básicos

Con el propósito de comprender el comportamiento de las corrientes superficiales, la altura de la ola significativa (Hs), el período pico (Tp), la dirección del oleaje, la altura de la onda de marea, así como la magnitud y dirección de las corrientes en la columna de agua en diversas ubicaciones a lo largo de la costa de Antioquia, se utilizaron una variedad de instrumentos oceanográficos.

Para el seguimiento de las corrientes superficiales, se emplearon boyas de deriva equipadas con sistemas de posicionamiento global. Para la medición de los parámetros del oleaje y la onda de marea, se emplearon sensores de presión *BlueLog* con una frecuencia de muestreo de 6 Hz, además de un correntómetro *AquaDopp* de 1 Hz y un perfilador *AquaPro* de 2 Hz de la marca *Nortek*. Estos últimos dispositivos también se utilizaron para evaluar el comportamiento de las corrientes en la columna de agua.

3.3.1 Zonas de medición

Las mediciones de variables oceanográficas se practicaron en diferentes sectores a lo largo de la costa del Urabá antioqueño, entre punta Rey (límite departamental entre Antioquia y Córdoba 8°53'18.5" N - 76°25'00.5" W) y el distrito de Turbo (límite departamental entre Antioquia y Chocó 8°15'15.34" N - 76°58'45.20" W) (Figura 3.3.1). Los sectores fueron: Turbo (zona de fondeo y punta Las Vacas), Necoclí (boya Akuará) y Arboletes.

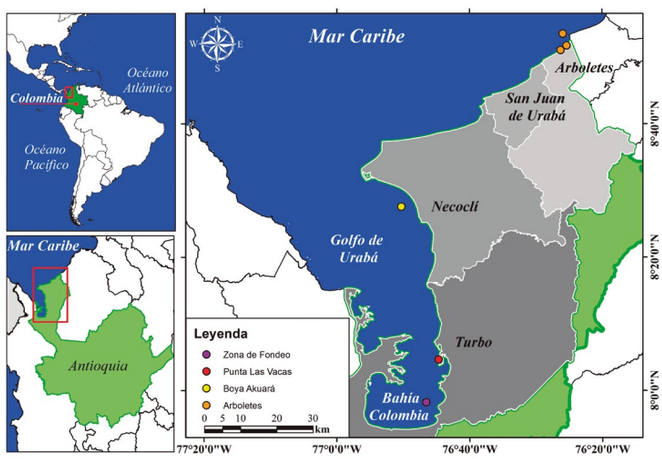


Figura 3.3.1 Localización geográfica de la zona de estudio; los puntos de colores corresponden a cada una de las zonas donde se realizaron mediciones *In situ*.

Fuente: Diseño propio.

3.3.2 Metodología

En el desarrollo de este proyecto se ejecutaron diferentes tipos de mediciones en los lugares anteriormente mencionados. Estas mediciones permitieron también conocer las magnitudes y direcciones de las corrientes oceánicas superficiales del área, de las alturas significativas de ola (Hs), de los periodos pico (Tp) del oleaje y de las alturas de las ondas de marea. Se subrayan los siguientes aspectos metodológicos seguidos en el estudio:

Experimentos lagrangianos

Para la identificación de las corrientes superficiales en las zonas de Turbo y de Arboletes se fabricaron boyas de deriva de bajo peso y de dimensión reducida. Estos equipos permitieron el seguimiento detallado de las masas de agua y, dado que en su interior cuentan con un sistema de posicionamiento geográfico por GPS, los datos son enviados en tiempo real a un

servidor (Figura 3.3.2).

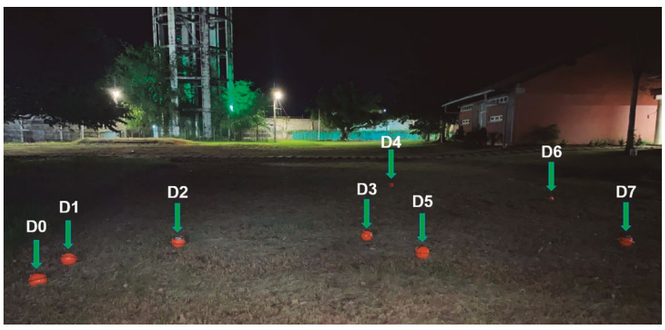


Figura 3.3.2 Boyas de deriva, con sistema de posicionamiento geográfico.

Fuente: Torres, 2022.

La toma de datos se realizó en tres campañas de medición (Tabla 3.3.1). En la primera se arrojaron al mar dos derivadores (uno con draga y otro sin draga) en el área Turbo – sector punta Las Vacas. Se realizó un primer lanzamiento cerca de la costa y, una vez que estos tocaron tierra, se llevaron y lanzaron *off-shore* para poder comparar el comportamiento de ambas trayectorias. En la segunda campaña, los dos derivadores se arrojaron con draga en dos puntos del municipio de Arboletes. En la tercera campaña la medición se llevó a cabo con ocho derivadores sin draga, ubicados en dos puntos cercanos a la zona de fondeo *Alpha* del distrito de Turbo. Esta actividad tenía como objetivo conocer cuál sería la trayectoria que seguiría un contaminante que se mantenga en superficie, con las condiciones meteorológica y oceánicas del día de la medición.

Instalación de equipos

Dos campañas de mediciones se realizaron en el municipio de Necoclí (Tabla 3.3.1). En la primera se instaló un medidor de corrientes de efecto Doppler *AquaDoop* (correntómetro) para conocer los parámetros principales del oleaje y los valores de corrientes a 10.5 m de profundidad.

N°	Equipo	Lugar	Ubicación		Fecha	
			Latitud	Longitud	Inicio	Fin
1	Boya de deriva	Turbo	8°04'40.19"	76°44'42.18"	04/09/2022	
2		Arboletes	8°53'10.25"	76°25'29.04"	24/02/2022	25/02/2022
			8°52'43.03"	76°25'53.04"		
3		Turbo	8°01'15.01"	76°45'17.89"	31/03/2022	
			7°57'19.69"	76°45'56.38"		
4	Sensor de presión	Arboletes	8°51'47.20"	76°25'21.60"	19/12/2020	21/01/2021
5			8°51'05.20"	76°26'18.50"	22/08/2021	12/11/2021
6			8°53'40.90"	76°25'50.90"	13/11/2022	22/01/2022
7			8°53'23.00"	76°26'17.40"	03/05/2022	14/06/2022
8	Correntómetro	Necoclí	8°27'35.68"	76°50'17.95"	11/08/2021	01/10/2021
9	Perfilador				05/02/2022	03/04/2022

Tabla 3.3.1 Lugar, fecha y equipos utilizados en las campañas de medición.

Fuente: Diseño propio.

En la segunda campaña se instaló un perfilador de corrientes *AquaPro* en el mismo lugar para medir los parámetros principales del oleaje y conocer la velocidad de las corrientes en toda la columna de agua. En el municipio de Arboletes se realizaron cuatro campañas de medición, en las que se instalaron sensores de presión (Tabla 3.3.1) para medir Hs, Tp y la amplitud de la onda de marea.

La instalación de los diferentes equipos requirió del diseño y la construcción de anclajes (Figura 3.3.3), uno de ellos utilizado como anclaje de referencia y el otro para sujetar el equipo (Figura 3.3.3a). Estos anclajes se instalaron en el fondo marino, sin señalización en superficie, y se unieron entre sí por una cuerda en el fondo del mar (Figura 3.3.3b).

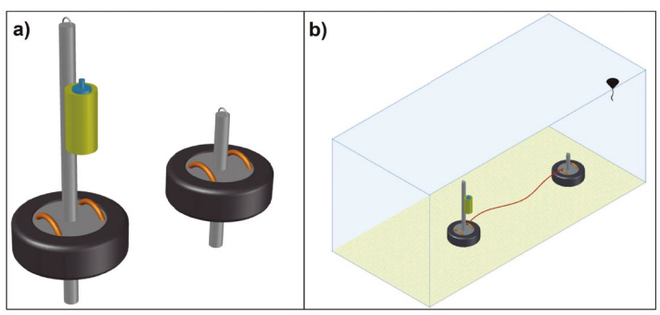


Figura 3.3.3 Diseño de anclajes y esquema de instalación en el fondo del mar.

Fuente: Torres, 2022.

3.3.3 Resultados de las mediciones

Boyas de deriva

En el municipio de Turbo, sector punta Las Vacas, se efectuaron las mediciones con las boyas de deriva y se identificaron las trayectorias de las corrientes superficiales y sus velocidades máximas, mínimas y promedio. Para entender su comportamiento se analizó la influencia de algunos fenómenos forzadores como la marea meteorológica y los vientos. El derivador sin draga alcanzó velocidades promedio hasta de 0.292 m/s mientras que el derivador con draga de 0.116 m/s (Tabla 3.3.2).

Velocidad (m/s)	Derivador sin draga		Derivador con draga	
	T1	T2	T1	T2
Máxima	0,217	0,370	0,220	0,264
Mínima	0,021	0,245	0,011	0,064
Promedio	0,127	0,292	0,060	0,116

Tabla 3.3.2 Velocidades máximas, mínimas y promedio de los derivadores en el sector punta Las Vacas, durante las dos trayectorias.

Fuente: Diseño propio.

Ambas trayectorias mostraron una tendencia general en dirección noreste, paralela a la línea de costa (Figura 3.3.4 y 3.3.5). Para el caso del derivador con draga, su movimiento fue influenciado principalmente por los cambios de amplitud en la onda de marea (Figura 3.3.4, panel inferior), mientras que la trayectoria del derivador sin draga fue influenciada por el viento (Figura 3.3.5).

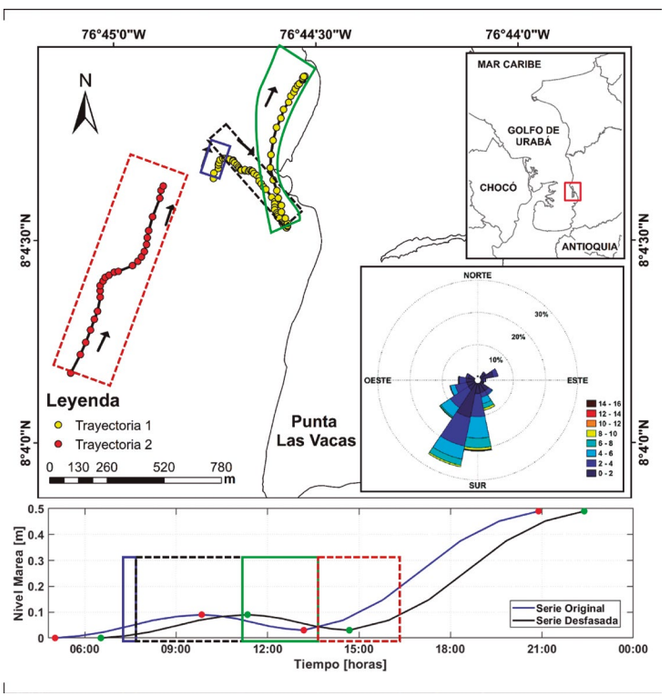


Figura 3.3.4 Trayectorias del derivador con draga, dirección del viento y curva de marea meteorológica original y desfasada; trayectoria 1 (07:08-13:42) y trayectoria 2 (14:07-16:41).

Fuente: Diseño propio. Los datos de viento fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad de Antioquia – sede Ciencias del Mar.

En las mediciones llevadas a cabo en el municipio de Arboletes se identificaron corrientes con velocidades promedio entre 0.141 y 0.287 m/s (Tabla 3.3.3). En esta zona se presenta un sistema de corrientes que puede estar siendo modulado por la isla y por las rocas emergidas en frente de punta Rey, dado que al soltar el derivador entre la isla y punta Rey, su trayectoria va en dirección norte (Figura 3.3.6a) y al ubicarlo un poco antes de la isla, las corrientes se dirigen, primeramente en dirección sureste. Aproximadamente a 400 m de la línea de costa la corriente varía hacia el suroeste, paralelamente a la línea de costa (Figura 3.3.6b).

En cuanto a las mediciones efectuadas en cercanías a la zona de fondeo *Alpha* del distrito de Turbo, los derivadores alcanzaron a recorrer hasta 8 km, con velocidades promedio entre 0.228 y 0.282 m/s (Tabla 3.3.4). La dirección general tomada por los derivadores fue suroeste, debido principalmente a que los vientos incidieron desde el norte y noreste (Figura 3.3.7). Se

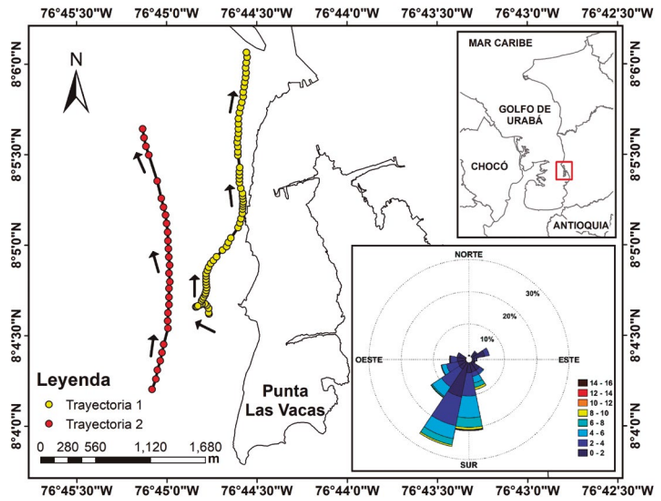
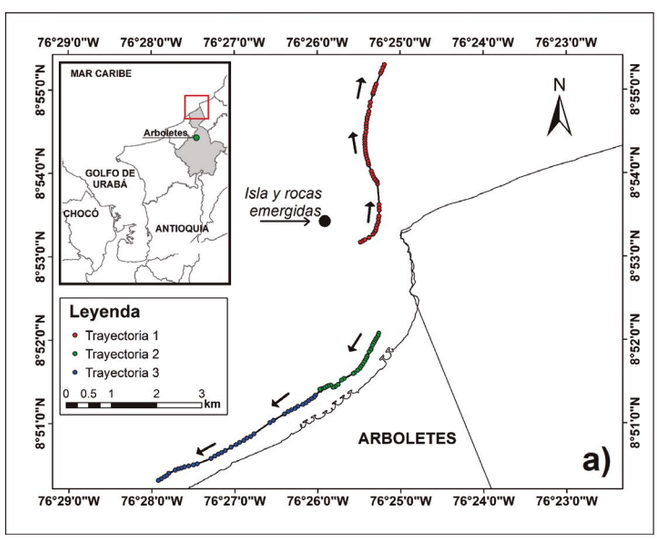


Figura 3.3.5 Trayectorias del derivador con draga, dirección del viento y curva de marea meteorológica original y desfasada; trayectoria 1 (07:08-13:42) y trayectoria 2 (14:07-16:41).

Fuente: Diseño propio. Los datos de viento fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad de Antioquia – sede Ciencias del Mar.



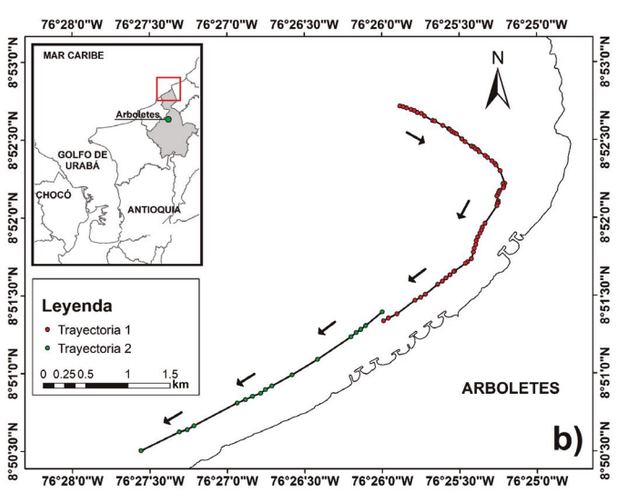


Figura 3.3.6 Trayectorias de los derivadores en Arboletes; a) derivador #1 y b) derivador #2.

Fuente: Diseño propio.

constató, además, que el río León tiene un rol importante en las trayectorias de los derivadores, dado que en el momento en que estos pasaron cerca de su desembocadura fueron advectados en la dirección de los flujos de desembocadura (noroeste), hasta salir de su zona de influencia; a partir de este punto el viento continuó como forzador principal, dirigiéndolos nuevamente hacia el suroeste.

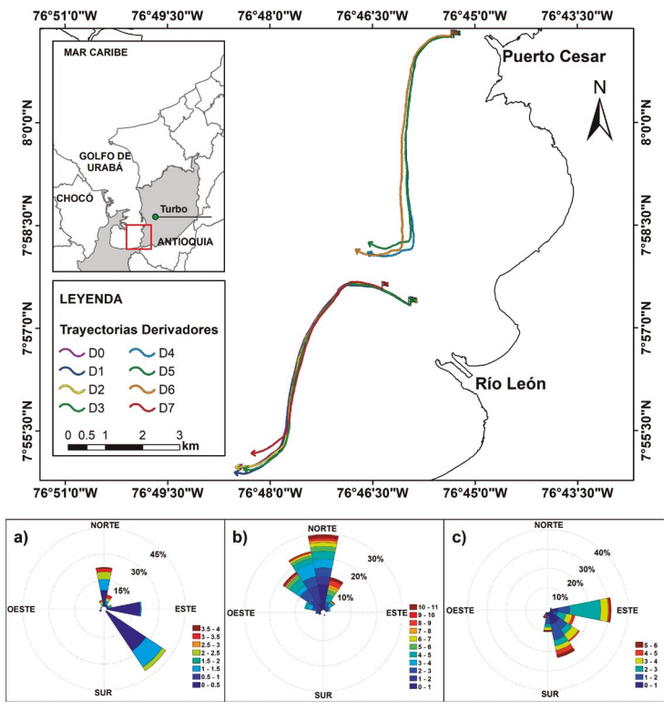


Figura 3.3.7 Trayectorias de los derivadores en la zona de fondeo *Alpha* – Turbo.

Fuente: Diseño propio.

Velocidad (m/s)	Derivador #1			Derivador #2	
	T1	T2	T3	T1	T2
Máxima	0,260	0,421	0,392	0,406	0,357
Mínima	0,123	0,036	0,173	0,032	0,210
Promedio	0,204	0,181	0,275	0,141	0,287

Tabla 3.3.3 Velocidades máximas, mínimas y promedio de los derivadores en Arboletes durante las diferentes trayectorias.

Fuente: Diseño propio, 2021.

	Derivador	Vel. Máxima (m/s)	Vel. Mínima (m/s)	Vel. Promedio (m/s)	Distancia (m)
ZONA 1	D0	0,352	0,162	0,278	8017,126
	D1	0,416	0,162	0,282	8196,340
	D2	0,704	0,158	0,279	8106,756
	D3	0,379	0,176	0,277	7945,340
	D7	0,353	0,12	0,261	6556,601
ZONA 2	D4	0,354	0,071	0,237	7676,237
	D5	0,342	0,088	0,228	7365,455
	D6	0,348	0,101	0,242	7722,45

Tabla 3.3.4 Velocidades máximas, mínimas y promedio y distancias recorridas por los derivadores en la zona de fondeo *Alpha* - Turbo.

Fuente: Diseño propio.

Sensor de presión

Con datos de las cuatro campañas de medición con sensores de presión en el municipio de Arboletes (Tabla 3.3.1), empezó a caracterizarse el comportamiento del oleaje, en términos de Hs, Tp y la onda de marea. En la primera campaña se lograron registrar alturas de ola hasta de 1.33 m, con periodos pico entre 3.88 y 12.54 s (Figura 3.3.8), dado que la medición se realizó en el tiempo correspondiente a la época climática seca.

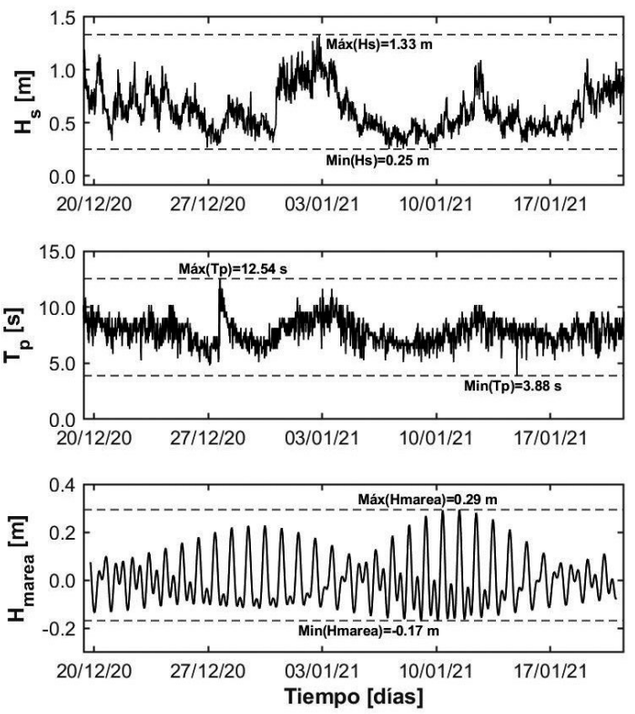


Figura 3.3.8 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 1 en Arboletes.

Fuente: Diseño propio.

En la segunda y tercera campaña se obtuvieron series de mediciones mucho más amplias que abarcaron parte de las dos épocas climáticas. Los resultados muestran claramente que en la época húmeda el oleaje no alcanza ni el metro de altura. En la época seca, cuando los vientos son mucho más intensos, se formaron olas que alcanzan hasta los 1.42 m de altura (Figura 3.3.9). Finalmente, en la cuarta campaña se registraron nuevamente datos de parte de la época húmeda, con y Hs y Tp hasta de 0.84 m y 10.19 s, respectivamente (Figura 3.3.10). Durante todas las campañas de medición, la onda de marea presentó sus mayores valores durante sizigia, con pleamares máximas de hasta 0.26 m y bajamares máximas de hasta 0.11 m (Figuras 3.3.8, 3.3.9 y 3.3.10).

A partir de la serie temporal registrada, se calculó la probabilidad conjunta entre Hs y Tp (Figura 3.3.11), donde los colores rojos corresponden a las combinaciones de Hs y Tp con mayor probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, cabe aclarar que aún hay

que continuar ampliando la serie de mediciones, para hacer análisis estadísticos más rigurosos y, que, a la vez, los datos sirvan de soporte para la calibración y validación de los modelos implementados por el componente de modelación.

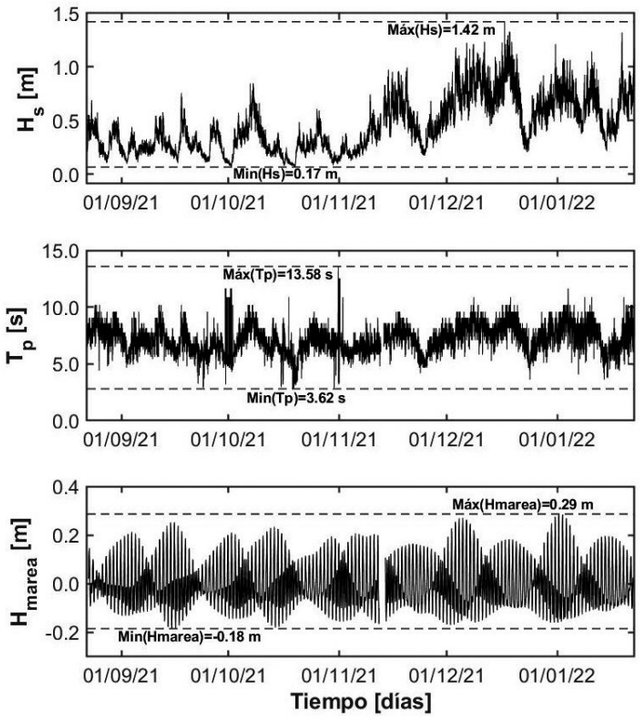


Figura 3.3.9 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 2 y 3 en Arboletes.

Fuente: Diseño propio.

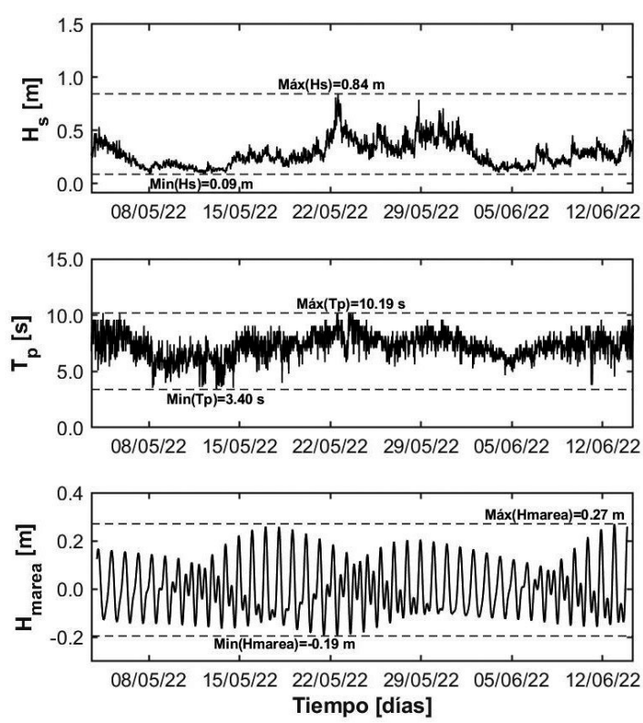


Figura 3.3.10 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico y marea para la campaña 4 en Arboletes.

Fuente: Diseño propio.

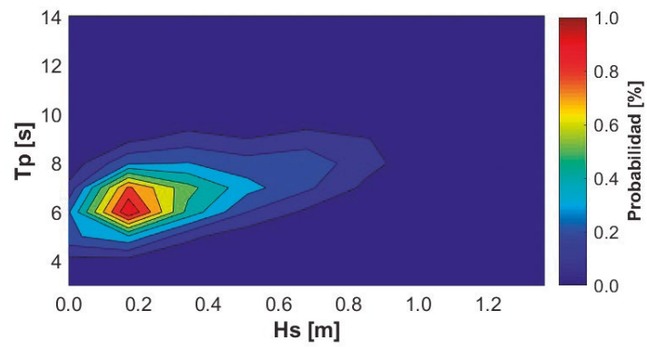


Figura 3.3.11 Probabilidad conjunta entre altura de ola significante y período pico.

Fuente: Diseño propio
MATLAB Handle Graphics

Correntómetro y perfilador acústico

Durante la primera campaña de medición desarrollada en Necoclí (Tabla 3.3.1), se usó un correntómetro que permitió medir Hs, Tp, y las direcciones del oleaje y de la onda de marea (Figura 3.3.12). Se encontraron valores pequeños para las alturas de ola (alrededor de los 0.2 m), con tres picos en la serie de medición que alcanzaron hasta los 1.26 m de altura, con periodos entre 4.35 y 10.06 s, característicos de oleaje tipo *sea.* Esto último se reafirma al analizar las direcciones de propagación del oleaje que resultan estar en todas las direcciones. Adicionalmente, se midieron la magnitud y la dirección de las corrientes a 10.5 m de profundidad (Figura 3.3.13) y se determinaron valores entre -0.35 y 0.48 m/s para la componente zonal y entre -0.26 y 0.28 m/s para la componente meridional.

En la segunda campaña se instaló un perfilador de corrientes para conocer el comportamiento del oleaje y de las corrientes en toda la columna de agua.

Se registraron alturas de olas entre 0.09 y 0.24 m, periodos mayores entre 11.7 y 21.9 s, con dirección predominante entre los 250° y 280° y alturas máximas de marea en pleamar de 0.22 m y bajamar de 0.07 m (Figura 3.3.14).

En cuanto a las corrientes, para el caso de la componente zonal, se registraron valores máximos hasta de 0.5 m/s entre los primeros 8 m de profundidad; se exceptúan algunos días en los cuales estas velocidades alcanzaron los 10 m.

En relación con la componente meridional, se constataron intervalos temporales, en los cuales se forma un flujo de tres capas, con valores de hasta 0.5 y 0.15 m/s en superficie y fondo, respectivamente, y una capa intermedia con valores entre 0 y -0.5 m/s (Figura 3.3.15).

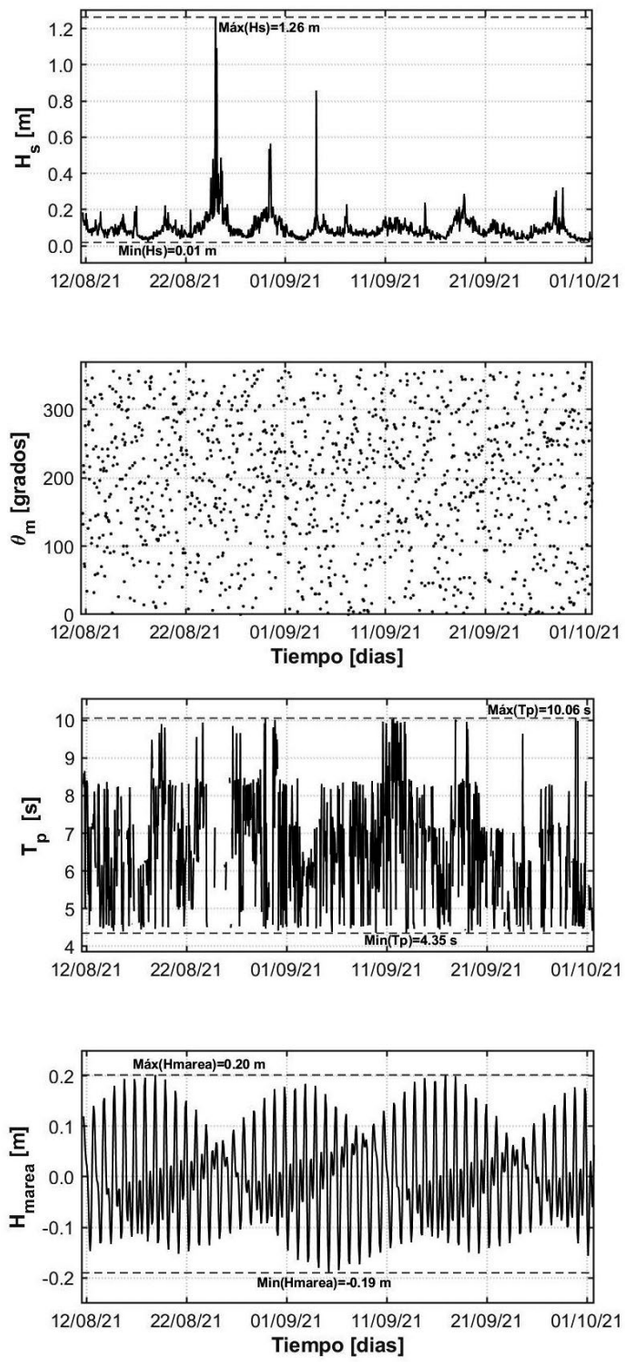


Figura 3.3.12 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico, dirección y marea para la campaña 1 en Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

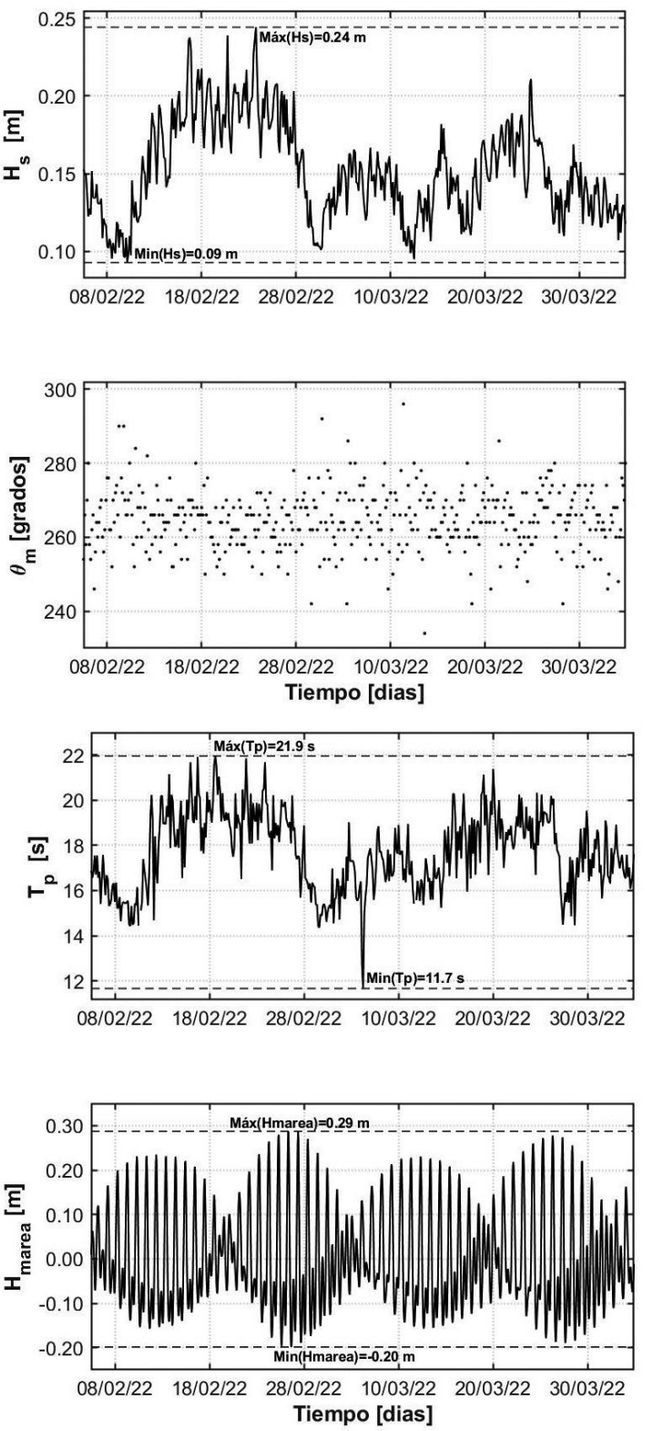


Figura 3.3.14 Serie temporal de la altura de ola significante, periodo pico, dirección y marea para la campaña 2 en Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

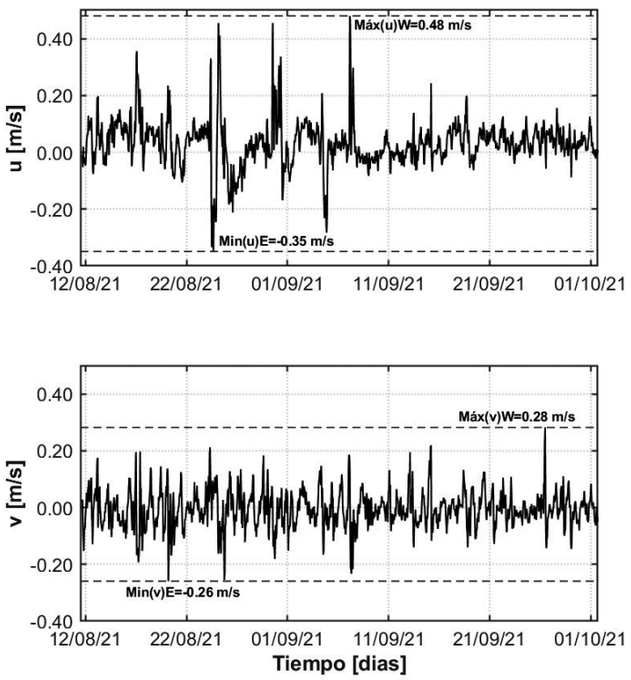


Figura 3.3.13 Serie temporal de las corrientes a 10.5 m de profundidad en Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

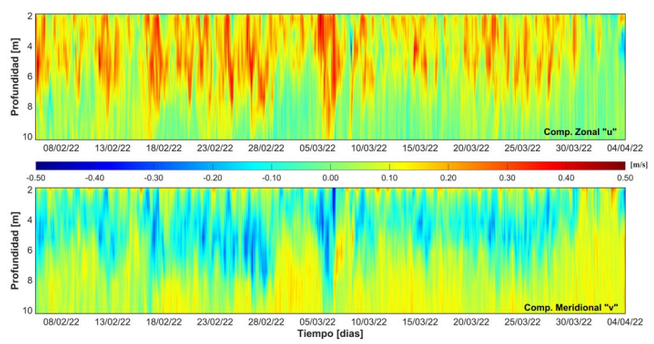


Figura 3.3.15 Serie temporal de las corrientes en la columna de agua en Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

3.3.4 Conclusiones

Las trayectorias de los derivadores con draga son mayormente influenciadas por la marea y por las corrientes de deriva, mientras que las trayectorias de los derivadores sin draga están principalmente influenciadas por el viento; estas últimas son útiles para describir las posibles trayectorias de hidrocarburos u otros fluidos con comportamiento similar (en relación con eventuales derrames o contingencias ambientales). Los resultados obtenidos por los derivadores impulsados con draga pueden usarse para medir corrientes superficiales (1 m de profundidad), como las corrientes de deriva.

La isla y las rocas emergidas en frente de punta Rey (Arboletes) generan fenómenos de reflexión, refracción y difracción del oleaje, induciendo un cambio importante en las características de las corrientes. Son necesarias más mediciones al respecto porque las corrientes de la zona pueden estar modulando parte de los procesos presentados en la zona de playa.

Tanto en época seca como en la húmeda, las alturas de ola fueron menores en Necoclí que en Arboletes, esto se explica debido, principalmente a la ubicación geográfica, ya que la zona de mediciones en Necoclí se encuentra "protegida" por la saliente costera de punta Arenas, mientras que el punto de medición en Arboletes se encuentra de frente al mar Caribe, en "mar abierto".

El monitoreo de los parámetros oceanográficos es de vital importancia para caracterizar la dinámica oceanográfica de una zona específica, y es también clave para la calibración y validación de los modelos numéricos que se están implementando en PIMECLA. En consecuencia, es necesario continuar ampliando las series de mediciones del proyecto para perfeccionarlas y aumentar su confiabilidad y utilidad en los procesos de toma de decisiones.

3.4 Monitoreo ciudadano: *CoastSnap*

A partir de los resultados obtenidos en PIMECLA se evidencia la necesidad de efectuar monitoreos continuos, por lo que surge la idea de implementar las estaciones *CoastSnap* en la zona. El objetivo de esta iniciativa es el análisis de los cambios de la línea costera por medio de la detección remota basada en imágenes, con un enfoque de participación ciudadana.

3.4.1 Metodología

CoastSnap es una iniciativa que monitorea la línea de costa con fotografías de smartphones tomadas por turistas o ciudadanos vecinos de la playa. Se posibilita entonces el mapeo de las playas, mediante el procesamiento posterior de las imágenes y la identificación continua de procesos fundamentales como la erosión y la evolución temporal de las líneas de costa.

Originalmente, la estrategia *CoastSnap* es consecuencia de los resultados obtenidos por Bracs et al. (2016), quienes demostraron que las cámaras de surf reutilizadas ofrecen una precisión razonable para la detección de los cambios morfológicos costeros, siempre y cuando se incluyan rectificaciones y calibraciones de corrección. Así pues, la idea se desarrolla desde el año 2017 y se consolida con el estudio de Harley et al. (2019), quien publicó los resultados obtenidos de la primera estación *CoastSnap* en Australia. En dicho trabajo se explican

todos los aspectos técnicos del método, incluyendo diseños, montajes, técnicas de procesamiento de las imágenes, ventajas, retos, y validación. Con posterioridad a su validación como metodología aceptable para estudios de línea de costa en la prueba piloto de 2017, la instalación de estaciones se ha extendido a otros países, incluyendo a Inglaterra, Fiji, Países Bajos, Estados Unidos, España, Portugal, Brasil, Argentina y Colombia (ver Figura 3.4.1). En Iberoamerica, la implementación y operatividad de las estaciones *CoastSnap* han sido parte del espectro de acción de la Red PROPLAYAS, y por lo tanto se cuenta con una sinergia entre diferentes investigadores que exploran la aplicación y comprensión de los resultados de esta herramienta.

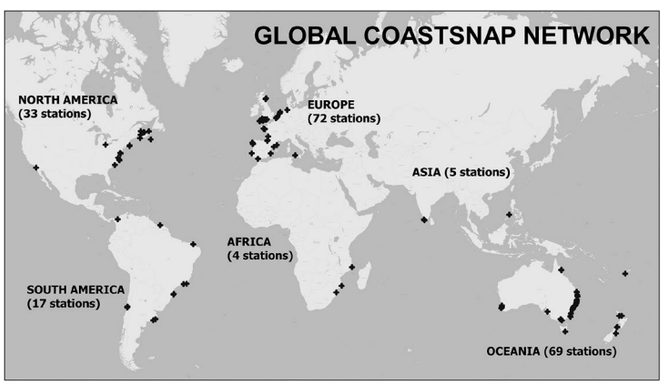


Figura 3.4.1 Estaciones *CoastSnap* instaladas a nivel mundial (200 estaciones hasta mayo de 2022). Tomado de Harley y Kinsela, 2022.

A nivel departamental, se implementaron estaciones *CoastSnap* en tres de los cuatro municipios del litoral antioqueño: Turbo, Necoclí y Arboletes. Sus especificaciones se presentan a continuación en la Tabla 3.4.1.

Municipio	Especificaciones	Coordenadas
Turbo	**Lugar:** playa Dulce **Tipo de predio:** privado **Observaciones**: establecimiento comercial de dos pisos llamado Blue Moon.	**Playa Dulce** N 8°05´43´´ W 76°44´27,6´´
Necoclí	**Lugar:** playa El pescador **Tipo de predio:** privado **Observaciones**: sobre segundo piso de una instalación del Hotel Punta Palmeras.	**Playa El pescador** N 8°25´16,4´´ W 76°47´16,6´´
Arboletes (laboratorio experimental)	**Lugar:** laboratorio costero **Tipo de predio:** privado **Observaciones**: se instalaron tres estaciones. Dos localizadas estrictamente en el lote de la universidad (#1 en el costado occidental y #2 en el costado oriental del acantilado), y una ubicada en el lote vecino, que tiene mejor perspectiva sobre el acantilado; alli mismo funciona una estación adicional con vista hacia río Hobo.	**#1** N 8°50´52,2´´ W 76°26´17,5´´
		#2 N 8°50´54,2´´ W 76°26´13,3´´
		#3 y rio Hobo N 8°50´52,4´´ W 76°26´19,1´´
Arboletes	**Lugar:** playa Arboletes **Tipo de predio:** público **Observaciones**: sobre baranda en la sección final del muelle turístico de municipio.	**Playa Arboletes #1** N 8°51´16,67´´ W 76°25´45,47´´
Arboletes	**Lugar:** playa Volcán **Tipo de predio:** público **Observaciones**: sendero que rodea la finca la Manuela.	**Playa Volcan #1** N 8°51´38,79´´ W 76°25´14,57´´

Tabla 3.4.1 Especificaciones de las estaciones *CoastSnap* instaladas en el litoral antioqueño.

La metodología presentada a continuación en la Figura 3.4.2, abarca desde la instalación de dichas estaciones hasta el post-proceso de las imágenes colectadas por los turistas o ciudadanos.

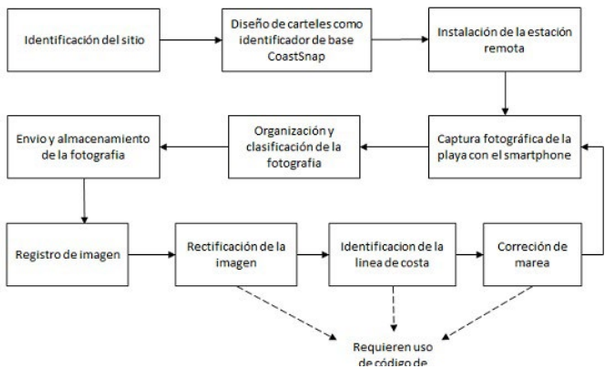


Figura 3.4.2 Diagrama paso a paso para el monitoreo de playas bajo la metodología *CoastSnap*.

Fuente: Diseño propio.

Las estaciones constan de tres elementos físicos principales: la estructura base, el cartel informativo y la cuna para el smartphone. En cada una de nuestras estaciones, los dos primeros elementos fueron diseñados según las características del sitio de instalación y de la playa a monitorear. La cuna (soporte) para los smartphones fue diseñada e impresa en plástico 3D y es estándar para todas las estaciones. Para el proceso de tratamiento de las fotografías se identificaron algunos elementos fijos en el terreno y se instalaron algunos puntos (principalmente en el Laboratorio Costero) base para la georectificación de las imágenes y, (posteriormente) la delimitación de la línea de costa y el análisis de sus cambios sucesivos en el tiempo.

3.4.2 Resultados

A continuación, se presentan las especificaciones físicas y diseños de las bases, los carteles, las redes sociales y los parámetros de instalación de cada estación.

Carteles: La información contenida en los carteles de cada estación es muy relevante en la comunicación con el turista. De su sencillez y comprensión dependerá en gran medida el interés de las personas en contribuir con el proyecto o no. Sin embargo, dado que se tienen unas estaciones aún experimentales y el público objetivo es de índole más académico, la información expuesta es más completa y técnica. En la Figura 3.4.4 se consigna el conjunto de carteles diseñados e instalados.

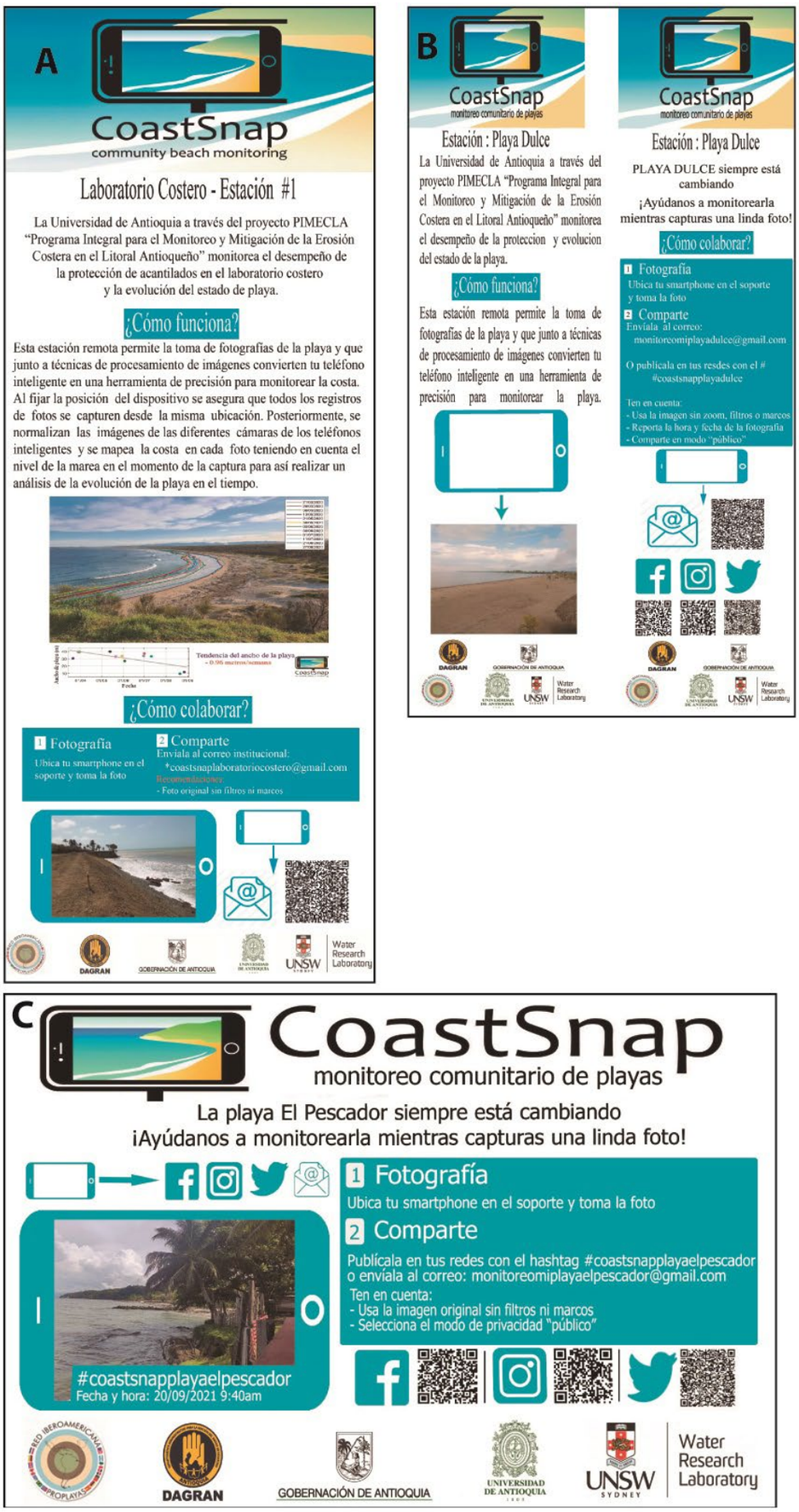


Figura 3.4.4 Carteles instalados en las estaciones *CoastSnap*.
A) cartel de estaciones #1, 2 y 3, en Laboratorio Costero, Arboletes; B) cartel de estación en playa Dulce, Turbo; C) cartel de estación en playa El Pescador, Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

Soportes Smartphones: Para ubicar los smartphones se construyeron dos tipos de soportes (Figura 3.4.3) mediante impresión 3D. El material es plástico y se recubrió de pintura con protección ultravioleta. Ambos soportes tienen rendijas abertura amplia para garantizar que las diferencias entre modelos de celulares no sean un problema para la captura de las fotografías. Los soportes tienen dos perforaciones en la parte media de la base para ser fijados con tornillos. Fueron impermeabilizados con cera.



Figura 3.4.3 Diseño y dimensiones (en cm) de las plataformas para dispositivos móviles.

Fuente: Diseño propio.

Estructuras para los soportes: Los diseños de las estructuras son muy variables y dependieron de la ubicación de la estación. Cuando se contó con alguna estructura previa (como un mirador, un muelle o un pasamanos) que permitiera la instalación del soporte para los smartphones, se solicitó el respectivo permiso. Cuando no, se diseñaron estructuras en madera, amigables con el paisaje y adecuadas para que los turistas tomen fotografías a alturas y ángulos apropiados. En la Figura 3.4.5 se presentan las estructuras de cada estación.

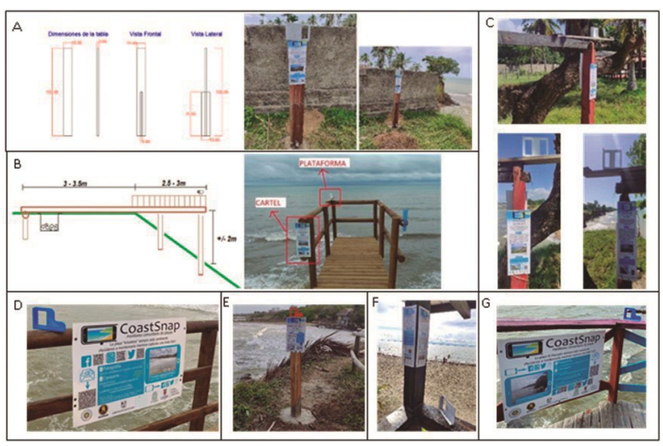


Figura 3.4.5 Diseños de las estaciones *CoastSnap* en Laboratorio Costero:
A) Estación #1; B) Estación #2; C) Estación #3 y río Hobo; D) Estación playa Arboletes #1; E) Estación playa Volcán, Arboletes #1; F) Estación playa Dulce, Turbo; G) Estación playa El Pescador, Necoclí.

Fuente: Diseño propio.

Parámetros de posición: Las plataformas se ubicaron de manera tal que permiten obtener fotografías oblicuas de las playas, manteniendo posición, ángulo y rango de visión fijos. Para cumplir con estos criterios fue necesario registrar los parámetros de coordenadas, inclinación (vertical), rotación (horizontal) y azimut (ángulo con respecto al norte – N), tal como se esquematiza en la Figura 3.4.6. Dichos valores son necesarios para procesar correctamente las imágenes. los parámetros de cada estación se presentan a continuación en la Tabla 3.4.2

Estación	Inclinación (°)	Rotación (°)	Azimut (°)
Laboratorio #1	-1	1	53
Laboratorio #2	-19	-7	264
Laboratorio #3	2	-1	78
Río Hobo #1	1	2	257
Arboletes #1	2	1	93
Volcán #1	1	1	47
Playa El Pescador	3	2	4
Playa Dulce	-1	1	308

Tabla 3.4.2. Ángulos para la parametrización de las estaciones instaladas.

Fuente: Diseño propio.

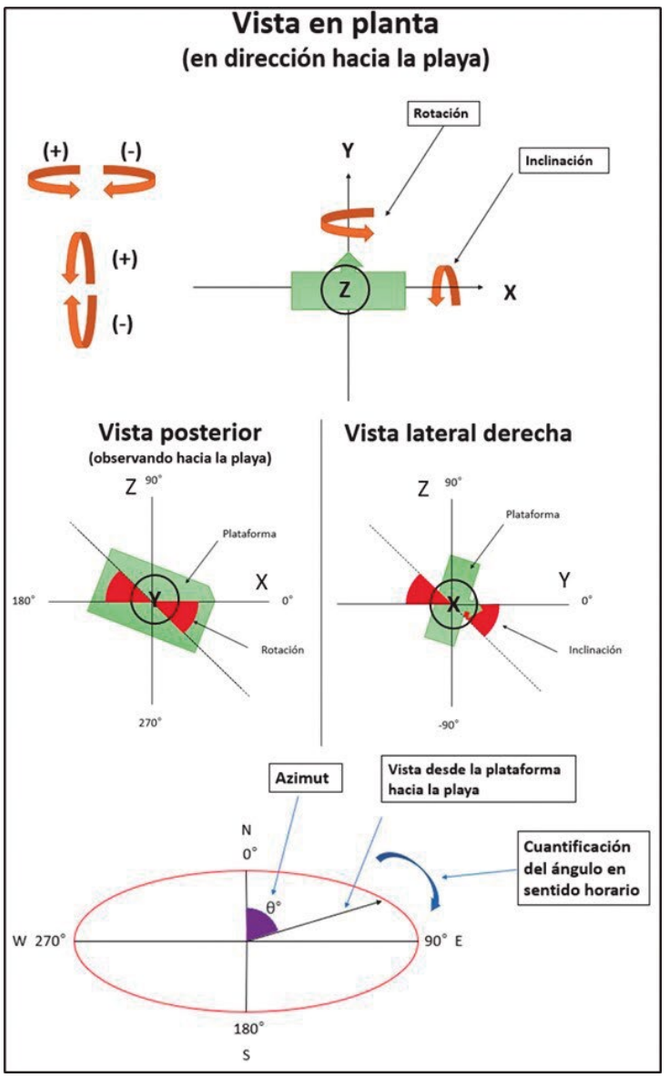


Figura 3.4.6. Principales parámetros de posición de las plataformas *CoastSnap*. Arriba: sentido y signos. Abajo: obtención del Azimut.

Fuente: Diseño propio.

Es importante aclarar que cada estación cuenta con un numero de, al menos, cinco puntos de control en el campo visual. Estos puntos pueden consultarse en los informes finales del proyecto que reposan en la Gobernación de Antioquia, o en la sede de Ciencias del Mar, de la Universidad de Antioquia, en Turbo.

3.4.3 Conclusiones

La instalación de estaciones *CoastSnap* se plantea como una metodología para aumentar la resolución temporal de los programas de monitoreo costero. Esta iniciativa promueve la inclusión de la comunidad en la obtención de información de línea base, necesaria para el conocimiento de la dinámica de cada playa, la toma de decisiones y la gestión de bienes y de servicios existentes. Además, el sistema de estaciones *CoastSnap* no requiere conexión eléctrica, y los costos de instalación y mantenimiento son muy bajos.

Mantener actualizada la información acerca de las experiencias del programa *CoastSnap* en otras partes del mundo permitirá mejorar la implementación del método en el litoral antioqueño. Además, la sinergia creada a nivel de Latinoamérica, en el marco de la Red PROPLAYAS permitirá la formulación conjunta de propuestas de investigación para el mejoramiento de la metodología, la comprensión del sistema costero y la participación ciudadana en la gestión de sus playas.

3.5 Referencias

Alcántara-Carrió, J., Caicedo, A., Hernández, J. C., Jaramillo-Vélez, A., & Manzolli, R. P. (2019). Sediment Bypassing from the New Human-Induced Lobe to the Ancient Lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). Journal of Coastal Research, 35(1). https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00221.1

Aristizábal, O., Betancur, J. y Vásquez, C. (1990). *Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, golfo de Urabá.* [Tesis doctoral]. Universidad EAFIT.

Barragán, J. M., y De Andrés, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean y Coastal Management*, 114, 11-20.

Bernal, G., Montoya, L. J., Garizábal, C. y Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 8(1), 123-135

Bracs, M. A., Turner, I. L., *Splinter*, K. D., Short, A. D., Lane, C., Davidson, M. A., Goodwin, I.D., Pritchard, T., y Cameron, D. (2016). Evaluation of opportunistic shoreline monitoring capability utilizing existing "surfcam" infrastructure. *Journal of Coastal Research*, 32(3), 542-554.

Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Stark, C. P., Casella, M., Ferrari, M., y Firpo, M. (2016). Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). Geo-Marine Letters, 36(2), 151-163.

CORPOURABA. (2018a). *Monitoreo de Playas para la Gestión del Riesgo Marino Costero en los Municipios de la Unidad Ambiental Costera del Darién*. CORPOURABA.

CORPOURABA. (2018b). *Inventario y Diagnóstico de las Obras de Protección Costera Establecidas en los Cuatro Municipios Costeros de Jurisdicción de la Unidad Ambiental Costera del Darién en el Departamento de Antioquia*. CORPOURABA.

Correa, I. D. (1992). *Erosión y sedimentación litoral de la línea de costa entre Turbo y Necoclí. Golfo de Urabá-Departamento de Antioquia* (Informe final). Universidad EAFIT.

Correa, I. D., Prüssman, J. y Garrido, A. E. (2010). *Geomorfología del contorno litoral Urabá–Darién, Departamento de Antioquia y Chocó, Caribe colombiano.* Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional Sede Medellín, Universidad EAFIT.

Correa, I., y Vernette, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes - Turbo) costa caribe colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 33(1), 07-28.

Franco, J. V. (1992). *Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe Colombiano, sector punta Caribaná – boca Tarena*. INGEOMINAS.

Gobernación de Antioquia y Universidad de Antioquia. (2019). Informe del proyecto: Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Harley, M. D., Kinsela, M. A., Sánchez-García, E. y Vos, K. (2019). Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering*, 150, 175- 189

Harley, M. D. y Kinsela, M. A. (2022) *CoastSnap*: A global citizen science program to monitor changing coastlines. Continental Shelf Research, 245

Hernández D.P., Romaña Y., Jaramillo-Vélez A., Pelegrí J. L., y Toro V. G. 2021 Patrones de circulación superficial sobre la plataforma interna entre bahía El Uno y punta de Las Vacas, golfo de Urabá, Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR,* 50(2), 9-30.

Jaramillo-Vélez, A. (2016). *Panorama de la erosión costera en el Golfo de Urabá. Evidencia de la necesidad de un programa de monitoreo costero regional*. [Memorias]. VIII Congreso Iberoamericano de Control de Erosión y Sedimento, Cartagena de Indias, Colombia.

Komar, P. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*, (2a ed.). Prentice Hall.

Osorio, A. F., Ortiz C. A., Perez, J. C., y Medina R. (2010). *Monitoreo Marino-Costero y fluvial basado en cámaras de video*: *evolución del proyecto HORUS"*, Cuadernos del Caribe, 8(14), pp. 35-48

Osorio, A., Pérez, J., Ortiz-Alarcón, C. y Medina, R. (2008). *Horus*: *sistema de vídeo para cuantificar variables ambientales en zonas costeras.* XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia.

Paniagua, J. F. A. (2013). *Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar.* [Tesis doctoral]. Universidad EAFIT.

Posada, B. O., Morales Giraldo, D. F. y Henao Pineda, W. (2011). *Diagnóstico de la erosión costera del territorio insular colombiano*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives De Andréis" - INVEMAR.

Posada, B., & Henao, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano.* INVEMAR.

Posada, B.O., W. Henao Pineda y G. Guzmán Ospitia. (2009). *Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano*. Invemar, Santa Marta. 148 p.

Velásquez, N. (2000). *Geomorfología y Dinámica en el Urabá Chocoano. Sector: Cabo Tiburón – Bahía Acandí.* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Colombia.



Implementación de soluciones a escala natural

CAPÍTULO

4°

PIMECLA

Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 4°

Implementación de soluciones a escala natural

Autores:

Isabel Cristina López Genes.

Kisay Yusira Vargas Coa.

Esneider Julio Bravo.

Rosalyn Hoyos Gutiérrez.

Javier Andrés Venegas Ojeda.

Carlos Alberto Palacio Tobón.

Vladimir G Toro Valencia.

4.1 Introducción

En los litorales ocurren procesos erosivos cuando el balance sedimentario se encuentra en desequilibrio y se originan déficits que determinan pérdidas persistentes de terrenos (Serrato et al., 2011). Como alternativas a las obras tradicionales, a menudo de alto impacto, las obras blandas combinan medidas de adaptación y mitigación muchas veces exitosas. Son un buen ejemplo las obras blandas basadas en el funcionamiento de los ecosistemas, que aúnan principios de la ingeniería y de la ecología, contribuyen a la defensa costera y establecen condiciones para la creación de hábitats nuevos. Lo anterior permite en muchas ocasiones una solución regional más sostenible y rentable para encarar problemas ambientales costeros (Temmerman et al., 2013). En algunos lugares, la vegetación costera es capaz de absorber y disipar energía de las olas y atrapar sedimentos erosionados de suelos no consolidados (Yin et al., 2018). Otro aspecto importante de la vegetación es la cohesión adicional que confieren las raíces al suelo, formando una especie de "malla" que depende de la densidad y arquitectura radicular (Mao et al., 2012); en consecuencia, varía con las especies, sus características morfogenéticas y con la estructura del suelo (Bischetti et al., 2009). Las especies nativas están muy bien adaptadas al medio al cual pertenecen y, por lo tanto no requieren mucho mantenimiento. Algunas desarrollan un sistema de raíces extensivo, lo cual es básico para la restauración de áreas erosionadas como escarpes. Adicionalmente, estas plantas desarrollan una comunidad sucesora uniforme que mantiene el balance ecológico a través del tiempo (Alvarado y Zúñiga, 2018).

4.2 Área de estudio

El área de estudio se ubica al sur del municipio de Arboletes, departamento de Antioquia. Corresponde al área del Laboratorio Costero, de la Universidad de Antioquia, cuya línea de costa se define por un talud entre 8 m y 10 m de altura, (acantilado activo) perfilado a 35°, con una longitud de 100 m y un área de 1500 m². La geomorfología de la zona se caracteriza por terrazas marinas de hasta 35 msnm. limitadas hacia tierra y hacia el mar, por paleo acantilados y acantilados activos respectivamente. La franja litoral del sector de Arboletes está sometida a un proceso erosivo que alcanza tasas de hasta 47 m/año, influenciado por las características físicas, la dinámica marina, las transformaciones antropogénicas históricas y los fenómenos geológicos de diapirismo de lodos (Paniagua y Correa, 2012). El clima es influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que determina dos épocas climáticas diferenciadas por cambios en los patrones de lluvias y vientos (Restrepo y López, 2008). Según la zonificación ecológica, esta región está dominada por bosques secos tropicales y presenta también llanuras con pastizales arbolados, con una composición florística simple de palmas de varias especies (Acevedo-Quintero et al., 2011).

4.3 Soluciones adaptativas

4.3.1 Experimento de espolón temporal

Con el objetivo de evaluar el efecto de un espolón en la dinámica costera y de conocer el tipo de sedimentos retenidos, se diseñó un experimento consistente en la instalación de un espolón temporal. Para su ejecución, se determinó la ubicación en la cual se instalaría la estructura, teniendo en cuenta que fuera una zona de fácil acceso y que tuviera al menos 10 m de longitud de playa para maniobrar sin problema el armado de la estructura. Inicialmente, se planeó simular el espolón usando andamios de construcción con tableros de madera en uno de sus costados, para crear el depósito de los sedimentos que viajan en dirección paralela a la línea de costa, y así, posteriormente, iniciar estudios de laboratorio que permitieran conocer la granulometría de los sedimentos. La idea preliminar era construir un espolón de 14 metros de longitud con un total de siete módulos de andamios. El primer día de instalación se ubicaron

tres de ellos (Figura 4.3.1), pero debido a que las condiciones climáticas no permitieron armar los restantes, se decidió instalar los cuatro restantes el día siguiente. Sin embargo, esto no fue posible porque se encontró a la estructura instalada el día anterior totalmente destruida a causa del fuerte oleaje que se presentó durante la noche. Se realizó otro intento de instalación, que tampoco fue exitoso. Por lo anterior, se concluyó que la dinámica del sitio es demasiado intensa (al menos durante esos días) para la práctica



Figura 4.3.1 Instalación de los primeros cuerpos de andamio.
Fotografía: Sandra María Echeverri G, 2021.

En el intento de captar sedimentos transportados por la corriente de deriva del lugar, se modificó el montaje de las estructuras de andamio, instalando en ellas trampas de sedimentos (Figura 4.3.2), pero tampoco funcionaron adecuadamente.



Figura 4.3.2 Trampas de sedimento instaladas en andamios.
Fotografía: Isabel López, 2021.

4.3.2 Experimento de barreras permeables

Siguiendo, en términos generales, la metodología de Winterwerp et al., (2020), se diseñó un nuevo experimento para el montaje de una barrera permeable. Con el objetivo de disipar la energía del oleaje incidente y promover el depósito de sedimentos. Esta barrera se conforma haciendo hileras con varas de guadua en la zona sumergida de la playa, enterrándolas 1/3 de su longitud total, posteriormente se amarran postes de guadua de forma horizontal para darle estabilidad a las hileras y, finalmente, se llenan las hileras con madera de playa debidamente organizada y amarrada, de esta forma el oleaje incidente disipa su energía al llegar a esta configuración, propiciando una zona de calma y por lo tanto, depósito de material sobre el lado opuesto de la barrera. Debido a que en Arboletes y zonas cercanas no es posible conseguir guaduas con las especificaciones propuestas por Winterwerp et al., (2020), se tomó la decisión de utilizar postes de pino inmunizado como pilares de la barrera, estos postes tenían 1.5 metros de longitud y 9 centímetros de diámetro. Adicionalmente, se construyeron dos configuraciones diferentes de la estructura: la primera configuración se construyó siguiendo al pie de la letra los lineamientos propuestos por Winterwerp et al., (2020); por otro lado, la segunda configuración consistió en una barrera lineal de postes, sin relleno y sólo cubierta por polisombra (Figura 4.3.3).

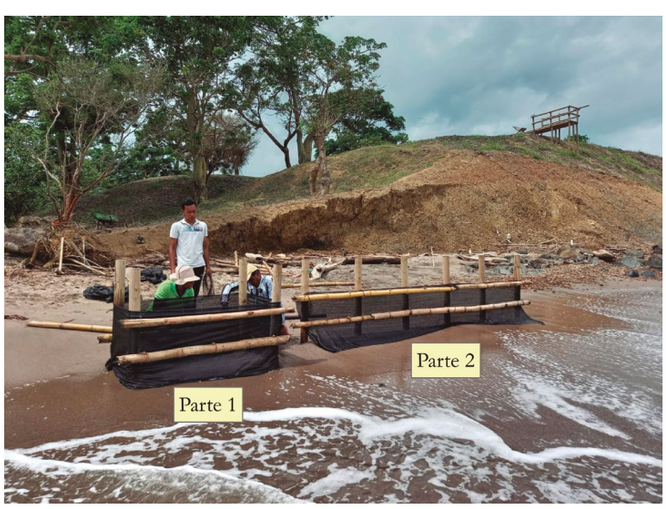


Figura 4.3.3 Montaje experimento de barreras permeables.
Fotografía: Isabel López, 2022.

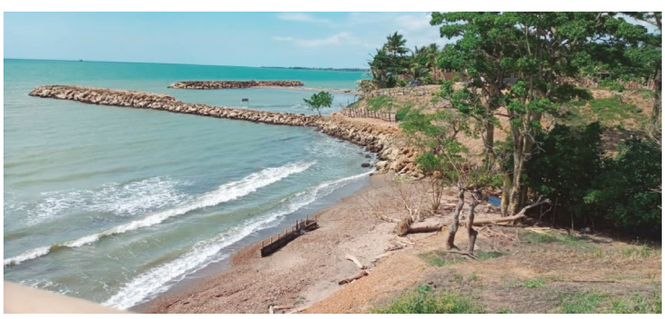
De este modo se compararían los resultados con dos diferentes tratamientos. Adicionalmente, se ubicó una base de *coast snap* sobre un deck que permite tener una visión amplia hacia el punto de intervención, esto con el fin de efectuar un monitoreo periódico de

las estructuras instaladas, este monitoreo se ejecutó tomando fotografías diarias durante dos semanas. La evolución observada mediante fotografías tomadas desde la base mostró acumulación detrás de los dos tipos de estructura, lo que permite pensar en ejecutar este tipo de metodologías con el propósito de mitigar el impacto de las olas, en diferentes playas. En las Figuras 4.3.4A y 4.3.4B se muestra la evolución del depósito entre el cuatro y siete de mayo de 2022 (fotografias tomadas desde la base).



Figura 4.3.4A Playa el 4 de mayo de 2022.

Fotografía: Isabel López, 2022.



4.3.4B Depósito de sedimentos el 7 de mayo de 2022.

Fotografía: Isabel López, 2022.

4.3.3 Conclusiones

Los experimentos realizados permitieron evaluar métodos y técnicas de trabajo, y evaluar alternativas de solución a la erosión costera.

El experimento de espolón temporal no tuvo un resultado positivo debido a las condiciones naturales del lugar durante su tiempo de ejecución. Por esta razón se descartaron experimentos de este tipo en el Laboratorio Costero.

La estructura implementada como barrera permeable sí dió un buen resultado que ha permido pensar en este tipo de estructura para generar posible acumulación en playas. Al ser permeable, disipa la energía y permite el paso de sedimentos y promueve su depósito. Se posibilita, además, la participación de la comunidad, con las labores de vigilancia y de mantenimiento de la estructura.

4.4 Soluciones basadas en la naturaleza

4.4.1 Metodología

El proceso de revegetalización con la especie *Brachiaria decumbens* fué manual, con semillas dispuestas a lo largo de un tramo de 90 m de línea de costa. Se escogió esta especie de gramínea por su fácil crecimiento y por su resistencia a condiciones de acidez en los suelos y en periodos de sequía. El objetivo de la siembra fue garantizar una protección inicial del terreno ante el impacto de los cambios, en temporadas climáticas sobre la cara del talud. Como desarrollo experimental para la revegetalización se seleccionaron especies vegetales que cumplieran con requisitos, tales como pertenecer al grupo de las herbáceas, no ser megaforbias, de preferencia perennes, y estar bien establecidas y representadas en la zona de estudio. Se examinó el sistema radicular de las especies encontradas y se seleccionaron las dos con mayor potencial e interacción ecológica interespecífica; *Mimosa pudica y Rhynchospora colorata*. Posteriormente, se colectaron las especies en medio silvestre (ver Figura 4.4.1), conservando sus sistemas radiculares y parte del sustrato original para establecer un vivero. En este se monitoreó el crecimiento de las plantas durante un periodo de 30 días previo a la siembra definitiva, para asegurar una mayor supervivencia.



Figura 4.4.1 Especies seleccionadas para revegetalización del talud: R. colorata (A) y M. pudica (B).

Fuente: Javier Venegas.

El establecimiento de parcelas experimentales se realizó en una zona comprendida en diez metros lineales de la corona del talud intervenido, en el cual no se sembró *B. decumbens*; para ejecutar este experimento, se sembraron las especies nativas seleccionadas, adaptándose la metodología de Alvarado y Zúñiga (2018) a las condiciones costeras y objetivos de la experimentación. Se establecieron ocho parcelas en la franja superior del talud y ocho parcelas en la franja inferior, todas ellas de 1 m x 1 m. Cada parcela contó con diez plantas y una réplica del arreglo. Los arreglos fueron los siguientes: dos parcelas con *M. pudica*, dos parcelas con *R. colorata*, dos parcelas con una mezcla de cinco individuos de cada especie; se establecieron además dos parcelas de control, sin vegetación. En las parcelas se incluyeron 60 individuos de *M. pudica* y 60 de *R. colorata,* para un total de 120 plantas sembradas (ver Figura 4.4.2).

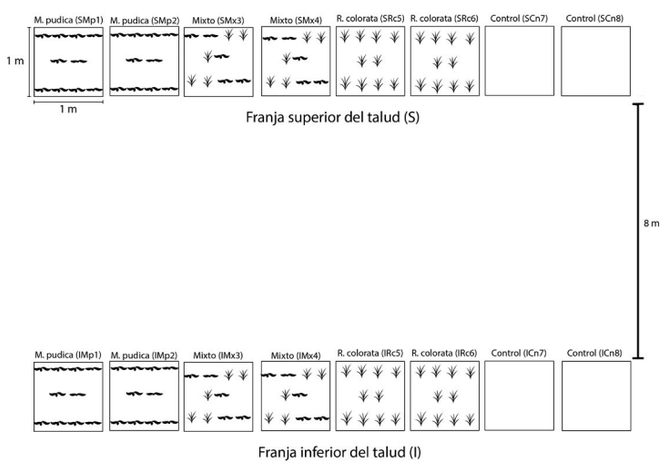


Figura 4.4.2 Esquema de revegetalización del talud con especies nativas. Las imágenes incluidas son representaciones simbólicas sin escala.

Diseño: Rosalyn Hoyos-Gutiérrez y Javier Venegas (2021).

Se colectaron muestras representativas de suelo, en la parte inferior y superior del acantilado, para analizar en laboratorio las siguientes propiedades: fertilidad, micronutrientes, salinidad, pH y granulometría. Estos análisis tuvieron como finalidad conocer la composición característica del suelo, determinar la compatibilidad con la vegetación a sembrar, y evaluar el establecimiento y permanencia de las plantas.

4.4.2 Resultados

Pasados seis meses desde la siembra del pasto *B. decumbens* en el talud, se observó una sobrevivencia superior al 75%, y una altura promedio de 40 cm de la estructura aérea. La presencia de cárcavas en el suelo con cobertura de *B. decumbens*, indica la necesidad de establecer especies rastreras capaces de atrapar el sedimento que se lava durante la erosión laminar o por rodamiento. Esto puede complementarse con el uso de geotextiles. Para un tiempo de ocho días en el vivero se obtuvo un porcentaje de supervivencia del 17% y 80% de *M. pudica* y *R. colorata*, respectivamente. Posteriormente, se realizó una nueva siembra, en la cual se mejoró el proceso de extracción y se aumentó la humedad del sustrato, lo cual derivó en un aumento de la supervivencia del 100% en ambas especies, pasados 15 días del retrasplante. Finalmente, luego de 45 días se observa un crecimiento de la estructura aérea en ambas especies, indicación de una buena adaptación a las condiciones del medio. Durante el establecimiento de parcelas experimentales en el talud, las plantas fueron sembradas en dos intervalos de ocho días, para un total de 16 días de periodo de siembra. En este tiempo algunas plantas sufrieron el efecto del estrés por el trasplante y por las condiciones climáticas difíciles que se presentan en la línea de costa. Debido a esto, fue necesario reemplazar algunas plantas afectadas que no estaban en buenas condiciones o habían muerto. Los porcentajes definitivos de sobrevivencia fueron: 50% para *M. pudica* y 67% para *R. colorata.*

Los análisis químicos del suelo mostraron niveles bajos en el contenido de materia orgánica (MO) del suelo, con porcentajes de 0.32% para la parte superior y 0.02% para la parte inferior del talud. La zona superior de este presentó valores de pH casi neutro (6.6 - 7.3) y la parte inferior medianamente alcalina (7.4-8.0). Se hallaron valores inadecuados de Hierro >40 mg/kg (40.93 – 78.06 mg/kg) y niveles tóxicos de Boro >0.20 mg/kg (0.37 – 0.42 mg/kg). Respecto a la granulometría, la parte inferior del talud se determinó como una clase textural moderadamente fina tipo Francoarcilloarenosa (FArA), mientras su zona se clasificó como Francoarcillosa (FAr) (Ver Tabla 4.4.1).

Ubicación de la muestra	Textura					%			cmol (+) /kg					mg/kg					
	A%	L%	Ar%	CTx	pH	pW	MO	CO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Zona superior del talud	35	35	30	FAr	7	3,51	0,33	0,19	N.A.	13,36	7,83	0,2	21,39	2,2	40,93	9,4	1,34	0,47	0,37
Zona inferior del talud	49	23	28	FArA	8	4,26	0,02	0,01	N.A.	22,49	17,16	1,34	40,99	N.D.	78,06	7,95	1,61	0,96	0,42

Tabla 4.4.1 Resultados análisis de suelo, área de estudio franja inferior y superior.

Fuente: Diseño propio.

4.4.3 Conclusiones

Algunos micronutrientes se encontraron en cantidades inadecuadas, por ello pueden provocar un efecto tóxico sobre la vegetación. *M. pudica*

y *R. colorata* tuvieron porcentajes aceptables de supervivencia en las parcelas del talud y en vivero, siendo *R. colorata* la que mayor valor obtuvo. De lo anterior se concluye que estas especies nativas tienen potencial para ser utilizadas en la revegetalización de taludes de las zonas costeras del área. Los datos obtenidos indican que la MO disponible en la zona es muy baja y esto puede deberse a que el pH (7 – 7.8) limita su solubilidad, y acelera la mineralización de la MO. La parte inferior del talud con clase textural FArA, con exceso de carbonatos y una baja solubilidad de Fósforo, no tiene las condiciones adecuadas para el crecimiento de algunos tipos de plantas.

4.4.4 Referencias

Acevedo-Quintero, J. F., Granada, D. S. y Plese, T. (2011). Abundancia y preferencia de hábitat de Bradypus variegatus y Choloepus hoffmanni durante la época seca en dos fragmentos de bosque seco en Arboletes, Antioquia, Colombia. Edentata, 12(1), 36-44.

Alvarado-García, V. y Zúñiga-Amador, M. A. (2018). Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica. La Calera, 18(30), 39–47.

Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Epis, T. y Morlotti, E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. Plant and Soil, 324, 71-89.

Mao, Z., Saint-Andre, L., Genet, M., Mine, F. X., Jourdan, C., Rey, H., Courbaud, B. y Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models. Ecological Engineering, 45, 55-69.

Paniagua, J. F. y Correa, I. D. (2012). Predicción de las magnitudes de retroceso de algunos sectores acantilados de Antioquia en condiciones de ascenso del nivel del mar–Resultados para el sector de Arboletes. [Ponencia]. XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia.

Restrepo, J. D. y López, S. A. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. Journal of South American Earth Sciences, 25, 1-21.

Serrato, F. B., Tirado, E. R., Brotóns, J. M. y Romero, A. (2011). Erosión de playas en el sistema litoral de Martina de Cope (Murcia), por la disminución de aportes derivada de la ocupación agrícola de las ramblas. En: Montoya, I., Rodríguez, I. y Sánchez, M.J. (Eds.), Avances en Geomorfología Litoral. 155-158.

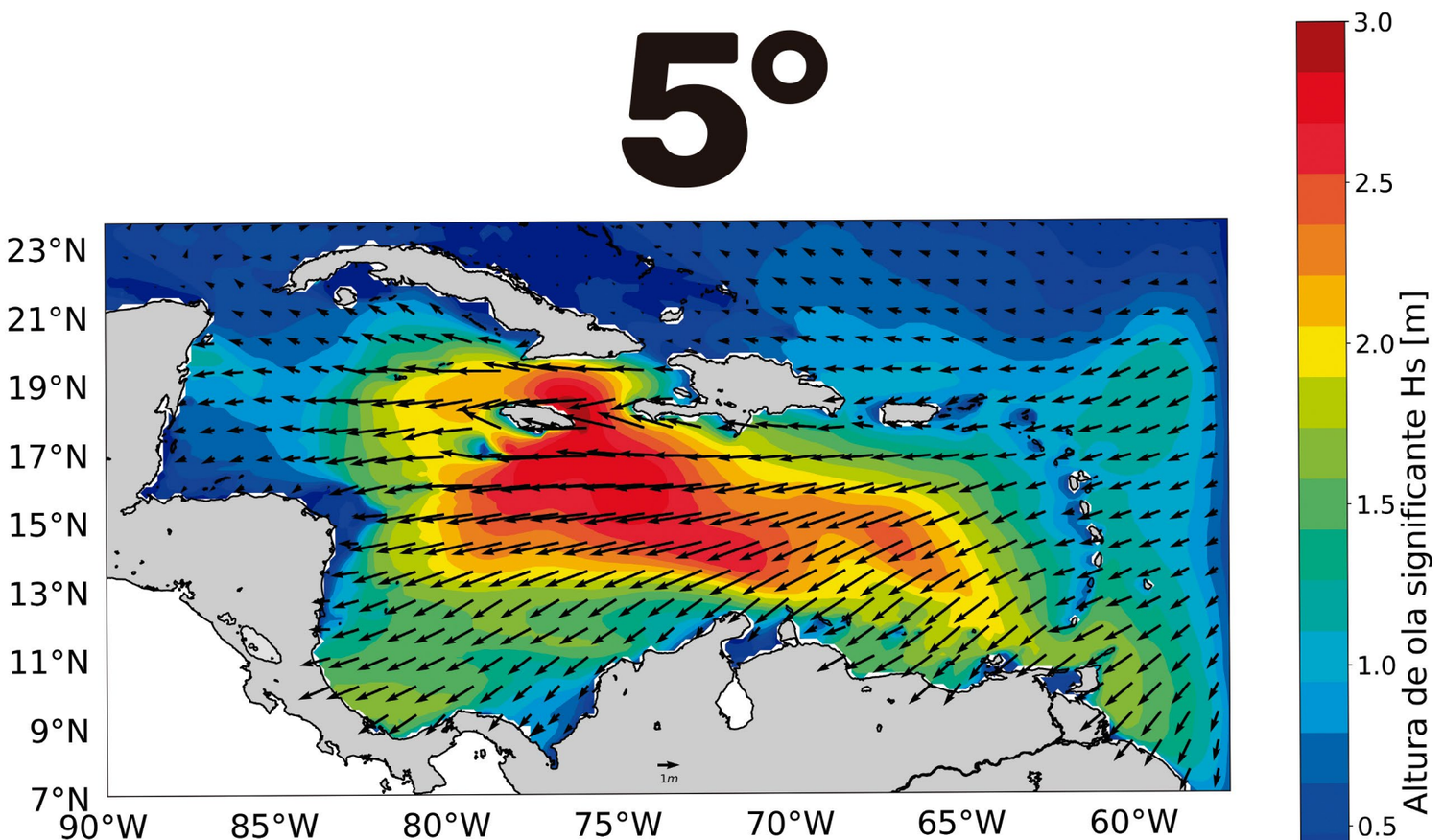
Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M. J., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. Nature, 504(7478), 79–83.

Yin, Z., Yang, X., Liang, B., Jin, L. y Ma, L. (2018). Experimental Investigation of Wave Attenuation through Flexible Plants on a Flat Bed. Journal of Coastal Research, 34

Winterwerp, J. C., Albers, T., Anthony, E. J., Friess, D. A., Mancheño, A. G., Moseley, K., Muhari, A.,

CAPÍTULO

5°



Modelación Numérica

PIMECLA
Programa Integral para el Monitoreo
y Mitigación de la Erosión Costera
en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 5º

Modelación Numérica

Autores
Víctor José Saavedra Mejía.
Alba Cecilia Bustamante Caro.
Luis Alfredo García Oquendo.
Giner Andrey Jiménez Ruiz.
Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera.
Isabel Cristina López Genes.
Juan Guillermo Torres Córdoba.
Diomer Eliecer Tobón Monsalve.
José Manuel Zapata Pico.
Carlos Alberto Palacio Tobón.
Vladimir G. Toro Valencia.

5.1. Introducción

La erosión del litoral, es un proceso dinámico localizado en la transición tierra agua en las costas del mundo. En muchas ocasiones es un proceso natural, y en otras, causado o acelerado por la acción del hombre. Las sociedades humanas costeras son un factor de mucha relevancia en los procesos de erosión, debido a las intervenciones en las interacciones naturales entre el mar y la tierra. Una sociedad con una adecuada cultura marítima puede propiciar impactos positivos en la estabilidad de la playa; de lo contrario, puede convertirse en un factor protagonista de la aparición y el aumento de la erosión.

La erosión costera se convierte en un problema cuando aparece el riesgo, es decir, cuando se genera una amenaza y hay vulnerabilidad. Por lo general, las amenazas están asociadas a regímenes de oleaje, niveles de marea y de vientos, y las vulnerabilidades a circunstancias sociales. Debido a lo anterior, los gobiernos, apoyados en conocimientos técnicos y científicos, tratan de minimizar los riesgos, evaluando diferentes alternativas y, valorando entre ellas las más viables, enfocándose en aspectos económicos, sociales, ambientales y técnicos. En sí, entender las causas asociadas a la erosión costera requiere de un proceso continuo, de mediano y largo plazo.

Dicho lo anterior, se requieren herramientas adecuadas de monitoreo de los procesos erosivos, que permitan el conocimiento de esas dinámicas, para lograr entender qué sucede específicamente en un área determinada. Esto, en vista de que no todos los procesos de erosión se deben a las mismas causas y cada región tiene comportamientos diferentes, ya sea por variaciones geológicas (y granulométricas), ubicación de las zonas de rompientes a diferentes distancias, diferencias en las batimetrías, diferencias en los patrones de oleaje de una zona a otra, al igual que los campos de vientos y niveles de marea.

En las últimas décadas ha ganado importancia la modelación numérica (proceso matemático que aplica análisis numérico para resolver ecuaciones físicas con la ayuda de la computación) como una poderosa herramienta para entender y predecir el proceso de erosión costera. En este capítulo se exponen resultados de la modelación numérica aplicada a los litorales del departamento de Antioquia, en el marco de PIMECLA, particularmente en los municipios de Arboletes y Necoclí. Los resultados se enfocan en el proceso de transporte debido a la deriva litoral, aunque también se exponen algunos resultados de oleaje en el Caribe, ya que mucha de esa energía llega al golfo de Urabá y es propagada hacia las costas del departamento de Antioquia.

5.2. Metodología

Se seleccionó como área de estudio principal para ejecutar las simulaciones la zona alrededor de la cabecera municipal del municipio de Arboletes, y en algunos casos, la zona alrededor de la cabecera municipal del municipio de Necoclí. En la Figura 5.1 se observan los municipios costeros del Urabá antioqueño, y en la Figura 5.2 la zona de estudio para la modelación, alrededor del municipio de Arboletes.

Los municipios del departamento con zonas costeras (golfo de Urabá) son, de sur a norte: Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes (Figura 5.1). El golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado en la costa Caribe colombiana, en cercanías a la frontera entre Colombia y Panamá.

Las interrelaciones entre las dinámicas atmosféricas, oceanográficas y costeras del golfo de Urabá son complejas y cambiantes estacionalmente. Para su debida comprensión, son necesarios estudios particulares de los campos de vientos, de oleaje, y de circulación. También, es fundamental el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua, del transporte y de la concentración de sedimentos, y la adquisición de datos atmosféricos.

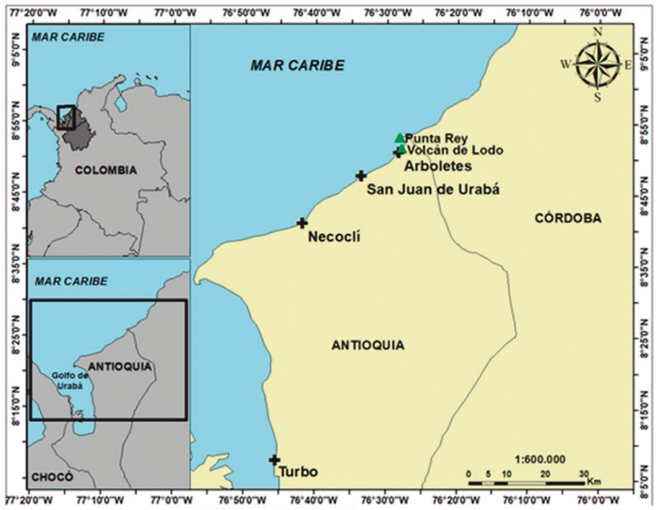


Figura 5.1 Área de estudio: Ubicación municipios del Urabá antioqueño.

Fuente: Diseño propio.



Figura 5.2 Municipio de Arboletes. Volcán de lodo y punta Rey.
Fuente: Diseño propio.

El paso de la Zona de Convergencia Intertropical por el golfo de Urabá, en combinación con las grandes corrientes de vientos ocasionadas por la rotación terrestre, afecta y dinamiza la circulación oceánica en el golfo. Los vientos alisios del noreste ingresan a través del mar Caribe durante la época seca y pueden alcanzar velocidades de hasta 10 m/s. En esta época (meses de diciembre a abril) las precipitaciones son de máximo 100 mm/mes. Por otro lado, en época húmeda, los vientos provenientes del Pacífico son encauzados hacia el golfo por la cuenca del rio Atrato, en direccion sur-norte, y pueden alcanzar velocidades de 4 m/s; en este periodo (meses de mayo a noviembre) se presentan precipitaciones de hasta 250 mm/mes (Lozano, 1998). Se ha encontrado que las direcciones de los vientos provienen del norte en época seca y, del sur en época húmeda.

La descarga de los ríos es otro factor modulador de la circulación del golfo de Urabá (Roldán, 2008). Según Higuita y Quintana, (2020), las corrientes del golfo están moduladas principalmente por las llegadas de los ríos, en especial la del río Atrato. La onda de marea no es muy significativa como forzadora de la hidrodinámica; en el estudio de Higuita y Quintana (2020), se encontraron valores del coeficiente de variación local (CVL) mínimos de 1% y máximos de 5%, aproximadamente.

Dejando atrás unas particularidades muy específicas del golfo, se describe en la Figura 5.3, la ruta metodológica aplicada, es decir, los métodos y procesos seguidos para la ejecución de los modelos numéricos en el área de estudio indicada.

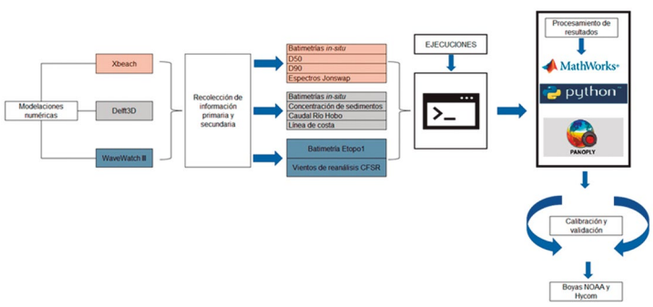


Figura 5.3 Metodología aplicada para la implementación de los modelos numéricos en la zona de estudio.

Fuente: Diseño propio.

Se recolectó información primaria (mediciones *in situ* realizadas por PIMECLA) y secundaria (batimetrías en las zonas de estudios, batimetrías ETOPO 1, líneas de costa, diámetros de partículas D50 y D90, vientos de reanálisis de CFSR, entre otra información). El análisis de esta información permitió inferir que las corrientes litorales son forzadas, principalmente, por la energía de las olas incidentes en la playa.

Las modelaciones se ejecutaron con tres software: *XBeach*, *Delft3D* y *Wave Watch III*. Los dos primeros, facilitaron la comprensión del fenómeno de transporte de sedimentos que ocurre en el litoral del municipio de Arboletes. Se compararon los resultados obtenidos entre estos dos modelos (*XBeach* y *Delft3D*) para validar la capacidad predictiva de los mismos. Las validaciones se efectuaron con los datos obtenidos en la campaña que realizó la Universidad del Norte en los municipios de Arboletes, Necoclí y Turbo durante el año 2018 (Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021)).

Con el tercer modelo *Wave Watch III* se ejecutó un caso de propagación de oleaje en el Caribe, con el objetivo de obtener 10 espectros de oleaje en el golfo de Urabá. Los resultados de esta modelación (espectros y series de tiempo) se utilizaron para la calibración de los modelos *Delft3D* y *XBeach*.

5.3. Resultados

Batimetría

Los datos batimétricos se obtuvieron del trabajo realizado por el equipo encargado de la componente Topobatimetría de la fase II de PIMECLA. La Figura 5.4 presenta la distribución de puntos batimétricos en la zona del municipio de Arboletes (cada punto representa una profundidad diferente) y en la Figura 5.5 se presenta una imagen isométrica de la batimetría generada para la zona costera cercana al litoral de Arboletes.

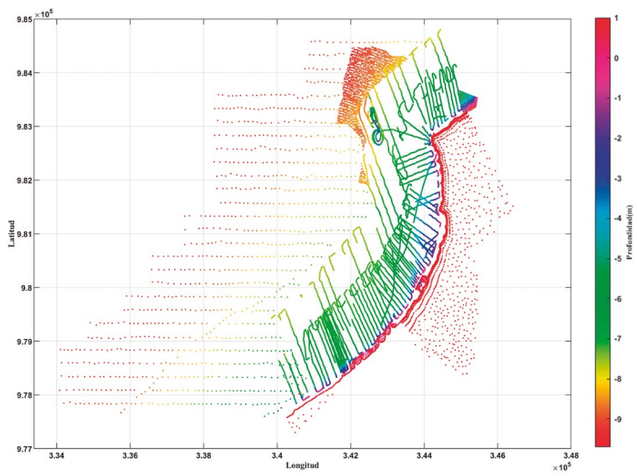


Figura 5.4 Batimetría sector municipio de Arboletes.
Fuente: Diseño propio.

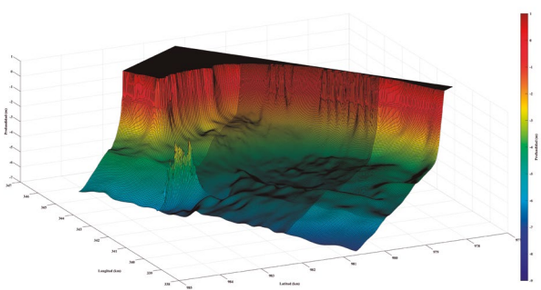


Figura 5.5 Levantamiento batimétrico sector Arboletes.
Fuente: Diseño propio.

En el estudio del proyecto "Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia" (Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia) se identificaron algunos puntos críticos del litoral de Arboletes, entre ellos punta Rey y volcán de lodo (ver Figura 5.2, puntos (1) y (2) en la figura). La Figura 5.6 muestra el sector de punta Rey, donde es evidente un oleaje energético, característico de la época seca, impactando contra el dique en el talud que protege la infraestructura vial.

Al oeste del sector punta Rey se hizo un trabajo



Figura 5.6 Dique en talud como protección a la vía Urabá – Montería – Urabá.
Fotografía: Giner Jiménez, 2019.

detallado de los puntos batimétricos para resaltar la pequeña porción de tierra que queda (islote), después de haberse erosionado durante años la conexión de esa pequeña isla al continente. Se debe anotar que, en las mediciones de campo batimétricas realizadas en este sector, esa pequeña isla se bordea, pero no se toman datos sobre el nivel del mar, por lo cual los resultados muestran fenómenos de refracción, mas no de difracción (se recomienda tener presente ese aspecto para futuros projectos) (Figura 5.4).

Con esta información se cumplió el procesamiento de los datos batimétricos y se obtuvo un levantamiento en 3D de la zona (Figura 5.5).

Oleaje

Los resultados siguientes, producto de la modelación anidada del Caribe y del golfo de Urabá con *Wave Watch III*, muestran el comportamiento del oleaje en el Caribe en el año 2021 (septiembre y octubre) y cómo esa energía se transfiere hacia el golfo de Urabá (Figura 5.7).

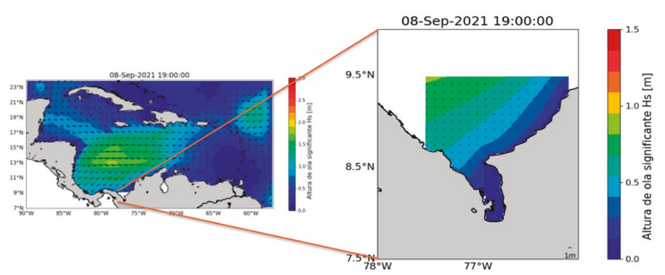


Figura 5.7 Modelación de oleaje con *Wave Watch III* en el Caribe y golfo de Urabá.
Fuente: Diseño propio.

Corriente de deriva

En las Figuras 5.8 (a, b y c) se ven resultados, producto de la modelación con *Delft3D* y *XBeach*, de corrientes de deriva, oleaje y transporte de sedimentos para Arboletes en el último instante modelado (finales de octubre de 2021).

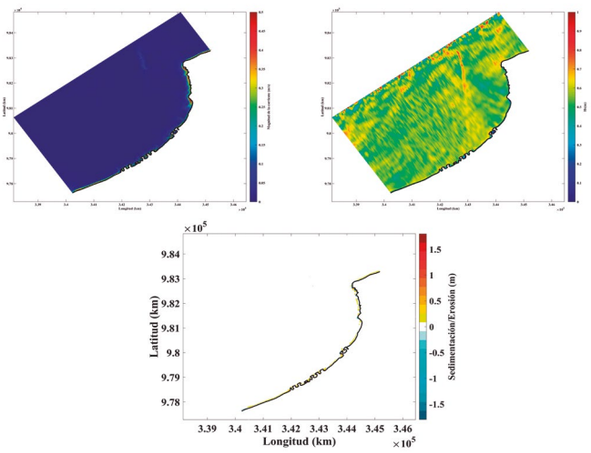


Figura 5.8 Corriente de deriva (a), oleaje (b) y trans. de sedimentos (c).

Fuente: Diseño propio.

Para analizar más de cerca lo que ocurre con las corrientes y el transporte de sedimentos, se presenta en la Figura 5.9 un detalle de las zonas específicas, donde se simulan la presencia de obras de estructuras de protección costera (casco urbano de Arboletes y el sector punta Rey).

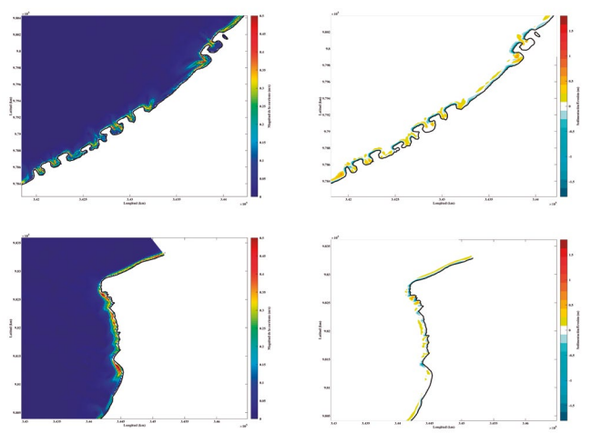


Figura 5.9 Hidrodinámica superficial Arboletes (estructuras) (a), transporte de sedimentos Arboletes (estructuras) (b), Hidrodinámica superficial Arboletes (punta Rey) (c), transporte de sedimentos Arboletes (punta Rey) (d).

Fuente: PIMECLA, 2024

5.4. Conclusiones

Con los datos batimétricos de 2021 se evidenció un punto crítico en punta Rey, Arboletes. En visita de campo se pudo evidenciar la coherencia de dicho resultado. El dique que bordea la vía en la zona de punta Rey está siendo afectado por los procesos erosivos de la zona. Es importante plantear alternativas de solución para tratar de mitigar estos procesos erosivos sobre la vía, ya que es un eje de comunicación muy importante entre los departamentos de Córdoba y Antioquia. Las modelaciones numéricas para la zona muestran corrientes de deriva altas y transporte de sedimentos considerable. También fue posible verificar desde los resultados de la modelación que el sistema de obras de protección costera cumple la función de generar playa para uso turístico. Esto se evidencia también en campo. En definitiva, es claro concluir que las zonas modeladas presentan una dinámica altamente activa.

5.5. Otros trabajos

Dentro del proyecto (PIMECLA), también se lograron alcanzar objetivos en temas como pronósticos y ascensos del nivel del mar. En el primer caso, con ayuda del DAGRAN, se incorporaron a la página web de dicha organización resultados de pronóstico de oleaje (dirección y altura) que ayudaban a la gestión del riesgo, especialmente a la ayuda en las operaciones marítimas. Para el segundo caso, se usó una base de datos de Copernicus para hacer un análisis del ascenso del nivel del mar en el Caribe, específicamente entre el Caribe panameño y colombiano.

5.5.1. Pronóstico

A partir de los pronósticos realizados, se generaron datos diarios para el portal del DAGRAN y se elaboró un Boletín Meteomarino que se actualizaba los lunes, miércoles y viernes de cada semana, con el propósito de que esta información pueda ser empleada por los diferentes actores del territorio. Esta información se encuentra disponible para consulta online en la página web del Sistema de Alerta y Monitoreo de Antioquia SAMA https://dagran.antioquia.gov.co/sama, donde se pueden consultar los campos de magnitud de altura de ola significante y dirección del oleaje en la sección de pronósticos.

Se comparte una versión digital del boletín meteomarino (ver Figura 5.10), que relaciona el pronóstico de oleaje de los 4 días siguientes a la fecha de publicación, así como las series temporales de la altura de ola significante en varios puntos de interés (ver Figura 5.11). En esta versión digital, se comparte una descripción general de las condiciones pronosticadas del oleaje con el propósito de facilitar la interpretación de estos resultados por parte de la comunidad general, generando de esta manera una información más accesible para los diferentes actores del territorio.

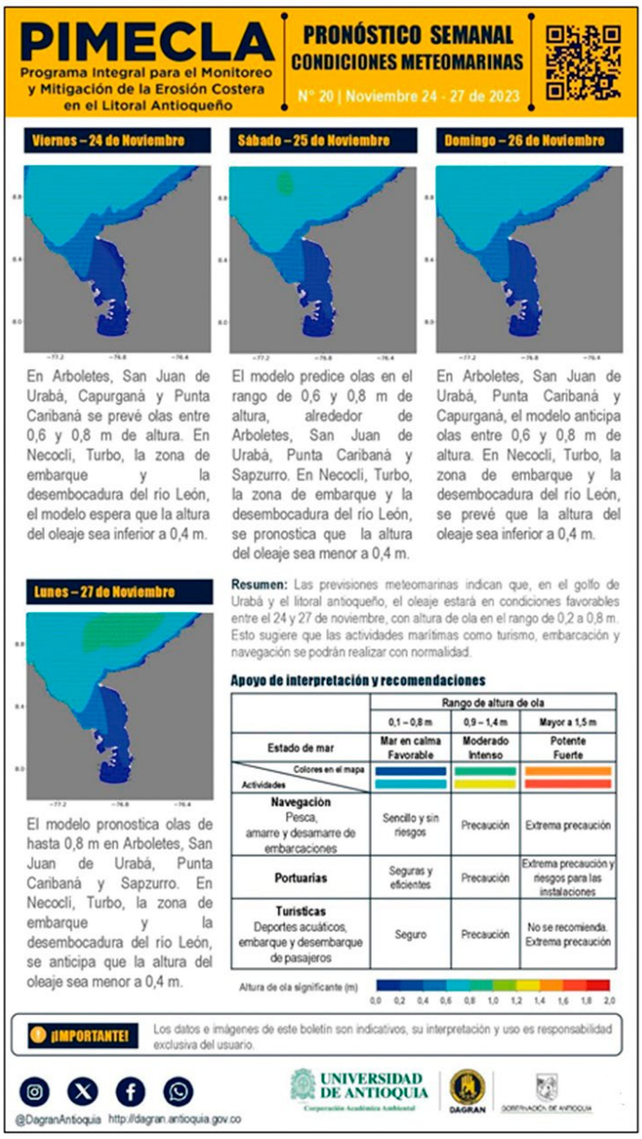


Figura 5.10. Boletín meteomarino.

Fuente: PIMECLA, 2024

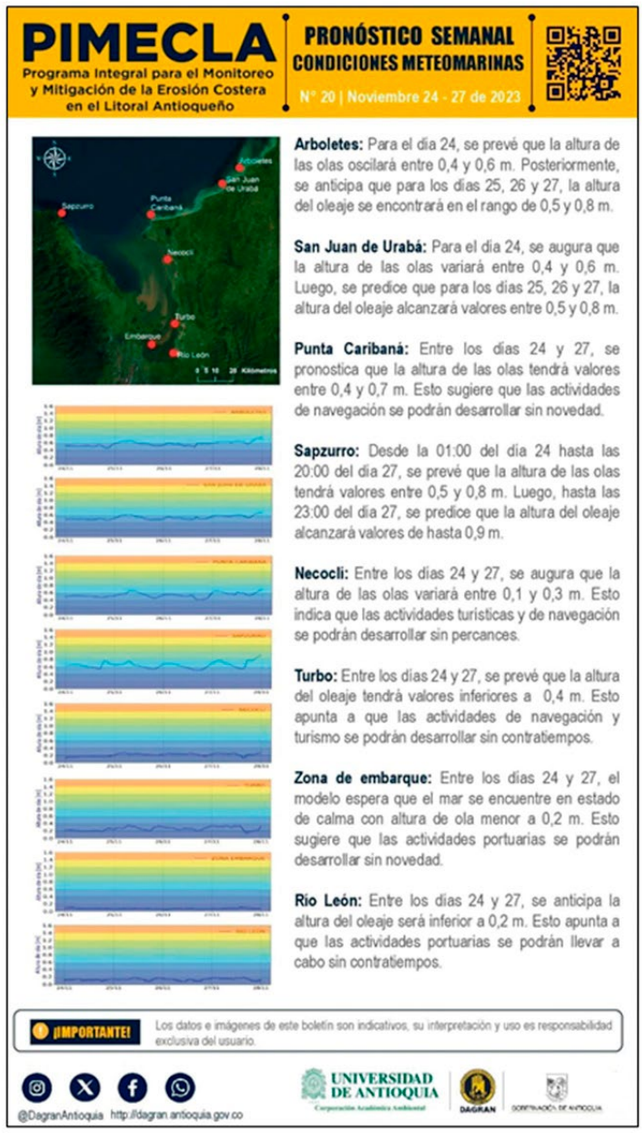


Figura 5.11. Boletín meteomarino, puntos de interés.

Fuente: PIMECLA, 2024

5.5.2. Anomalía del nivel del mar

Con el fin de analizar las variaciones del ascenso del nivel del mar en el caribe colombiano y especialmente en el golfo de Urabá, se ha desarrollado una metodología que pretende ayudar a comprender este fenómeno, asociado al cambio climático global, y que puede representar una amenaza para las costas del mundo y en particular para el litoral antioqueño.

Se pretende entonces anticipar los posibles impactos a mitigar, y coadyuvar a una oportuna gestión del riesgo por parte de las autoridades locales, departamentales y nacionales.

Datos

Se analizaron mediciones satelitales en el Caribe colombiano para estimar las anomalías en el nivel del mar utilizando la base de datos de Copernicus Climate Change Service (C3S).

Esta base de datos proporciona las estimaciones globales diarias de anomalías en el nivel del mar basadas en mediciones de altimetría satelital.

En este sentido, la anomalía del nivel del mar se define como la altura del agua sobre la superficie media del mar en un momento y una región determinada. En esta base de datos, las anomalías del nivel del mar se calculan con respecto a un periodo de referencia medio de veinte años (1993-2012) utilizando estándares de altímetro actualizados.

Esta base de datos contiene mediciones con una resolución espacial de 0.25° (25.75 km aprox.) y una cobertura temporal del 01 de enero de 1993 al presente (retraso de 5 meses).

Además, la resolución temporal de los datos es de 24 horas con mediciones continuas. La información sobre los datos se resume en la tabla 5.1.

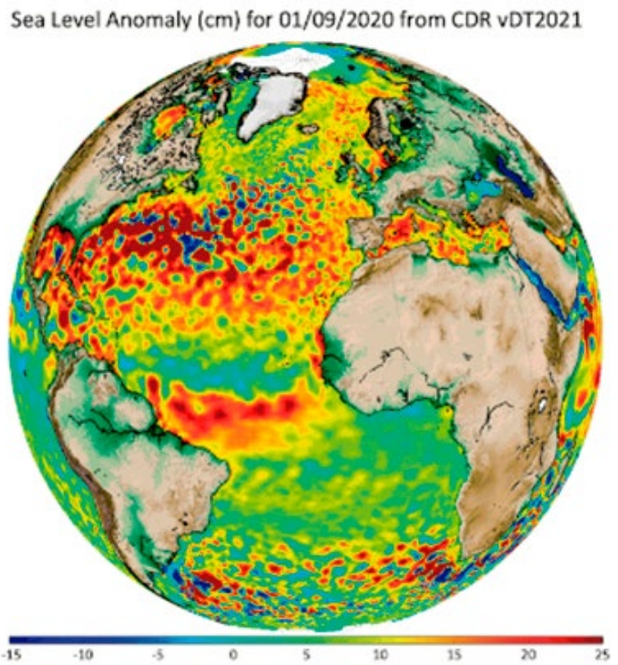


Figura 5.12. Ilustración de anomalías del nivel del mar global para 01/09/2020.

Fuente: Tomado de https://cds.climate. copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-sea-level-global?tab=overview

DESCRIPCIÓN DE DATOS	
Tipo de datos	Cuadriculados
Cobertura horizontal	Océano mundial
Resolución horizontal	0.25° x 0.25°
Cobertura vertical	Nivel único
Cobertura temporal	1 de enero de 1993 al presente (con un retraso de unos 5 meses)
Resolución temporal	Diario
Brechas temporales	Sin huecos
Formato de archivo	NetCDF4
Versiones	vDT2021: actualizado regularmente; basado en nuevas versiones de datos de entrada de nivel 2 y sistema de producción actualizado. vDT2018: ya no se actualiza; abarca del 1 de enero de 1993 al 3 de junio de 2020
Frecuencia de actualización	Aproximadamente 3 veces/año

Tabla 5.1. Descripción de mediciones de la base de datos.

Fuente: Diseño propio. 2021

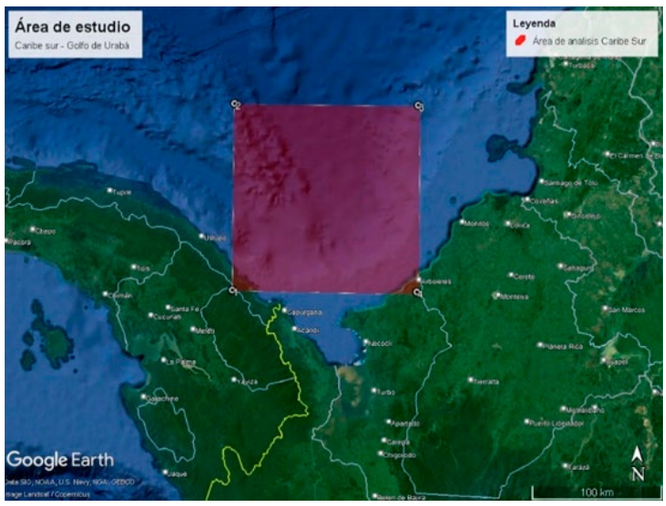


Figura 5.13. Área para análisis de anomalía del nivel del mar, parte colombiana.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.14. Área para análisis de anomalía del nivel del mar, parte panameña.

Fuente: Elaboración propia.

Áreas de análisis

La zona delimitada para el análisis de las anomalías del nivel del mar se muestra en la Figura 5.13. Esta área tiene en cuenta la influencia del mar caribe en la zona más al sur con cercanías al golfo de Urabá y al litoral antioqueño. El área está delimitada por las coordenadas -77,69° y -76,42° longitud oeste y 8,77° y 10,04° latitud norte.

También se realizó el análisis sobre una franja del Caribe panameño y el golfo de Urabá como se muestra en la Figura 5.14.

Diagramas de Hovmöller

Los diagramas de Hovmöller permiten analizar la evolución temporal de una variable en función del espacio (latitud, longitud). En este caso la variable que se quiere analizar en el espacio corresponde a las anomalías del nivel del mar. Para la construcción de este diagrama se siguen los siguientes pasos:

i. Se fijan los límites del área a estudiar.

ii. Se comienza desde un tiempo inicial promediando las anomalías del nivel del mar en toda la malla o cuadriculas (pixeles) a través de cada franja de latitud o longitud que se está estudiando.

iii. Luego se repite el paso anterior para un periodo de tiempo determinado. Los datos individuales corresponden a una columna en el diagrama de Hovmöller.

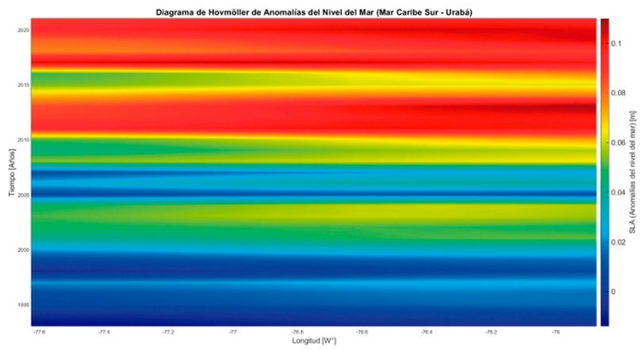


Figura 5.15. Diagrama de Hovmöller de anomalías del nivel del mar del Caribe sur – golfo de Urabá.

Fuente: Elaboración propia.

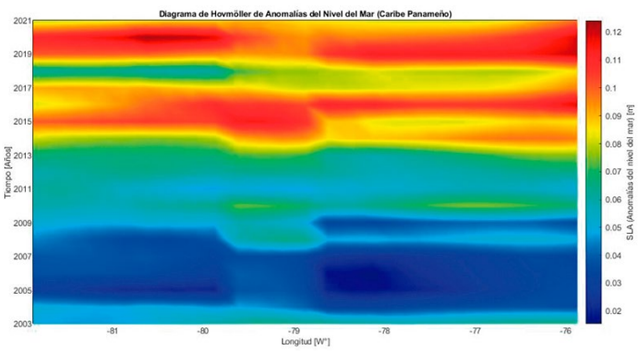


Figura 5.16. Diagrama de Hovmöller de anomalías del nivel del mar del Caribe panameño – golfo de Urabá.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

En la Figura 5.15 se presenta el diagrama de Hovmöller de anomalías del nivel del mar en la zona caribe sur desde el año 1993 hasta 2021, el análisis se realiza de forma longitudinal con las latitudes promediadas para cada año. En el diagrama se observa que la variación de las anomalías del nivel del mar desde el año 1993 hasta el 2021 es de aproximadamente 10 cm. Ello indica que el nivel del mar se encuentra en ascenso constante en esta zona.

Por otro lado, en la Figura 5.16 se presenta el diagrama de Hovmoller para la zona del caribe panameño, este análisis se realizó desde el año 2003 hasta el año 2021, donde se logra evidenciar una tasa más rápida de ascenso que alcanza los 12 cm.

5.6 Referencias

Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). *Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados.* (Formatos impreso y digital). © Medellín / Antioquia / Colombia.

Higuita, M., y Quintana, R. (2020). *Modulación de las Corrientes Oceánicas en el Golfo de Urabá a Partir de la Onda de Marea.* Universidad de Antioquia, Colombia.

Lozano, L. H. (1998). Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera que comprende la bahía Colombia desde el río Turbo hasta Matuntugo. Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena de Indias, Colombia.

Roldán, P. A. (2008). Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de maestría (pp. 113). Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Componente social y talleres de capacitación

CAPÍTULO

6°

PIMECLA
Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 6°

Componente social y talleres de capacitación

Autores:

Yenny Navarro Salcedo.

Geraldin Morelo Muñoz.

Carlos Alberto Palacio Tobón.

Vladimir G. Toro Valencia.

6.1 Introducción



Figura 6.1 Monitoreo de la línea de costa, en el sitio de estudio playa corregimiento Zapata.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

Antioquia es mágica debido a su biodiversidad, multiculturalidad y sus variados ecosistemas, entre ellos la zona costera. Esta es estratégica para la conexión de Antioquia con los mercados mundiales, situación que le ofrece una amplia gama de oportunidades, pero también la hace vulnerable a conflictos de intereses entre diferentes grupos de personas.

La inspección e inventario de la línea de costa se lleva a cabo en la franja costera de los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes y es un esfuerzo para reconocer esta región habitada por una población diversa en la que convergen diferentes etnias y culturas como: los indígenas *Gunadules*, también denominados *Cunas*, que habitan el Resguardo *Ipkikuntiwala* más conocido como Resguardo *Caimán Nuevo*. También existe una importante presencia de afrocolombianos entre los cuales se identifican los Consejos Comunitarios: El Roto, Bocas del Atrato y Leoncito. Además, hay una cultura diversa representada por población proveniente en su mayoría de los departamentos de Córdoba, Sucre, Chocó, Bolívar y de la zona andina colombiana. Esta composición de la población la hace dinámica y diversa en su relacionamiento y en su representatividad. Es así que en las comunidades sobre la línea de costa, se identifican las Juntas de Acción Comunal (J.A.C) como organizaciones que representan y defienden los intereses de sus asociados. También los grupos étnicos están representados por sus organizaciones de base, entre otras se identifican: asociaciones de pescadores, asociaciones de mujeres y clubes juveniles, los cuales buscan estrategias para mejorar la calidad de vida de sus comunidades mediante la gestión de proyectos sociales. Una de las organizaciones más representativas es la Federación de Pescadores Artesanales y Agricultores del golfo de Urabá y Darién Caribe (FEDEPESGUDA) la cual está integrada por 33 asociaciones de pescadores.

En los recorridos del Programa Integral para el Monitoreo de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño PIMECLA (iniciados en los límites Antioquia – Chocó, en la hermosa playa de Boca Tarena, en el municipio de Turbo) se ha tenido la oportunidad privilegiada de recorrer cada centímetro de los 512 kilómetros de la costa de Antioquia, hasta su límite cerca a punta Rey en el municipio de Arboletes.

De esta manera se ha logrado identificar que este mágico territorio está integrado por las localidades descritas en la Tabla 6.1.

6.2 Estrategia de participación social y comunitaria

6.2.1 Metodología

Durante los recorridos para la inspección e inventario de la línea de costa se implementó una estrategia de participación social y comunitaria con los objetivos de involucrar de manera activa a la población local y de dar a conocer las razones del uso de drones y de otros equipos para medir y entender qué está pasando en la línea de costa.

Las acciones enfocadas en procura de facilitar escenarios de participación social y comunitaria con los actores en el área de la línea de costa, contemplaron los siguientes pasos:

- Identificación de las localidades existentes en los tramos a intervenir.
- Identificación de los líderes de Juntas de Acción Comunal y demás organizaciones de las localidades a intervenir.
- Envío de oficios de identificación de los

integrantes del equipo PIMECLA.

- Prerecorridos sociales sobre la línea de costa, previos a las jornadas de muestreo. Estos con el objetivo de informar de manera personalizada a todos los actores presentes en la línea de costa acerca de las jornadas a implementar, dar a conocer sus objetivos y fechas puntuales de desarrollo.
- Talleres grupales de socialización de PIMECLA.

Municipio	Localidad
Turbo	Consejo Comunitario El Roto
	Consejo Comunitario Bocas del Atrato y Leoncito
	• Vereda Coquito • Vereda Puerto César • Vereda Calle Larga • Vereda Puerto Voy • Casco urbano municipio de Turbo • Vereda El Uno • Vereda El Dos • Vereda Yarumal • Vereda Boca de la Vieja • Vereda Camerún • Vereda Cope • Vereda Punta de Piedra • Vereda La Martina • Vereda Piedrecitas • Vereda Cirilo • Vereda Tie • Resguardo Caimán Nuevo
Necoclí	• Vereda La Ceibita • Corregimiento El Totumo • Vereda Casa Blanca • Casco urbano Municipio de Necoclí • Vereda San Sebastián • Vereda Río Necoclí • Ensenada de Río Negro • Playa Bobalito • Cerro El Águila • Vereda La Yaya • Mulatos • Vereda la Iguana • Corregimiento Zapata • Vereda Gigantón
San Juan	• Vereda Sabanilla • Corregimiento Damaquiel • Corregimiento Uveros • Vereda El Subterráneo • Vereda Mundito • Vereda Playas Marina • Casco urbano municipio de San Juan de Urabá • Bocas del Río San Juan
Arboletes	• Vereda Playetas • Vereda Nueva Jerusalén • Vereda Río Hobo • Casco urbano municipio de Arboletes • Vereda El Minuto • Cristo Rey

Tabla 6.1 Localidades de la línea de costa antioqueña.

Fuente: Diseño propio.

6.2.2 Resultados

Prerecorridos sobre la línea de costa

Los prerecorridos sociales se llevaron a cabo para socializar en detalle el programa PIMECLA con cada uno de los actores que se ubican en la línea de costa (ver Figuras 6.1 a 6.5). Se destaca la identificación de dos (2) Consejos Comunitarios, un (1) resguardo indígena, centros poblados, instituciones educativas, viviendas, cabañas privadas, restaurantes, hoteles y discotecas. Es importante precisar que la intervención social y comunitaria se aplicó con facilidad en algunos tramos, pero en otros fue más compleja o imposible de realizar. En algunos casos, se requirió



Figura 6.2 Pre-recorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa corregimiento Mulatos, municipio de Necoclí.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.



Figura 6.3 Pre-recorrido en la línea de costa en el sitio de estudio sector La Curva, municipio de Turbo.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

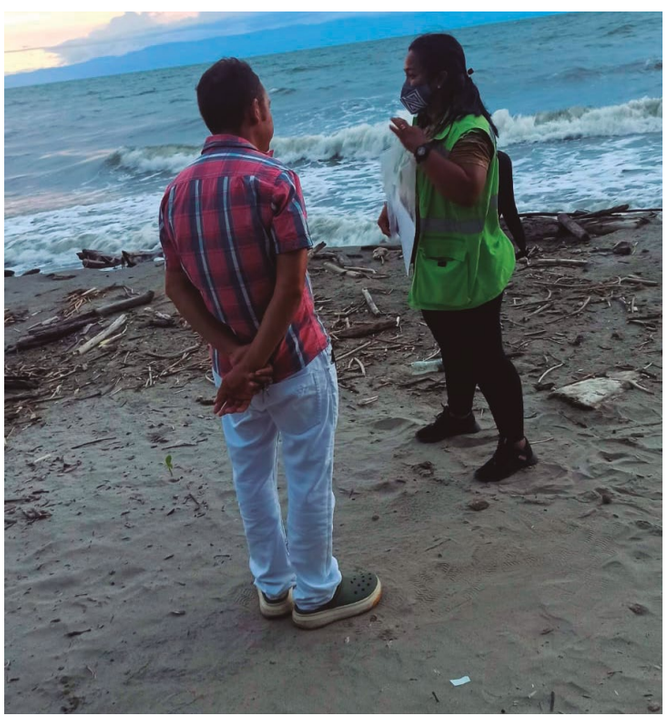


Figura 6.4 Pre-recorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa vereda Tie, municipio de Turbo.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

acompañamiento del equipo técnico durante las campañas por líderes designados en las localidades.

CoastSnap



Figura 6.5 Prerecorrido en la línea de costa en el sitio de estudio playa vereda punta de Piedra, municipio de Turbo.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

En PIMECLA, también se buscó involucrar a los actores presentes en la línea de costa en la funcionalidad y operatividad de *CoastSnap*. Durante los conversatorios, que enfocaron en ser claros y de fácil comprensión, se explicó a los participantes la estrategia *CoastSnap* y cómo esta forma parte de las acciones que se vienen implementando en el marco del programa. Con actividades *in situ* (ver Figuras 6.6 y 6.7), se explicó el significado de la estrategia de seguimiento de las playas mediante la captura de fotografías con smartphones, tomadas por turistas, ciudadanos, vecinos de las playas y población en general, resaltando cómo desde esta estrategia, siguiendo un paso a paso desde la toma de los registros hasta el envío de la información se pueden mapear las playas y recopilar información para monitorear procesos como la erosión costera, el transporte de sedimentos y la evolución del estado de la línea de costa. Se enfatiza en la importancia de la apropiación comunitaria para el buen uso y cuidado de las estaciones con su participación y por medio de los carteles alusivos a la estrategia y al proyecto. Se socializa con los diferentes actores del territorio la importancia de la playa y de su monitoreo. De esta manera se espera que la comunidad tenga información sobre la operatividad de las bases, se apropie de su cuidado y se motive a usarlas de manera permanente. En la Tabla 6.2 se indican las localidades de la línea de costa antioqueña donde fueron instaladas bases de *CoastSnap*.

Municipio	Lugar de ubicación
Turbo	Playa Dulce Observaciones: establecimiento comercial de dos plantas Blue Moon
Necoclí	Playa El Pescador Observaciones: sobre segundo piso de las instalaciones del hotel Punta Palmeras
Arboletes	Laboratorio costero Universidad de Antioquia Observaciones: en este predio se instalaron tres estaciones. Dos en el Laboratorio (la primera en el costado occidental y la segunda en el costado oriental del acantilado), y la tercera en el predio vecino ya que tiene una mejor perspectiva sobre el acantilado; allí mismo funciona una estación adicional con vista hacia el río Hobo.
Arboletes	Playa Arboletes Observaciones: sobre baranda en la sección final del muelle turístico del municipio
Arboletes	Playa Volcán Observaciones: sendero que rodea la finca La Manuela.

Tabla 6.2 Bases de *CoastSnap* instaladas en la línea de costa antioqueña.

Fuente: Diseño propio.



Figura 6.6 Socialización de *CoastSnap*. Arboletes, Laboratorio Costero.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.



Figura 6.7 Socialización de *CoastSnap*. Arboletes, Laboratorio Costero.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

6.2.3 Conclusión

En las acciones de participación social y comunitaria de PIMECLA intervinieron activamente los actores presentes en la línea de costa y se lograron interacciones útiles en las actividades implementadas. Es así como tomaron conciencia sobre la corresponsabilidad para el cuidado y la protección de la línea de costa; y también apoyo a iniciativas de monitoreo para la mitigación de la erosión costera que repercutan en el bienestar de los residentes.

6.3 Talleres de capacitación

6.3.1. Introducción

El riesgo costero se define como la expectativa de pérdidas (personales, daños materiales, perjuicios económicos, degradación ambiental) que podría producir un peligro particular de origen natural o humano en una zona costera, durante un período determinado. La severidad de estos riesgos depende fundamentalmente del nivel de vulnerabilidad y exposición al peligro (tormentas, vertidos, erosión, sedimentación, impacto del oleaje, etc.), así como del valor de los bienes e intereses que podrían verse afectados. Las actividades económicas, los asentamientos humanos y el medio natural son intereses que pueden verse amenazados por los riesgos costeros (Atlantic Network for COastal RIsks Management [ANCORIM], 2013). A pesar de esto, a lo largo de las últimas décadas se ha producido un aumento en el impacto de los riesgos costeros, por el incremento en la ocupación y uso de las zonas costeras. Este proceso implica que más personas, actividades y bienes estén expuestos a los peligros que implica la acción de fenómenos relacionados con la especificidad de los territorios costeros.

En Colombia, la Ley 1523 de 2012 (Congreso de Colombia, 2012) adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, como el conjunto de entidades públicas, privadas y comunitarias, de políticas, normas, procesos, recursos, planes, estrategias, instrumentos, mecanismos, información técnica y científica, necesarios para ofrecer protección a la población respecto al riesgo de desastres. A nivel local, el Sistema Nacional cuenta con los Consejos departamentales, distritales y municipales para la gestión del riesgo, como instancias de coordinación, de asesoría, de planeación y de seguimiento, destinados a garantizar la efectividad y articulación de los procesos de conocimiento del riesgo, de reducción del riesgo y de manejo de desastres en la entidad territorial correspondiente. Estos están dirigidos por el gobernador o alcalde de la respectiva jurisdicción, e incorporan a los funcionarios de la Gobernación o Alcaldía, a representantes de las entidades descentralizadas del orden departamental, distrital o municipal, y del sector privado y comunitario (Ley 1523, 2012).

Dentro de sus facultades, los Consejos podrán invitar a sus sesiones a técnicos, profesionales, representantes de gremios o universidades para tratar temas relevantes a la gestión del riesgo.

Así mismo, podrán convocar a representantes o delegados de otras organizaciones o a personalidades de relevancia social en su respectiva comunidad para lograr una mayor integración y el respaldo comunitario en el conocimiento y las decisiones de los asuntos de su competencia. También podrán establecer comités para la coordinación de los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y de manejo de desastres, siguiendo la misma orientación del nivel nacional. Igualmente, podrán crear comisiones técnicas, como asesoras permanentes o transitorias para el desarrollo, estudio, investigación, asesoría, seguimiento y evaluación de temas específicos en materia de conocimiento y de reducción del riesgo y de manejo de desastres, así como de escenarios de riesgo específicos (Ley 1523, 2012).

En este sentido, la Universidad de Antioquia, en colaboración con el DAGRAN (Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia), desarrolló un taller en gestión del riesgo costero dirigido principalmente a los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres de cuatro municipios ubicados en el litoral antioqueño y al personal del DAGRAN, con el fin de ampliar y de fortalecer su conocimiento frente al riesgo costero, esencial para la toma de decisiones en las zonas costeras.

6.3.2. Objetivo

Esta sección expone el taller desarrollado con el objetivo principal de brindar las herramientas básicas y necesarias frente al tema de gestión del riesgo costero, a los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres de las alcaldías de los municipios costeros de Antioquia (Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes).

6.3.3. Metodología

Contenido

El taller incluyó seis módulos descritos detalladamente en la tabla 6.3

Módulo	Contenido (Temas)
1	Geología y generalidades sobre procesos de superficie
2	Geomorfología, procesos de superficie y suelos
3	Evaluación de la línea de costa
4	Contaminación en la zona costera
5	Procesos costeros y oceánicos
6	Estimación del riesgo costero a partir de variable intrínsecas y su incorporación en el ordenamiento ambiental y territorial costero

Tabla 6.3 Contenido temático del taller de riesgo costero.

Fuente: Diseño propio.

Modalidad

El taller se realizó de manera virtual por medio de la plataforma Zoom. Durante un mes y medio, en tres sesiones por semana, para un total de 18 sesiones de dos horas de duración cada una. Estas se llevaron a cabo los días miércoles, jueves y viernes en las horas de la tarde. Durante todo el desarrollo del curso se llevó registro de la asistencia, grabaciones y fotografías, como evidencia del taller.

Participantes

El taller tuvo en total 22 personas inscritas, pertenecientes a los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres, de las alcaldías municipales de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes, al DAGRAN y a la Universidad de Antioquia.

Certificación del taller

El taller se matriculó y se certificó ante el Centro de Extensión Académica de la Facultad de Ingeniería (CESET) de la Universidad de Antioquia, con el fin de que al final los participantes tuvieran el certificado del taller.

6.3.4. Desarrollo del taller

El 27 de octubre 2021 inició el taller con la bienvenida a los asistentes. En esta participaron todos los ponentes, el coordinador de PIMECLA, las personas encargadas del apoyo logístico y el director del DAGRAN. Se continuó con el primer módulo del taller, y así sucesivamente con los cinco módulos en las siguientes semanas. Finalmente, en la última sesión (3 diciembre 2021) se celebró un acto simbólico, al cual asistieron todos los ponentes, el personal administrativo de la Universidad de Antioquia, el director del DAGRAN y otros funcionarios. Durante el acto se agradeció a los asistentes por su tiempo, el esfuerzo e interés, igualmente los asistentes también expresaron palabras de gratitud por la oportunidad y por el conocimiento que se les fue compartido.

Salidas de campo

Con el fin de afianzar los conceptos y evidenciar los riesgos que actualmente se presentan en esas zonas, se realizaron salidas de campo a dos de los municipios del litoral antioqueño, en Turbo se visitó playa Dulce (Figura 6.8A, 6.8B, 6.8C Y 6.8D).



Figura 6.8A. Tema trabajado: conceptos y definiciones básicas de zona costera.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.8B. Tema trabajado: geomorfología costera apoyada con mapas físicos.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.8C. Tema trabajado: medición de perfil de playa por medio del método Puleo.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.8D. Tema trabajado: medición de la corriente superficial de la costa utilizando cocos.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.

Durante la jornada se trataron conceptos básicos relacionados con la zona costera, la geomorfología costera (principalmente la local) y se explicó la historia de la costa del municipio de Turbo con apoyo de mapas físicos. Posteriormente se realizó un ejercicio práctico para observar la granulometría y la mineralogía de los sedimentos de la playa por medio de lupas. Luego, se dio una pequeña charla sobre contaminación marina, mencionando las fuentes de contaminación como las aguas residuales; el bloom algal, fenómeno ocasionado por los altos contenidos de nutrientes que aportan estas aguas, que implica la sobreproducción de algas nocivas y tóxicas para las personas y los animales; se mencionaron algunas recomendaciones de acción frente a este fenómeno. Continuando con las actividades de la salida, se realizaron mediciones de perfiles de playa por medio del método Puleo y, finalmente mediciones de las corrientes superficiales en la costa, utilizando cocos como derivadores.

La segunda salida de campo se realizó en el municipio de Arboletes. A esta asistieron las personas de los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres de los municipios de San Juan de Urabá, Arboletes y tres asistentes del DAGRAN (Figura 6.9A, 6.9B, 6.9C Y 6.9D).



Figura 6.9A. Presentación con los asistentes e inicio de explicación de los procesos costeros de la zona.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.9B. Charla sobre contaminación marina.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.9C. Explicación y demostración de método Puleo para mediciones de perfiles de playa.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.



Figura 6.9D. Ejercicio, utilizando cocos para medir corriente superficial en la costa.

Fotografía: Geraldin Morelo, 2021.

Durante la salida se explicaron los procesos geológicos costeros en la zona y los tipos de costa que se encuentran a lo largo del litoral antioqueño. Se complementó el tema, exponiendo los tipos de rocas que componen las costas de la zona y el proceso de diapirismo de lodo que se presenta en el Urabá. Posteriormente, se explicó, por medio de un ejercicio práctico, cómo son las corrientes y sus características básicas como dirección y velocidad; para esto se utilizaron cocos como derivadores, dejándolos en el agua y observando su recorrido.

Reporte de asistencia

Durante la primera semana del taller hubo buena asistencia (en promedio 15 personas por clase) Sin embargo, en las semanas siguientes se registró un notable descenso en asistencia con un promedio de siete personas por clase (Figura 6.10).

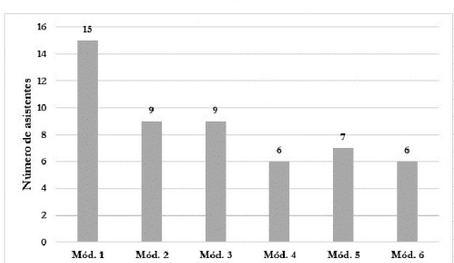


Figura 6.10 Asistencia promedio por módulo del taller.

Elaborado por Geraldin Morelo, 2021.

Certificación de los asistentes

Al finalizar el taller se revisaron las actividades de cada módulo con los profesores, y se revisó la asistencia de cada uno de los participantes para determinar si se certificaban o no (Figura 6.11).

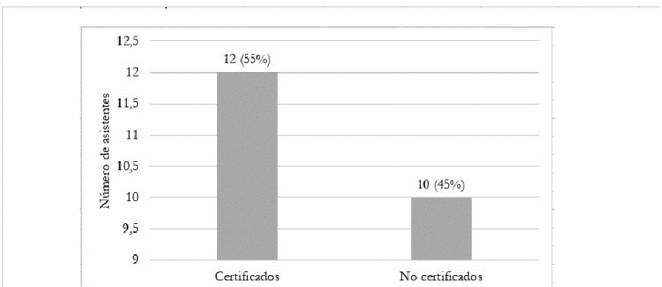


Figura 6.11 Porcentaje de estudiantes que obtuvieron certificado de participación en el taller y porcentaje de estudiantes que no fueron certificados.

Elaborado por Geraldin Morelo, 2021.

Según la revisión, solo el 55% de los asistentes cumplió con todos los requisitos para recibir el certificado. El 45% no cumplió debido, principalmente a la inasistencia al taller.

El certificado se entregó de manera virtual a 12 asistentes evaluados positivamente.

6.3.5. Conclusiones

El taller se desarrolló satisfactoriamente; con las reuniones pertinentes y necesarias para su estructuración correcta, pensando principalmente en las necesidades actuales del litoral antioqueño, y en cómo, desde la academia se pueden brindar las herramientas que necesitan los entes encargados para la toma de decisiones.

El taller y las salidas de campo permitieron fortalecer y afianzar el conocimiento práctico y teórico de los participantes, en cuanto a los conceptos básicos de la zona costera, incluyendo cuáles son los principales procesos costeros, cómo afectan al litoral antioqueño y cuáles son los riesgos que, actualmente se presentan en las zonas visitadas.

Para propiciar y fomentar la capacitación de los cuerpos operativos (y elevar así sus capacidades en los ámbitos técnico y laboral) se evidenció la necesidad de seguir desarrollando e implementando estrategias de acompañamiento regional entre los entes gubernamentales y los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres.

6.3.6. Referencias

Atlantic Network for COastal RIsks Management. (2013). Riesgos costeros: cómo reconocerlos y enfrentarse a ellos. Red Atlántica para la Gestión de los Riesgos Costeros.

Ley 1523. Política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Congreso de la República de Colombia. (24 de abril de 2012). https://funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141.



CAPÍTULO

7°

Volcán de lodo

PIMECLA
Programa Integral para el Monitoreo
y Mitigación de la Erosión Costera
en el Litoral Antioqueño

CAPÍTULO 7º
Volcán de lodo

Autores

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera.
Luis Alfredo García Oquendo.
Diomer Eliecer Tobón Monsalve.
Juan Guillermo Torres Córdoba.
Ricardo Vega Pulgarín.
Alba Cecilia Bustamante Caro.
Carlos Alberto Palacio Tobón.
Vladimir G. Toro Valencia.

7.1 Contexto geológico general

La geología y estructura del Caribe sur colombiano están en primera instancia controladas por las interacciones entre las placas tectónicas de Nazca (Pacífico), Caribe y extremo noroccidental de la placa suramericana. El borde continental está constituido mayormente por secuencias de espesores kilométricos de rocas sedimentarias plegadas y falladas del Oligoceno-Mioceno y más recientes, depositadas en ambientes, desde turbidíticos profundos, hasta litorales y arrecifales someros, agrupadas en los denominados cinturones de San Jacinto y Sinú. Ambos cinturones corresponden, básicamente a dos cuñas sedimentarias acrecionadas desde fines del Cretáceo hacia el oeste de la cordillera Central, en un contexto tectónico activo y con la ocurrencia de numerosos eventos de alta energía, como deslizamientos submarinos y corrientes de turbidez.

El área de interés y sectores aledaños a Arboletes se ubican sobre el denominado Cinturón del Sinú, una cuña sedimentaria de más de 7 km de espesor, caracterizada por secuencias espesas de sedimentos marinos (arcillolitas, lutitas, lodolitas, calizas, areniscas) intensamente deformadas y afectadas por fallas de rumbo con orientaciones preferenciales EW a SE-NW y por cabalgamientos con planos de buzamiento hacia el SE.

La evolución estructural del Cinturón del Sinú ha estado influenciada fuertemente desde el Mioceno, hasta el presente por el diapirismo de lodo, fenómeno responsable en buena medida de su evolución geológica y geomorfológica (Duque-Caro, 1984); (Vinnels, Butler, McCaffrey, & Paton, 2010). El ascenso de los lodos diapíricos a superficie es, junto con los esfuerzos tectónicos intraplacas, responsable de la formación de numerosos rasgos estructurales característicos, entre los cuales se incluyen cubetas y cuencas de sedimentación, anticlinales, sinclinales, estructuras monoclinales y numerosas colinas circulares de diámetros, desde métricos a kilométricos.

Las estructuras dómicas recientes en el Cinturón del Sinú se asocian comúnmente a zonas de fallas o de fracturamiento intenso y a menudo están conectadas en el subsuelo a sistemas complejos de cámaras y diques diapíricos y en superficie a geoformas como cráteres, coladas y volcanes de lodo (Vernette, 1989); (Carvajal H., 2015). El volcán de lodo de Arboletes, ubicado a 1 km del casco urbano de Arboletes, en la salida hacia Montería (Figura 7.1.1), es un caso representativo de estructuras diapíricas, construido progresivamente por lodos extruidos a través del cráter, con altura actual de 20 m sobre el nivel del mar y un cráter en la cima con aproximadamente 35 m de diámetro (Figura 7.1.2); presenta otro cráter en el flanco suroeste que se abrió entre los años 2004 y 2005, con actividad de extrusión de lodos en algunos años, pero inactivo en la actualidad (Vivas, 2019), para el 2021 seguía inactivo.

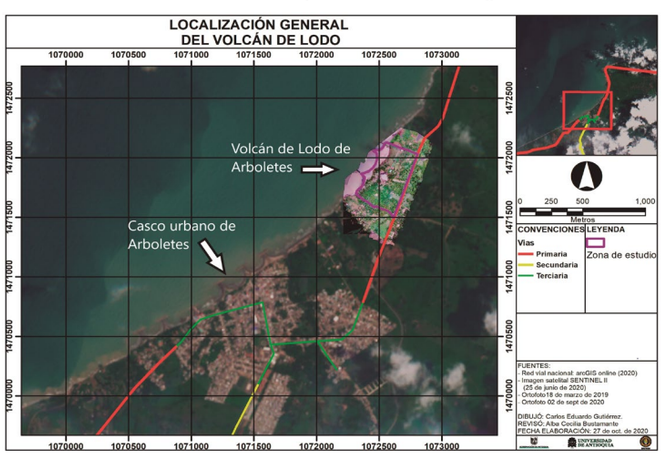


Figura 7.1.1. Ubicación del volcán de lodo de Arboletes.

Fuentes: Imagen Satelital SENTINEL II del 2020, ortofotos PIMECLA de 2019 y 2020; Red vial nacional: arcGIS online del 2020

El domo volcán se construyó progresivamente sobre una terraza marina emergida que tiene una altura promedio de cinco metros basculada hacia el sector de punta Rey (Norte) donde se levanta entre 1 y 2 m sobre el nivel máximo de la línea de marea y se ubica justo al Sur de la traza de la falla Canalete, por lo cual resulta apropiado interpretar que está asociado a la extrusión de lodos de esta zona de falla, y que probablemente continúa hacia el mar y origina manifestaciones diapíricas submarinas (expulsión de burbujas de gas) a una distancia de aproximadamente 1 km de la línea de costa actual.

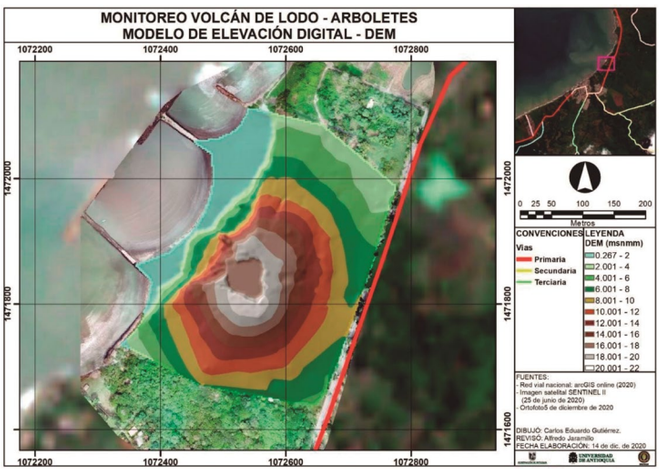


Figura 7.1.2. Domo diapírico del volcán de lodo de Arboletes con el flanco oeste colapsado.

Fuente: Imagen Satelital SENTINEL II del 2020, ortofoto PIMECLA del 2020; Red vial nacional: arcGIS online del 2020

7.2 Topo Batimetría del domo volcán

El volcán de lodo de Arboletes es un domo (colina), construido por sucesivos derrames de lodo sobre una terraza marina; con forma ovalada en dirección suroeste – noreste y paralelo a la línea de costa actual. El levantamiento topobatimétrico es un insumo esencial para determinar las condiciones morfológicas del área de influencia del volcán de lodo.

Este permite tener la información base que servirá para establecer el comportamiento del domo del volcán y, por ende, detectar posibles movimientos o condiciones que puedan afectar y poner en riesgo la integridad de la estructura y de los turistas.

7.2.1 Metodología

La actividad se divide en dos fases complementarias. En la primera se realiza un levantamiento topográfico empleando el DGPS con precisión en el plano horizontal de hasta 2 cm y hasta de 3 cm en el plano vertical (altura). Se instalaron base y punto de control; la base se colocó en un sitio que permitiera tener un anclaje a la altura topográfica (no a la altura elipsoidal), el punto de control es necesario para hacer correcciones de posición en tiempo real. El levantamiento se realizó mediante nube de puntos, enfatizando en zonas críticas y con los mayores cambios morfológicos tanto del predio Parque volcán de lodo y zonas aledañas.

En la segunda fase se realizó un levantamiento batimétrico empleando DGPS y ecosonda monohaz; la base del DGPS se instaló en el mismo sitio usado para el levantamiento topográfico.

La frecuencia de trabajo en profundidad de la ecosonda es de 200 kHz. Se trazaron líneas hidrográficas cada 25 metros al frente de la línea de costa del domo del volcán de lodo, y a cada lado de esta franja se levantaron cinco (5) líneas batimétricas cada 50 m; la longitud hacia mar adentro de estos transectos fue de 1.2 km o hasta alcanzar 5 m de profundidad (lo que sucediera primero).

Una vez obtenidos los datos de campo se procedió a depurarlos y a crear un modelo de elevación digital (DEM) que fue la base para los análisis posteriores (ver capítulo de monitoreo).

7.2.2 Resultados y análisis de resultados

Del procesamiento de los datos resultan dos productos importantes: el modelo de elevación digital (Figura 7.1.2) y el mapa de pendientes (Figura 7.2.2).

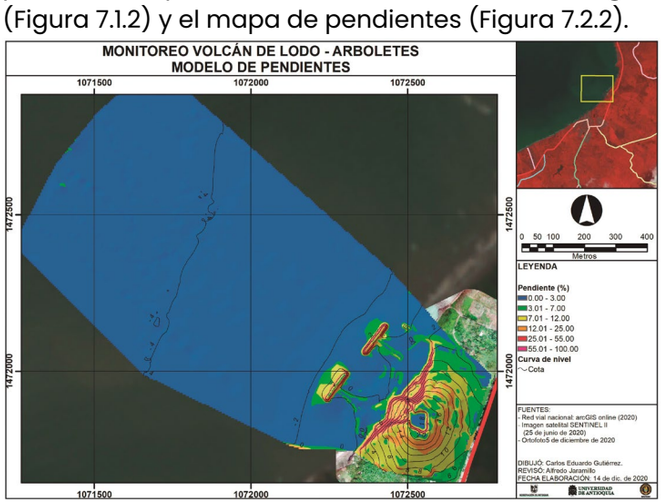


Figura 7.2.2. Modelo de pendientes de la zona: Volcán de lodo.

Fuente: Proyecto PIMECLA (2020).

En el modelo de elevación digital se aprecia que en la zona emergida existe un domo con forma elíptica (con el semieje mayor de 450m en dirección SW – NE) y con un área aproximada de 10 Ha. Su elevación máxima está en la zona sur del cráter principal (21.24 msnm).

La zona Suroeste del domo, incluido el cráter, corresponde al predio de la Gobernación de Antioquia, mientras que la zona noreste son predios particulares con casas de recreo. El límite entre el predio de la Gobernación y los predios particulares es una vía en la vertiente este que parte de la vía principal hacia la cima del volcán y sirve de acceso a los predios particulares. La vía se encuentra en un estado de deterioro notable, debido a una falla entre la parte NE del cráter principal, y en la esquina de la vía, en la cima del domo del volcán.

En la cima del volcán, al SE del cráter, hay varias

construcciones livianas tipo casas de un solo piso y kioskos. En la vertiente sur, en la parte baja se encuentran dos estructuras tipo cabaña de un solo nivel. El domo presenta un deslizamiento activo en la cara NW (paralela a la línea de costa), situación que deja en riesgo la zona del cráter. El resto de la geoforma no presenta afectaciones visibles.

En la zona de playa se encuentra un área con alta intervención antrópica, con dos estructuras rígidas de protección de tipo dique exento. Esta playa se conformó artificialmente con sedimentos importados de la zona.

En la zona sumergida aparece un terreno llano con la máxima profundidad encontrada a más de un kilómetro de distancia de la línea de costa (4.9 m de profundidad).

Al analizar el mapa de pendientes (Figura 7.2.2) se observa que la zona sumergida y la zona de playa tienen una topografía plana (pendientes menores a 3%) mientras que en el área del domo se tiene pendientes desde suaves (3% - 7%) en la base de la geoforma, onduladas (7% - 25%) en la parte media del domo, y montañosas o escarpadas en la parte superior del domo (12% - 55%) Adicionalmente, en la zona del deslizamiento (vertiente NW) se encuentra la pendiente más elevada, de más del 55%.

En la zona de playa y en la zona sumergida (plataforma somera) se encuentran las pendientes más bajas (de tipo plano, es decir, hasta el 3%).

Es importante notar la presencia de las estructuras de protección rígidas (tómbolos) que tienen pendientes de tipo montañoso (entre el 12 y el 25%). Asociados a estas estructuras se ven cambios de la pendiente (del orden del 7%) que sugieren acumulaciones de sedimentos, al frente de dichas estructuras.

7.2.3 Conclusiones

Como conclusiones del componente topográfico, se tienen:

- El volcán de lodo tiene una geoforma tipo domo ovalado, con eje principal en la dirección SW -NE.
- El domo presenta un deslizamiento activo en la cara NW que afecta, tanto al predio particular, como al predio de la Gobernación. En este último la afectación llega inclusive hasta el borde del cráter principal.
- Hacia la zona sur del domo se encuentra un cráter secundario con emanación intermitente de lodo.

7.3 Mediciones Geoeléctricas, sísmicas y caracterización del lodo, del volcán de lodo de Arboletes

El domo volcán de Arboletes se evalúo con prospección geotécnica y geofísica (año 2020) con el fin de complementar y de actualizar la información de las características geotécnicas y estratigráficas del subsuelo y determinar la posición y profundidad de la cámara de lodo.

Además, se analizaron algunas variables físicas y químicas del lodo expulsado por el cráter del volcán. Los resultados de estos análisis fueron fundamentales para estructurar una zonificación, con fines de planificación centrada en el uso responsable y respetuoso del volcán de lodo de Arboletes.

7.3.1 Metodología

Se hace un levantamiento del terreno subsuperficial del domo – volcán mediante:

1 - Siete líneas de tomografía de resistividad eléctrica (ERT: Electric Resistivity Tomography) que siguió la siguiente metodología:

- Visita de campo por parte de un Geólogo especialista para seleccionar los sitios a evaluar.
- Ubicación del rumbo de cada línea ERT mediante GPS. Para obtener los datos de resistividad se usó un equipo de lectura digital marca “Chongquin Gold Mechanical & Electrical”, con corriente hasta 3500 mA, Voltaje hasta 1000V pico a pico y potencia de 3500W.
- A partir de la información de cada una de las líneas, se obtuvo un modelo de capas mediante el uso del programa RES2Dinv y RES3Dinv.
- Se correlacionó la información geofísica obtenida con información geológica de subsuelo obtenida previamente.

2 - Ocho líneas de sondeos sísmicos con Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW: Multichannel Analisis of Surface waves) obtenidas así:

- Despliegue de geófonos cada 5 m en una longitud total de 125 m para las líneas 1 a 7; para la línea 8 el espaciamiento de los geófonos fue de 3 m, para una longitud total de 79 m. Las líneas se dispusieron mediante cinta métrica según la información preliminar de la geología del sitio, estudios anteriores y resultados de las líneas de tomografía eléctrica.

- La información se obtuvo con una ventana de adquisición de 0.4 segundos, con muestreos cada 65 µs y cuatro (4) stacks (apilamientos). Se usaron como fuente sísmica un golpe de martillo de acero de 10 lb en una placa metálica, en siete sitios de cada línea.

3 - Tres perforaciones a 25 m de profundidad en los flancos Este y Sur, la última en la playa en dirección NW desde el domo.

Las líneas de resistividad eléctrica se dispusieron en el arreglo mostrado en la Figura 7.3.1., las líneas de las pruebas de sísmica se muestran en la Figura 7.3.2 y los sitios de las perforaciones se ilustran en la Figura 7.3.3.

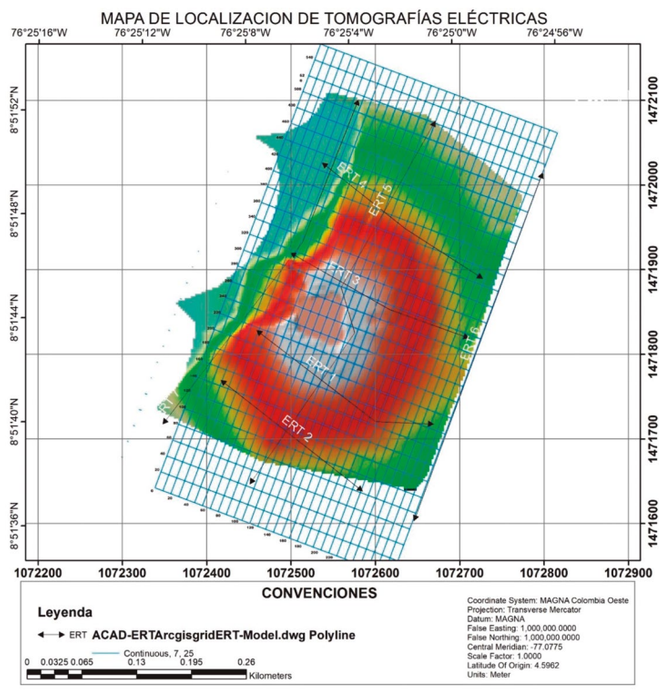


Figura 7.3.1. Localización de las líneas de tomografía de resistividad eléctrica.

Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2021)

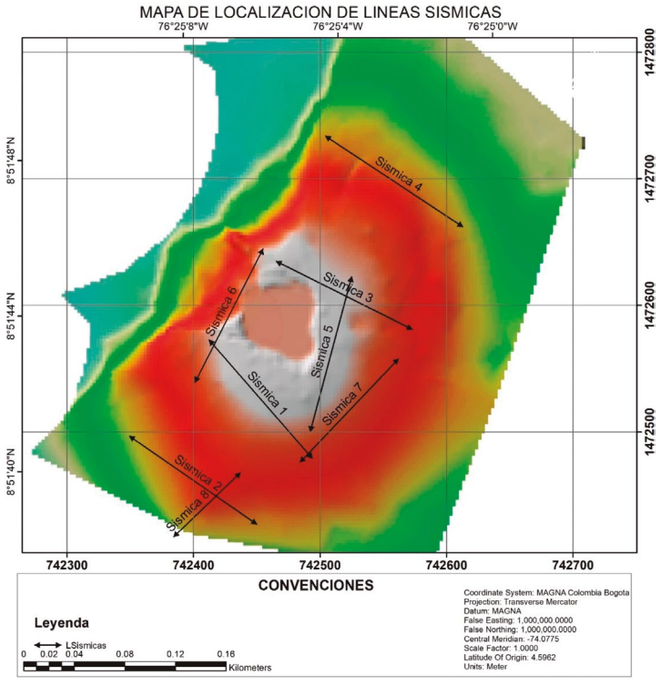


Figura 7.3.2. Localización de las líneas sísmicas.

Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2021)

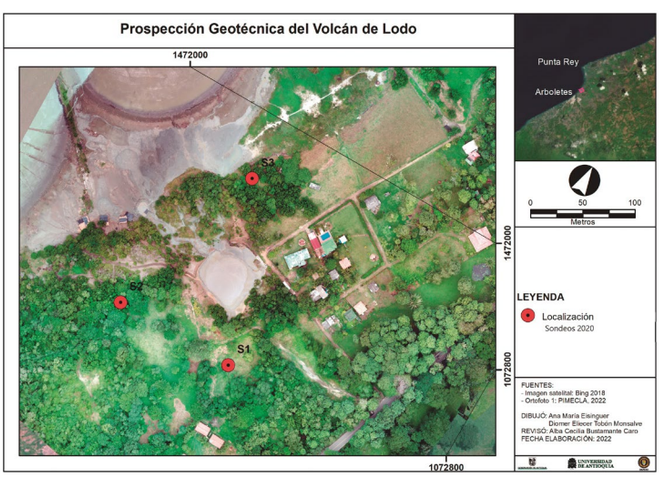


Figura 7.3.3. Localización de los sondeos.

Fuente: Consultorías Geotecnia y Ambiente S.A.S. (2021)

Para caracterizar el lodo expulsado por el cráter se recolectaron muestras en el cráter principal. A estas muestras se les practicaron análisis físicos que incluyeron granulometría por hidrometría, gravedad específica, contenido de humedad, viscosidad y mineralogía, conductividad eléctrica e hidrocarburos totales con difracción de rayos x; los análisis químicos incluyeron determinación de los siguientes elementos Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, Na, K; pH, hidrocarburos totales.

7.3.2 Resultados

7.3.2.1 Prospección geotécnica, sísmica y de resistividad eléctrica

Los resultados de la prospección geotécnica anterior en el área (DEACIVIL, 2019) evidenciaron que el material alrededor del domo del volcán y hasta unos 25 m de profundidad es un material fino con granulometría correspondiente a arcillas, limos arcillosos o limos arenosos, consolidados, pero no litificados. Este material presenta láminas

discontinuas y aleatorias de arenas muy finas, con matriz soportada, sin estructuras o laminaciones y es húmedo, con baja permeabilidad, de plástico a muy plástico y de consistencia blanda. Su comportamiento geomecánico varía en función del contenido de humedad y el mecanismo de falla principal tiene tendencia rotacional, desarrollando superficies de discontinuidad poco profundas (menores a 10 m).

Los resultados de la prospección complementaria del año 2020 hechos en época húmeda, encontraron:

- Un potencial de expansión entre medio y alto: (límite líquido entre 50% a 55% límite plástico entre 28% y 34%), con una tendencia mineralógica de los materiales hacia las arcillas de la familia 2:1 (illitas y montmorillonitas). El nivel freático se encontró a una profundidad de 3m.
- Un potencial de licuación bajo debido a que la totalidad de los materiales son finos y no sufren cambios volumétricos sustanciales al saturarse (no colapsables).
- No son potencialmente colapsables: los materiales lodosos encontrados (granulometría fina) son densos y con una alta microporosidad, con altos límites líquidos en estado de saturación y no son potencialmente colapsables.

Las líneas sísmicas MASW sobre el cráter permitieron detectar flujos de lodo transportados y depositados de forma radial al cráter, sitio de salida de los lodos. Los lodos tienen diferentes grados de consolidación y antigüedad; dependiendo de su lejanía al cráter, siendo los más alejados los que presentan menor humedad y mayor consolidación; los más cercanos al cráter son más fluidos y tienen mayor contenido de humedad. Igualmente, se evidenció una profundidad aproximada de 15 m para el lodo fluido y una estructura interna de forma cónica y paredes verticales. Las líneas de tomografías de resistividad eléctrica permitieron una mayor profundidad de prospección y verificaron lodo fluido de la parte superior de la cámara a 100 m de profundidad, contenido en una especie de bolsa de forma irregular (Figura 7.3.4) y con su mayor extensión y volumen en dirección sur.

7.3.2.2 Caracterización del lodo

Las muestras de lodo se colectaron de varios puntos del cráter principal y los resultados fueron los siguientes:

- Granulometría: materiales muy finos, desde limos gruesos a arcillas (lodos).
- Contenidos de humedad de alrededor de 81% (lodo líquido).
- Gravedad específica: 2.52 a 2.58.
- Viscosidad: el lodo del volcán con altos contenidos de humedad se comporta como un fluido de Bingham seudo plástico; es decir, hacia el centro del cráter y en el canal de drenaje hacia el mar, el lodo tiene altos contenidos de humedad y se comporta como un sólido, cuando los esfuerzos son reducidos o no existen, pero al aumentar estos se comporta como un fluido viscoso. Hacia la periferia del cráter, el lodo pierde, gradualmente la humedad y se comporta como un sólido.
- Mineralogía: se identificaron algunas fases de minerales primarios y de materiales amorfos; no se encontraron fases de minerales secundarios correspondientes a las arcillas 2:1.
- Los resultados de algunos componentes químicos del lodo para las muestras colectadas en el cráter se muestran en la tabla 7.3.1.

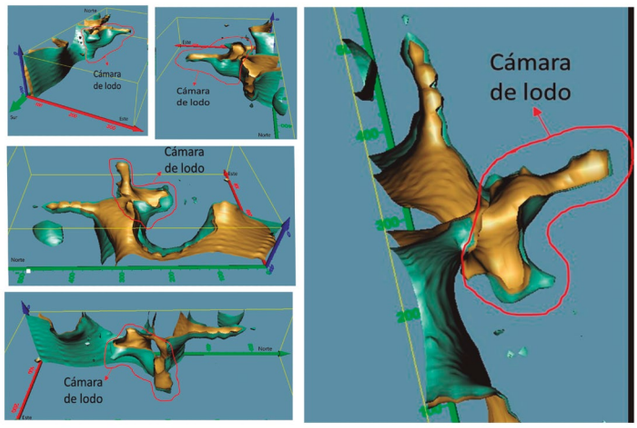


Figura 7.3.4. Modelo de la cámara de lodo obtenido mediante líneas de ERT.

Fuente: HIDROGEO S.A.S. (2020).

Variable	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	ug/g (ppm)	% P/P	ug/g (ppm)	% P/P	ug/g (ppm)	% P/P
Aluminio (Al)	26851	2,6851	24194	2,4194	23549	2,3549
Hierro total (Fe)	44101	4,4101	45376	4,5376	45171	4,5171
Manganeso (Mn)	394	0,0394	437	0,0437	429	0,0429
Cobre (Cu)	44,7	0,00447	45,6	0,00456	45,2	0,00452
Zinc (Zn)	111	0,0111	115	0,0115	114	0,0114
Calcio (Ca)	8869	0,8869	9009	0,9009	8879	0,8879
Magnesio (Mg)	11249	1,1249	11289	1,1289	10963	1,0963
Sodio (Na)	4964	0,4964	4999	0,4999	4370	0,437
Potasio (K)	4208	0,4208	3772	0,3772	3517	0,3517
Hidrocarburos totales	3668	0,3668	3547	0,3547	4077	0,4077
pH	8,65 UpH		8,73 UpH		8,73 UpH	
Conductividad eléctrica	4770 µS/cm		4120 µS/cm		3700 µS/cm	

Tabla 7.3.1. Metales, hidrocarburos totales, pH y conductividad eléctrica del lodo del volcán.

Fuente: Laboratorio de Estudios ambientales, UdeA; 2021

7.4 Monitoreo de la morfología del domo volcán de lodo

La importancia del monitoreo de la morfología de la colina del volcán radica en el hecho de que permite registrar su evolución debido tanto a la dinámica interna del volcán, como a las afectaciones originadas por los agentes ambientales como el viento, la lluvia, la gravedad y las acciones antrópicas.

7.4.1 Metodología

Para obtener la información, se planteó un monitoreo del terreno en un tiempo aproximado de 18 meses, con una serie de levantamientos topográficos y con imágenes aéreas. La topografía se hizo con sistema de posicionamiento diferencial (DGPS) y con aproximadamente 50 puntos de control que sirvieron de referencia para los desplazamientos del terreno. Los puntos de control se fabricaron con tubos de PVC y un plato metálico (Figura 7.4.1).

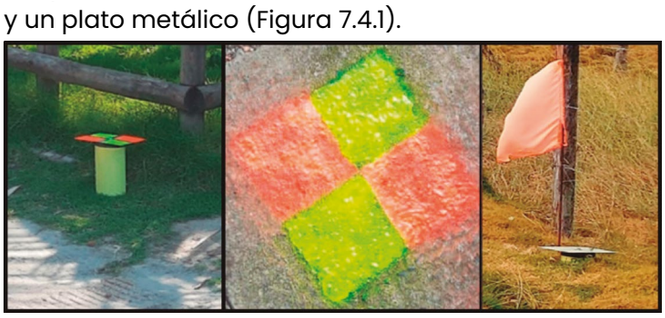


Figura 7.4.1. Puntos de control en el volcán de lodo.

Fuente: Luis Alfredo García Oquendo (2020).

En el primer levantamiento topográfico se establecieron los puntos de control. Las mediciones subsiguientes sobre estos puntos permitieron comparar sus respectivas posiciones con respecto a la inicial e identificar sus movimientos relativos. Es importante aclarar que para este análisis se tuvo en cuenta el margen de error de cada una de las posiciones.

Con el monitoreo a través de vuelos de dron se obtuvieron ortofotos para comparar la evolución del domo volcán en el transcurso del monitoreo. Se encontraron cambios en la superficie del domo, incluyendo aparición de grietas, cárcavas, nuevas estructuras (o intervenciones antrópicas) y cambios en la cobertura vegetal. Los sobrevuelos fueron efectuados a una altura media de 90 m con un plan de navegación (Figura 7.4.2) que el dron repitió periódicamente garantizando la comparación de imágenes de la misma zona en diferente tiempo. Las ortofotos fueron procesadas con una resolución de 3 cm, de modo que se pudiesen detectar cambios superficiales mayores a este valor.



Figura 7.4.2. Plan de vuelo de dron para el área de estudio volcán de lodo.

Fuente: Diseño propio (2020).

7.4.2 Resultados y análisis de resultados

7.4.2.1 Desplazamientos del terreno

A partir del movimiento de los puntos de control se obtuvieron vectores de desplazamiento del terreno (Figura 7.4.3); no se tuvo en cuenta la rapidez de movimiento de los puntos de control, por tanto, el desplazamiento total registrado por cada punto es un desplazamiento promedio.

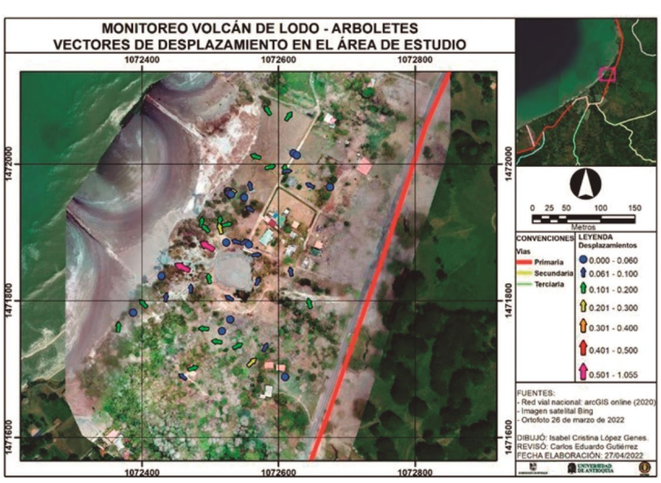


Figura 7.4.3. Mapa de desplazamientos promedio para los puntos de control instalados en la zona de estudio.

Fuente: Diseño propio (2022).

Los puntos localizados sobre el deslizamiento activo (al frente del cráter principal) presentan el mayor desplazamiento, de hasta 1 m en sentido SE – NW, perpendicular a la línea de costa. Para el resto de los puntos localizados en la zona del deslizamiento se presentan diferentes tipos de comportamiento, desde

una aparente estabilidad hasta pequeños desplazamientos del orden de 0.2 m. En la zona de predios particulares se identificaron desplazamientos inferiores a 0.1 m, se puede asumir que esta área es relativamente estable. Para el resto del domo (zonas este, sur y oeste) se tienen desplazamientos en dirección de la pendiente predominante en cada punto, con valores que pueden alcanzar los 0.2 m. En la cima del domo se evidencia que los diferentes puntos de control tienen una relativa estabilidad, principalmente después de haber sido removidas las estructuras que se encontraban allí. Se establecieron bloques de desplazamiento según la dinámica anterior (Figura 7.4.4).

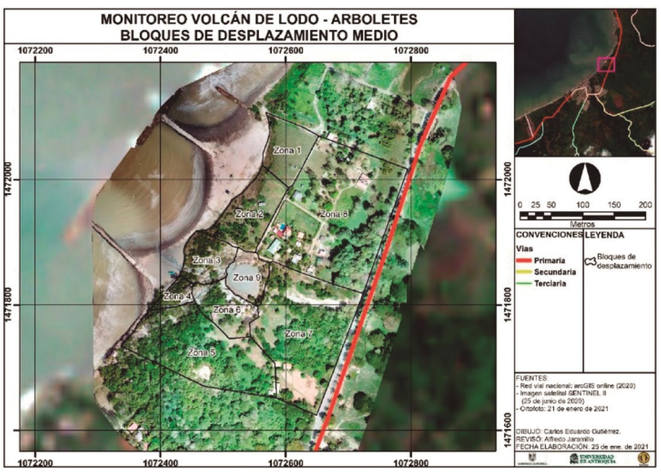


Figura 7.4.4. Zonas de desplazamiento para la zona de estudio.
Fuente: Diseño propio (2022).

Para la geoforma del domo del volcán, se identificaron nueve bloques de desplazamiento: los bloques 1 y 2 corresponden al deslizamiento activo en zona de lotes particulares, el bloque 1 presenta desplazamiento en dirección NE, mientras que para el bloque 2 el movimiento predominante es en dirección NW.

Las zonas 3 y 4 corresponden al deslizamiento activo en la zona del predio de la Gobernación. La zona 3 presenta desplazamiento en sentido NW mientras que la zona 4 tiene una dirección de movimiento hacia el SW.

Las zonas 5 y 6 corresponden al costado sur del domo. La zona 5 es la parte inferior de la vertiente sur y presenta movimientos en dirección WSW, mientras que la zona 6 presenta desplazamientos muy pequeños (0.0 m a 0.06 m) que no permiten identificar si son reales o reflejan movimientos aparentes dentro de los márgenes de error del equipo de medición. Lo anterior hace posible asumir la estabilidad de este bloque.

Las zonas 7 y 8, ubicadas en la vertiente este del domo, presentan pequeños desplazamientos hacia el W.

La zona 9 corresponde al cráter principal y presenta relativa estabilidad respecto a la fase inicial de análisis (inicialmente se observaban desplazamientos de los puntos de control hacia el centro del cráter). Es importante resaltar la presencia de la estructura de contención construida en la parte norte del cráter y que ha permitido estabilizar la vía de acceso adyacente a los predios particulares.

7.4.2.2 Monitoreo de grietas en la zona de estudio

Las grietas son aberturas en el terreno, casi siempre asociadas a desplazamientos. Generalmente presentan una dirección perpendicular al sentido de la pendiente en donde se localizan. Dada la naturaleza de éstas es de esperar que todas, o al menos la gran mayoría, se encuentran en zonas afectadas por movimientos de masa (Figura 7.4.5).

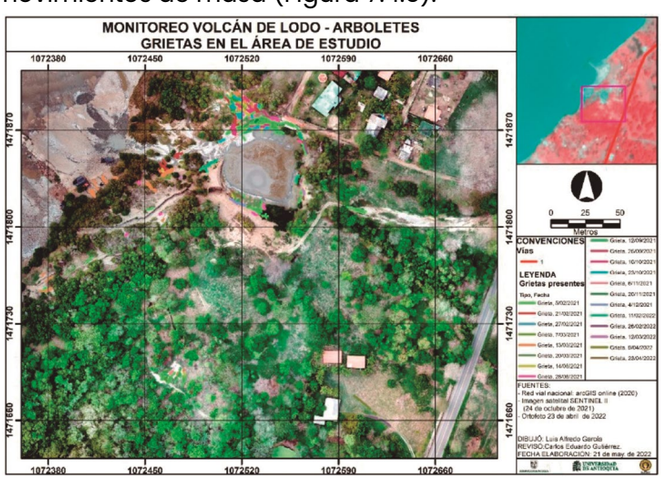


Figura 7.4.5. Grietas presentes en el terreno del área de estudio.
Fuente: Diseño propio (2022).

En la Figura 7.4.5 se observa que la mayoría de las grietas (trazos en color) se encuentra en el talud que presenta el deslizamiento activo, y también que hay algunas grietas alrededor del cráter principal. Las grietas son una manifestación del comportamiento del deslizamiento y, aunque por acción antrópica es posible sellarlas (y de hecho deben sellarse), es muy probable que en el futuro vuelvan a aparecer puesto que no se ha solucionado el factor causante de las mismas.

7.4.2.3 Monitoreo de cárcavas en la zona de estudio

Las cárcavas son fisuras o zanjas en el terreno, con un sentido paralelo a la pendiente del talud y son

causadas por el agua de escorrentía. Aun cuando pueden persistir en el tiempo (se mantienen en época seca), suelen aumentar de tamaño en época húmeda debido al aumento de las precipitaciones (Figura 7.4.6).

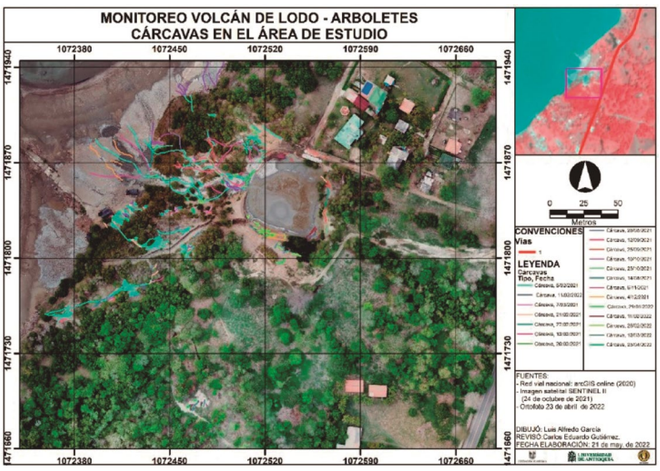


Figura 7.4.6. Cárcavas registradas en el área de estudio.

Fuente: Diseño propio (2022).

Durante el tiempo de monitoreo se identificaron 421 cárcavas con aproximadamente 3750 m de longitud. Esta cifra se redujo debido al relleno de 3060 m por el personal que hace las labores de mantenimiento en el volcán.

7.4.2.4 Monitoreo de estructuras (Construcciones)

Debido a las características geológicas del domo las construcciones pueden ocasionar riesgos para la estabilidad de la geoforma del volcán. Durante el tiempo de monitoreo se registraron cerca de 150 construcciones. Sin embargo, en este mismo tiempo de estudio se logró estimar el retiro de 36 estructuras (Figura 7.4.7).

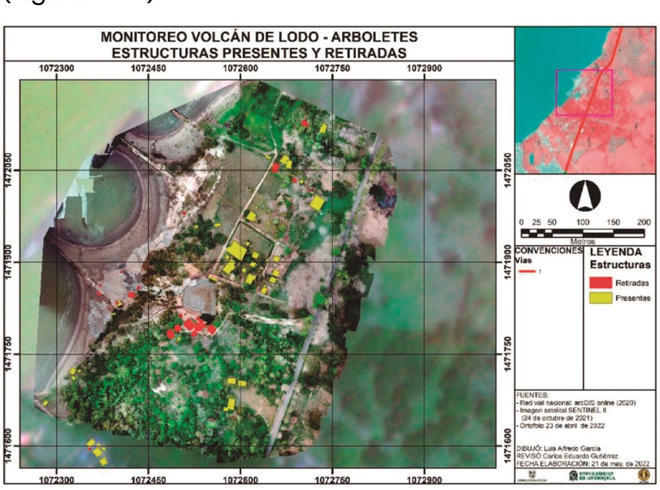


Figura 7.4.7. Estructuras presentes y retiradas en el domo durante el periodo de estudio.

Fuente: Diseño propio (2022).

7.4.2.5 Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados del monitoreo puede concluirse que:

- Las cárcavas y grietas pueden estar asociadas a las épocas climáticas (época seca o época húmeda). Sin embargo, éstas se evidencian mejor en época seca debido a la contracción de las arcillas del domo y a la disminución de la cobertura vegetal, lo que implica una menor protección del suelo ante el efecto de las condiciones medioambientales.
- La estructura de contención construida en la zona norte del cráter principal ha ayudado a estabilizar el movimiento que presentaba la vía aledaña.
- El retiro de las construcciones existentes en la parte superior y al lado del cráter principal no ha tenido gran incidencia en el comportamiento en los desplazamientos en el bloque 6 (cima del cráter).

A partir de lo observado y de lo concluido durante el monitoreo se sugiere:

- Mantener el monitoreo de la geoforma del volcán de lodo con la misma ventana temporal.
- Monitorear el comportamiento de la playa en la vertiente que da al mar, para analizar la incidencia de los diques exentos sobre la misma.
- En caso de construir nuevas obras de infraestructura de tipo turístico en el domo volcán, se propone que estas sean monitoreadas para evaluar la incidencia que puedan tener sobre la estabilidad del terreno.

7.5 Zonificación del predio del volcán de lodo de Arboletes

El conocimiento de las condiciones geológicas y geotécnicas del área de estudio y la evaluación de alternativas de intervención permitió zonificar el predio del volcán de lodo. Esta zonificación se hace a partir del marco legal y se incluyen recomendaciones que se deben tener en cuenta en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Arboletes.

7.5.1 Marco legal

Teniendo en cuenta la legislación actual referente a ordenamiento territorial (Ley 388 de 1997 *"ley de desarrollo territorial"* y el Decreto 3600 de 2007 *"por el*

cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones") y, en especial lo expresado a continuación:

Según el Artículo 1 del decreto 3600 de 2007 se definen los usos del suelo rural en los cuales se destacan:

- **Uso Principal:** uso deseable que coincide con la función específica de la zona y que ofrece las mayores ventajas para el desarrollo sostenible.
- **Uso Compatible o Complementario:** uso que no se opone al principal y concuerda con la potencialidad, productividad y protección del suelo y demás recursos naturales conexos.
- **Uso Condicionado o Restringido:** uso que presenta algún grado de incompatibilidad urbanística o ambiental que puede controlarse de acuerdo con las condiciones que impongan las normas urbanísticas y ambientales correspondientes.
- **Uso Prohibido:** principal de una zona, con los objetivos de conservación ambiental y de planificación ambiental y territorial, y por consiguiente implica graves riesgos de tipo ecológico o social.

Teniendo en cuenta las definiciones previamente presentadas, y la definición de suelo de protección dado por el artículo 35 de la ley 388 de 1997:

Artículo 35. Suelo de protección. Constituido por las zonas y áreas de terrenos localizados dentro de cualquiera de las anteriores clases, que, por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.

Adicionalmente, teniendo en cuenta lo definido por la Ley 3600 de 2007 en su artículo 4 se tiene:

Artículo 4°. Categorías de protección en suelo rural. Las categorías del suelo rural que se determinan en este artículo constituyen suelo de protección en los términos del artículo 35 de la Ley 388 de 1997 y son normas urbanísticas de carácter estructural de conformidad con lo establecido en el artículo 15 de la misma Ley.

Áreas de conservación y protección ambiental. Incluye las áreas que deben ser objeto de especial protección ambiental según la legislación vigente y las que hacen parte de la estructura ecológica principal, para lo cual en el componente rural del plan de ordenamiento se deben señalar las medidas para garantizar su conservación y su protección. Dentro de esta categoría, se incluyen las establecidas por la legislación vigente, tales como:

- Las áreas del sistema nacional de áreas protegidas.
- Las áreas de reserva forestal.
- Las áreas de manejo especial.
- Las áreas de especial importancia ecosistémica, tales como páramos y subpáramos, nacimientos de agua, zonas de recarga de acuíferos, rondas hidráulicas de los cuerpos de agua, humedales, pantanos, lagos, lagunas, ciénagas, manglares y reservas de flora y fauna.
- Las áreas de amenaza y de riesgo. Incluye las zonas que presentan alto riesgo para la localización de asentamientos humanos por amenazas o riesgos naturales o por condiciones de insalubridad.

7.5.2 Recomendaciones

De acuerdo con el marco legal anterior, desde el proyecto se propone que en el lote del volcán de lodo se realice una zonificación constituida por 8 zonas (Figura 7.5.1).

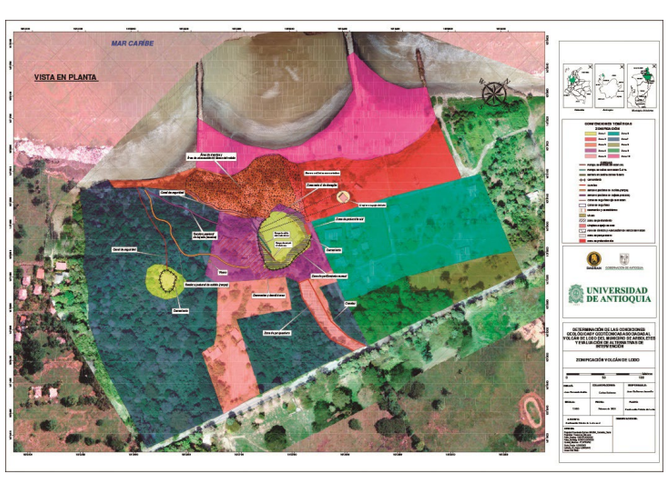


Figura 7.5.1. Mapa de Zonificación del predio del volcán de lodo de Arboletes.

Fuente: Diseño propio.

7.5.2.1 Zona 1

Esta zona comprende los sectores del cráter principal y el rezumadero (oído) del flanco sur. Para esta zona se sugiere prohibir el depósito de cualquier tipo de material dentro de las áreas mencionadas.

7.5.2.2 Zona 2, Zona 3

Comprenden el flanco noroeste (flanco que da a la playa) donde se encuentran los movimientos en masa activos; la zona 2 corresponde a predios privados mientras que la zona 3 corresponde al predio de la Gobernación. Se sugiere prohibir el uso para cualquier tipo de actividad antrópica en todo el costado noroeste del domo diapírico. Lo anterior se plantea dado que hay evidencias de que el deslizamiento que se encuentra en esta ladera permanece activo y, cualquier actividad que se desarrolle en ella puede poner en peligro a las personas e infraestructuras.

7.5.2.3 Zona 4

Corresponde a la cima del domo diapírico, donde se encuentra actualmente la infraestructura destinada a la atención del turismo. La prospección geoeléctrica evidenció la presencia de parte de la cámara de lodo del volcán ubicada bajo la zona aledaña a las construcciones que están en la cima. Por lo tanto, se sugiere:

- No construir estructuras pesadas que requieran de cimentaciones profundas, porque el subsuelo corresponde a parte de la cámara de lodo y a flujos de lodo blando transportado desde el centro del cráter.
- Evitar la circulación de vehículos, maquinaria y equipos.

7.5.2.4 Zona 5

Corresponde al terreno donde se encuentra actualmente el parqueadero, así como a la zona donde están localizadas las cabañas para turistas. La prospección geoeléctrica evidenció que el subsuelo de estas dos zonas presenta los depósitos de lodo más consolidados y rígidos, lo que permite que estas zonas puedan ser empleadas para la construcción de estructuras livianas que no requieran cimentaciones profundas.

7.5.2.5 Zona 6

Corresponde al área norte, donde se encuentran actualmente predios privados destinados a fincas y casas de recreo. Dadas las condiciones generales del domo diapírico, se sugiere que para esta zona se prohíban nuevas construcciones o la ampliación de las estructuras existentes.

Lo ideal sería que en el futuro se pensara en un proyecto de reubicación de las familias que habitan las viviendas existentes.

7.5.2.6 Zona 7

Corresponde al área con cobertura arbórea, para la cual se sugiere un uso restringido o condicionado debido a la presencia del mangle Zaragoza o mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*), especie de la familia *Crombretaceae*. Este tipo de vegetación por lo general alcanza entre 1 y 4 m de altura, pero puede llegar a convertirse en árbol de hasta 20 m de altura. El *Conocarpus erectus* es una especie de los bosques de manglar y como tal, está protegida por el Resolución 1602 del 21 de diciembre de 1995: "Por medio de la cual se dictan medidas para garantizar la sostenibilidad de los Manglares en Colombia".

7.5.2.7 Zona 8

Corresponde a un predio privado cuyo terreno se ubica en el extremo noreste del domo diapírico y limita con la vía a Montería, la zona 7 y la zona 9 (predio particular arborizado con robles: *Tabebuia rosea*). Actualmente tiene un uso de ganadería y el subsuelo presenta lodos transportados consolidados y rígidos; se sugiere limitar la construcción sobre este predio y su adquisición en un futuro para conservación.

7.5.2.8 Zona 9

Predio privado aledaño a la vía que va por el lado norte del domo diapírico, presenta cobertura arbórea y su uso es compatible con el de conservación, se sugiere preservar la cobertura arbórea.

7.5.2.9 Zona 10

Corresponde a la zona de playa y su uso es condicionado o restringido para construcciones.

7.6 Referencias

Carvajal, H. (2015). Mud Diapirism in the Central Colombian Caribbean Coastal Zone. En Landscapes and Landforms of Colombia. Springer Series World Geomorfological landscapes. (págs. 35-53). Hermelin M. (eds).

Consultorías Geotecnia y Ambiente. (2020). Estudio Geotécnico del subsuelo del volcán de lodo de Arboletes- Antioquia. Informe Técnico. Montería, Colombia.

Correa, I. D., & Paniagua, J. F. (2015). The Arboletes-punta Rey Littoral, Southern Caribbean Coast. En M. H. (ed) (Ed.), Landscapes and Landforms of Colombia. Springer Series World Geomorphological Landscapes. (págs. 55-64).

DEACIVIL. (2020). Estudio geotécnico para la estabilización del volcán de lodo en Arboletes, Antioquia. Informe Técnico. Medellín.

Duque-Caro, H. (1984). Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinu-San Jacinto terrane, Southwestern Caribbean borderland. The South American-Caribbean Plate Boundary and Regional Tectonics. Geological Society of America Memoir, 162, 303-316.

HIDROGEO S.A.S. (2020). Estudios geológico-geofísico para la identificación del diapirismo de lodo en Arboletes- Antioquia. Informe Técnico. Montería-Colombia.

INGEOMINAS (2010). Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del Caribe colombiano. Geomorfología Sector I. Bogotá.

Vernette, G. 1. (1989). Examples of diapiric control on shelf topography nand sedimentation patterns on the Colombian Caribbean. Journal of South American Earth Sciences, Vol. 2, No. 4, 391-400.

Vinnels, S., Butler, R., McCaffrey, W., & Paton, D. (2010). Depositional Processes across the Sinu Accretionary Prism, Offshore Colombia. Marine and Petroleum Geology, 27, 794-809.

Vivas, A. (2019). Caracterización y amenaza de los volcanes de lodo en los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá – CORPOURABA. Apartadó (Colombia).133 p + cartografía.



CAPÍTULO

8°

Diseños conceptuales paisajísticos en procura de una ocupación sostenible del litoral antioqueño

PIMECLA
Programa Integral para el Monitoreo
y Mitigación de la Erosión Costera
en el Litoral Antioqueño

Capítulo 8°

Diseños conceptuales paisajísticos en procura de una ocupación sostenible del litoral antioqueño

Autores:

César Augusto Salazar Hernández.

Luis Felipe Lalinde Castrillón.

Ana Isabel Restrepo Martínez.

Isabella Marín Gil.

Juliana Vélez Amaya.

Ana María Osorio Serna.

Marcela Echeverri Palacio.

Pablo Arango Echeverri.

Melani Contreras Chavarría.

8.1 Introducción

Los asentamientos humanos del litoral antioqueño vienen siendo afectados por la erosión costera, situación que dificulta el desarrollo de varias actividades socioeconómicas, así como la permanencia de varios de sus pobladores. La forma como se ha venido ocupando la franja de encuentro entre la parte continental y el mar está en entredicho, ya que en buena medida contribuye al desbalance sedimentario, y porque a su vez, no muestra estrategias claras de adaptación con los eventos derivados del cambio climático. Una de las causas de fondo está asociada a que muy pocos arquitectos, urbanistas y paisajistas están familiarizados con las dinámicas que interactúan en la configuración de los hábitats costeros (Silva et al., 2019)

La Facultad de Arquitectura UPB a través de la formación investigativa de algunos de sus estudiantes espera contribuir al cierre de esta brecha de conocimiento. Por esta razón, en los siguientes apartados se presentan la síntesis de siete monografías cuyos temas de abordaje han sido, soluciones adaptativas para la reconfiguración espacial de sitios costeros en los municipios de Turbo, Necoclí y San Juan de Urabá. Para tal fin, el enfoque conceptual se definió a partir del denominado Landscape Urbanism, el cual emerge tanto como modelo y como medio para el entendimiento de la crisis social, económica y ambiental de los entornos urbanos desde una perspectiva holística (Waldheim, 2016).

El propósito central de esta primera aproximación investigativa ha sido construir un antecedente académico, que determine posibles líneas de indagación desde la arquitectura del paisaje para integrarse con otros campos disciplinares, como lo son: la oceanografía física, la ecología de zonas costeras, entre otras. Por lo tanto, la revisión del material presentado a continuación aún hace parte de investigaciones de carácter exploratorio que requieren de posteriores etapas de corroboración de las hipótesis proyectuales y no pretenden ser considerados como diseños estandarizados para ser implementados.

En los siguientes apartados, se dan a conocer las pautas metodológicas tenidas en cuenta para el reconocimiento de las problemáticas específicas identificadas en cada uno de los sitios costeros. Posteriormente, en los resultados se ofrece un resumen gráfico de las siete monografías, mostrando los procedimientos considerados para llegar en cada caso a una propuesta de diseño conceptual paisajístico. En la parte final, se plantean las conclusiones más relevantes de una experiencia académico investigativa que acerca los estudios de la arquitectura, con las dinámicas del litoral.

8.2 Metodología

La estructura metodológica del proceso investigativo consideró cinco momentos. El primero de estos consistió en una caracterización de las áreas de estudio a través de información secundaria, especialmente la obtenida en las fases I, II y III del programa PIMECLA. En el segundo momento, se efectúo un acercamiento a las nociones conceptuales e instrumentales propias de disciplinas que han venido promoviendo intervenciones sostenibles, en zonas costeras, revisando la pertinencia contextual de varias soluciones basadas en la naturaleza. La tercera fase de la ruta académica se desplegó para que cada uno de los jóvenes investigadores diferenciara la problemática específica del sitio del litoral que le correspondió analizar. Mientras que el cuarto momento se empleó para la sistematización de los resultados obtenidos en la aplicación instrumentos previamente elaborados, y así, revelar los hallazgos más destacados relacionados sobre cómo las formas de ocupación inciden en la erosión costera, y qué tipo de estrategias se podrían incorporar para atenuar dicha situación. En el momento de cierre, se realizó la síntesis proyectual de cada caso de estudio, proponiendo los perfiles de las acciones

estimadas para una reconfiguración de las zonas costeras, integrando algunas variables naturales y socioculturales, claves en el equilibrio dinámico del litoral.

A continuación, se desglosan varios de los procedimientos considerados en cada uno de los momentos metodológicos:

En el primer momento se efectúo un análisis sobre las dimensiones natural, físico construida y sociocultural, para el reconocimiento de problemáticas y oportunidades distinguibles en las áreas costeras de los corregimientos de Uveros y Damaquiel (San Juan de Urabá), la costa urbana de Necoclí y playa La Martina, sector suburbano de Turbo. Empleando la técnica de superposición de capas temáticas (McHarg, 2000), fue posible la identificación de los sectores cuyo uso y apropiación antrópica están ejerciendo mayor presión sobre los ecosistemas costeros que han conllevado al desbalance sedimentario (Gobernación de Antioquia, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021). Los esquemas de análisis procuraron evidenciar como factores asociados especialmente a la marea, el oleaje y el viento, incrementan su accionar erosivo sobre la costa, al haberse reducido significativamente lo que en otrora eran robustas defensas costeras naturales (Silva et al, 2020). Esto, debido a la configuración espacial de asentamientos humanos e infraestructura de producción que no se corresponden con el frágil equilibrio dinámico, propio de las zonas costeras.

Una vez reconocidos los principales factores, tanto naturales como antrópicos, y cómo sus interrelaciones inciden en la erosión costera, el proceso investigativo en su segunda fase indaga sobre qué tipos de tecnologías constructivas y formas de ocupación podrían adaptarse a las restricciones ambientales de cada sitio. El enfoque de las pesquisas se fundamentó en las denominadas soluciones basadas en la naturaleza, considerando que las afectaciones a los ecosistemas marino costeros son la causa de fondo que ha conllevado a los incrementos de las tasas de erosión costera. Para tal efecto, se revisaron varios estudios de caso que han sido recopilados y clasificados en publicaciones como las ofrecidas por la organización Ecoshape (Eekelen & Bouw, 2020), así como de proyectos desarrollados desde el enfoque de ecología urbana (Orff, 2016), y los contemplados en la tesis doctoral Toward the synthetic metamorphosis of the coast (García, 2017).

En el tercer momento, se diseñaron herramientas para el registro de información de campo, consultando a los habitantes y líderes de cada lugar sobre la percepción que tiene la comunidad sobre el riesgo costero, además, para conocer qué significa para ellos vivir en zonas costeras que se vienen constriñendo cada vez más por la erosión. Las actividades desplegadas en el territorio se dieron gracias a la orientación del equipo técnico de PIMECLA (Ver Figura 8.1). En los recorridos de campo los jóvenes investigadores tuvieron la oportunidad de recibir las explicaciones de los expertos entemas oceanográficos de cuales son los factores de mayor incidencia en el desbalance sedimentario, y esto, lo contrastaron con las formas de uso y apropiación antrópica.

En el cuarto momento, se efectúo la sistematización de la información obtenida en campo, tanto para la veri ficación o ajuste de las conclusiones del análisis realizado previamente con información secundaria, frente a los resultados que trajo consigo los recorridos guiados por profesionales del equipo PIMECLA, y especialmente, por los puntos de vista que ofrecieron los ciudadanos consultados (Pascual et al, 2023) en cada una de las tres áreas de estudio.

Y ya en el quinto momento se formularon los criterios de diseño, cruzando los hallazgos del reconocimiento de las áreas que podrían ser objeto de intervención con las tecnologías del paisaje o de soluciones basadas en la naturaleza que podrían aplicarse en cada uno de los casos. Lo anterior, teniendo en cuenta tanto el contexto natural, así como las particularidades de orden sociocultural. Este último aspecto es fundamental en tanto el enfoque definido desde las denominadas adaptaciones basadas en comunidades (Silva et al, 2020).



Figura 8.1. Fotografías de entrevistas y talleres comunitarios liderados por los estudiantes de arquitectura UPB en Turbo, Necoclí y San Juan de Urabá para la consulta de las percepciones del riesgo costero y del acompañamiento del equipo PIMECLA-UdeA en dichas actividades.

Fotografía: Yenny Navarro, 2022.

8.2.1 Resultados

En los siguientes apartados, se presenta el resumen gráfico de siete monografías de arquitectura que han instaurado la línea de diseño sostenible en zonas costeras de la Facultad de Arquitectura en la UPB, como parte del camino de formación de profesionales

del diseño, para que en un futuro cercano contribuyan con la formulación de propuestas para una ocupación más sostenible de los litorales (ver Figuras 8.2 a 8.8). El punto en común de las monografías es la búsqueda de diseños conceptuales híbridos que conjuguen tanto principios de la ingeniería, como de la ecología (Reguero, et al, 2017). Estos ejercicios investigativos que se apoyaron en insumos y procesos efectuados en el marco de PIMECLA, deben ser interpretados como una primera oportunidad para que arquitectos en formación incorporen componentes y procesos de la naturaleza de zonas costeras en diseños que den respuesta a las demandas de las comunidades locales, contribuyendo a su vez a la configuración de infraestructuras verdes para la defensa costera.

Los estudiantes, en el desarrollo de la etapa final de sus monografías, consideraron, según la pertinencia contextual, algunas de las siguiente tecnologías o soluciones basadas en la naturaleza:

- Restauración de playa y sistema de dunas
- Islas barreras
- Restauración de humedales y marismas
- Estructuras sumergidas o semisumergidas
- Bosques y vegetación costera como manglares
- Riberas con distintos tipos de vegetación

Se reitera que los siguientes diseños conceptuales paisajísticos se presentan como una primera aproximación conceptual y no constituyen, por ahora, propuestas que tengan los suficientes componentes y criterios para su materialización de las áreas sugeridas a intervenir. El propósito de estos ejercicios académicos, desde la arquitectura es sumar nuevos elementos para la discusión tanto con profesionales del diseño, así como con otras disciplinas que desde mucho más tiempo atrás han construido significativos aportes para la protección de zonas costeras. A su vez, los diseños conceptuales paisajísticos que se mostrarán en las siguientes páginas, esperan ilustrar algunas soluciones que podrían acordar, tanto las comunidades locales, como las instituciones cuya misión se centra en el ordenamiento territorial sostenible de los litorales.

PAISAJES RESILIENTES A LA EROSIÓN COSTERA Y LAS INUNDACIONES

Juliana Velez Amaya

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

El resumen de esta monografía tuvo como pretensión responderse a la pregunta de cómo las comunidades locales podrían seguir habitando la costa de Damaquiel. Esto considerando los efectos del cambio climático, particularmente el incremento del nivel del mar y la aceleración de la erosión costera, aspectos que vienen poniendo en riesgo la permanencia de los habitantes de este corregimiento.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO





El área de estudio, correspondiente al centro corregimental de Damaquiel, San Juan de Urabá, ha tenido una significativa transformación en su frente costero. Estos cambios se evidencian más en la zona suroriental, la cual ha sido afectada por altas tasas de erosión. Mediante un espolón se intentó contrarrestar tal situación, pero al parecer es insuficiente.

3. MAPA DE CONCEPTOS

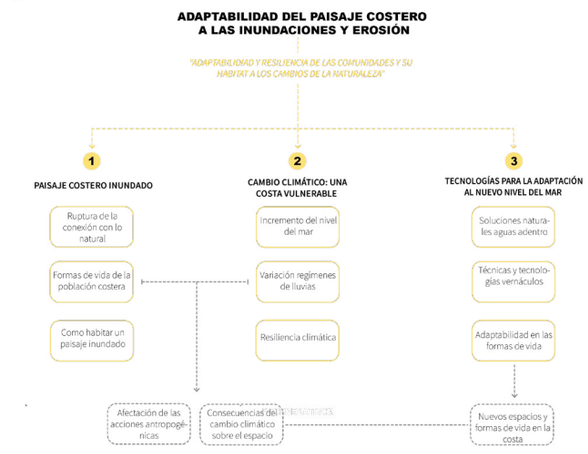


ILUSTRACIÓN. Mapa conceptual. Elaboración Juliana Velez

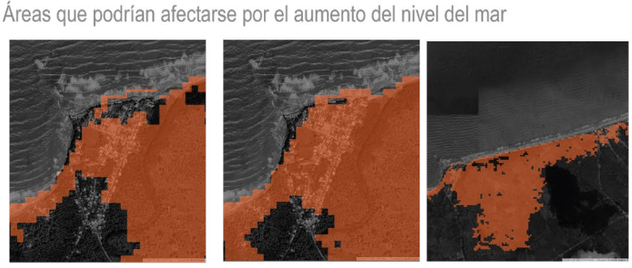


ILUSTRACIÓN. Fotografías contexto Damaquiel. Marzo 2023. Tomada por Juliana Vélez Amaya

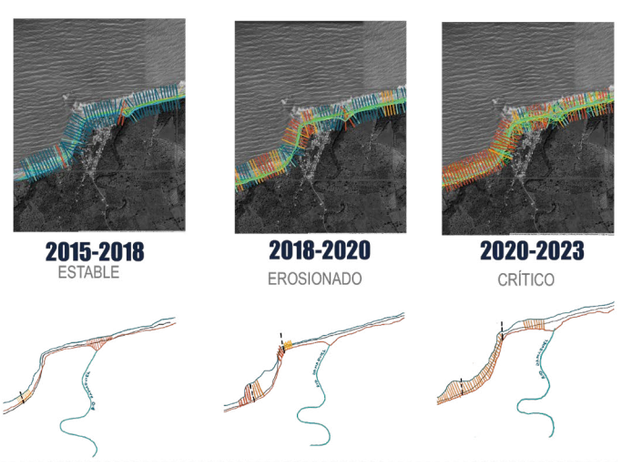
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La costa de Damaquiel se ve afectada por dos grandes problemáticas, la erosión costera, que es más crítica sobre la franja suroccidental con una pérdida de entre 1.4 y 1.8 metros de costa al año y las inundaciones, principalmente sobre la playa del sector este. Esto debido a la combinación de factores naturales, como la geomorfología de la zona y el tipo de suelos, además de otros factores como el cambio climático y las acciones antrópicas sobre el entorno, hace de ésta una zona vulnerable tanto para el ecosistema como para la población que lo habita.

Áreas que podrían afectarse por el aumento del nivel del mar



0.5 m | 1.0 m | San Juan de Uraba



2015-2018
ESTABLE

2018-2020
EROSIONADO

2020-2023
CRÍTICO

Análisis sintesis



Principales fuentes de sedimento | Mayor aporte en época de lluvias | Déficit de sedimentos en época seca

A través de herramientas de análisis de imágenes de satélite, se constató el incremento en las tasas de erosión. Y por medio de aplicaciones de pronóstico disponibles se aprecia que Damaquiel muestra una significativa vulnerabilidad a las inundaciones por el incremento del nivel del mar.

Figura 8.2A. Paisajes resilientes a la erosión costera y a las inundaciones (Vélez, J., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

PAISAJES RESILIENTES A LA EROSIÓN COSTERA Y LAS INUNDACIONES

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Cómo garantizar la permanencia de los habitantes del centro poblado de Damaquiel frente a las inundaciones y la erosión costera?

OBJETIVO GENERAL

Establecer criterios de diseño paisajístico para frentes costeros con riesgo de inundación y de erosión, integrando las formas de vida de los habitantes de Damaquiel y facilitando su permanencia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar el alcance de la afectación de las acciones antropogénicas y el cambio climático sobre el paisaje costero de Damaquiel.

2. Examinar las formas de vida de diferentes asentamientos costeros que logren cohabitar con el litoral de manera sostenible para aprender las estrategias vernáculas de adaptación de éstos.

3. Sugerir alternativas tecnológicas y criterios de diseño, para la consolidación de nuevos espacios que permitan la adaptación de la población a la costa en Damaquiel.

6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

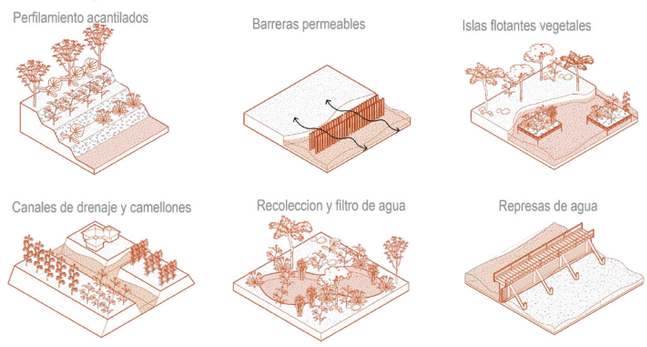
El desarollo de la monografía se apoyó en la revisión documental, cartográfica y de imágenes satelitales para clarificar la situación de partida. Después en la salida de campo se reconocieron las prácticas de las comunidades locales. Y finalmente. se identificaron estudios de caso que ofrecen técnologías del hábitat costero para afrontar los retos identificados.





7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Tecnologías adaptativas base para la generación de una sistema que responde a las de las problemáticas reconocidas.



8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

La solución propuesta combina seis tecnologías para la reconfiguración del paisaje costero de Damaquiel. Todas de carácter multifuncional, sin embargo, las cuatro que se ubican en la franja intermareal, procuran disipar la energía del oleaje y atrapar los sedimentos, mientras las otras dos localizadas en tierra firme se activarían como último recurso ante eventos de inundación.

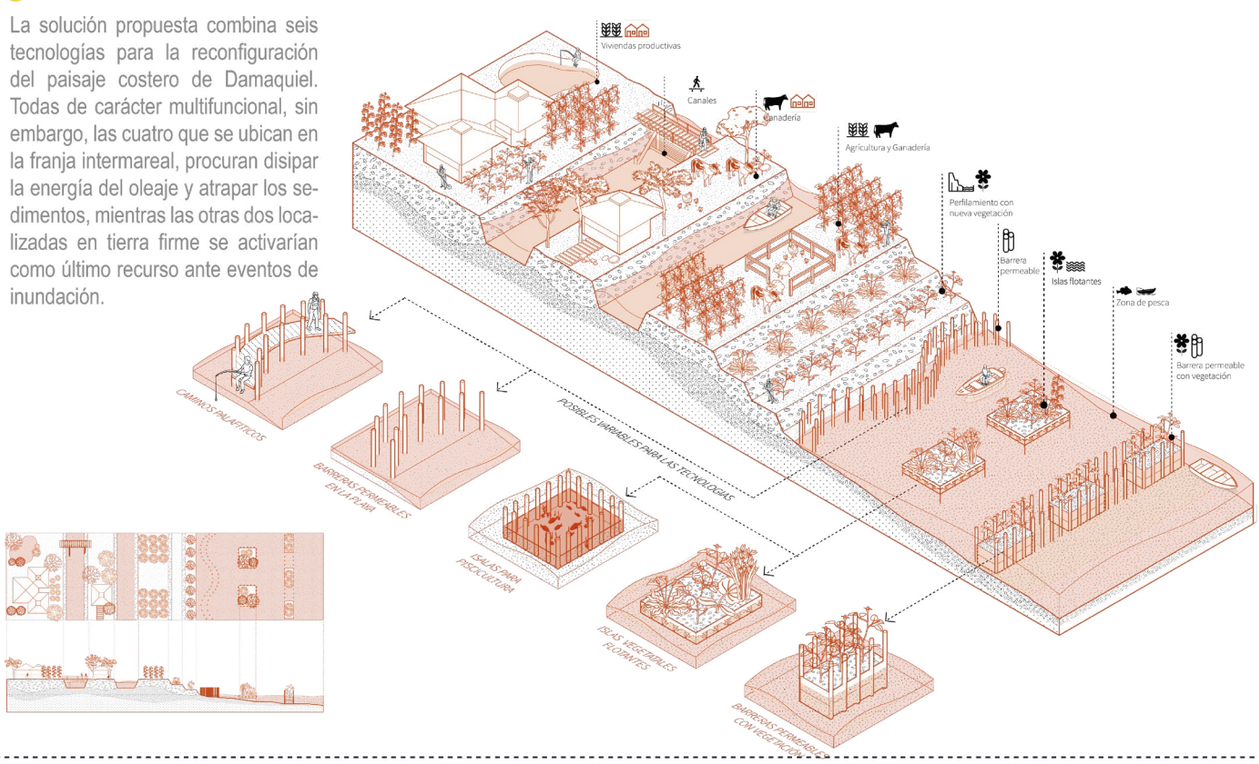


Figura 8.2B. Paisajes resilientes a la erosión costera y a las inundaciones (Vélez, J., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

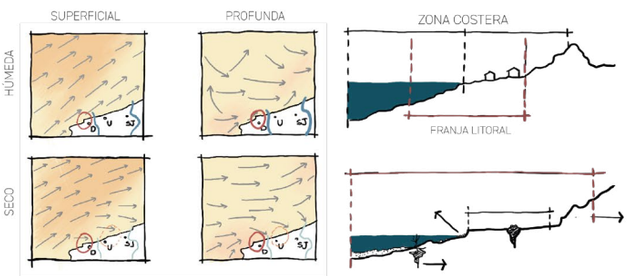
ARQUITECTURA DEL PAISAJE DE LAS COSTAS INUNDABLES

Ana Isabel Restrepo Martínez

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

El resumen de esta monografía aborda el deterioro ambiental de la franja costera de Damaquiel. Parte de esto, se debe en buena medida a la presión antrópica ejercida sobre los humedales y pantanos que dan soporte a un ecosistema tan estratégico como el manglar. Situación que ha incrementado la vulnerabilidad de la población local a la erosión y las inundaciones costeras.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



3. MAPA DE CONCEPTOS

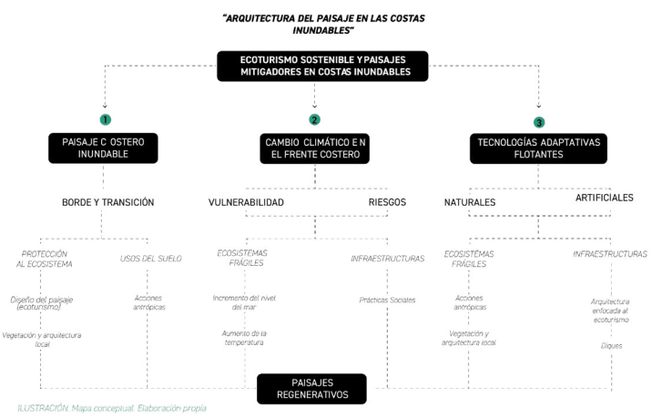


ILUSTRACIÓN. Mapa conceptual. Elaboración propia

El ambiente construído puede llegar a interrumpir el intercambio de flujos de agua dulce y salada propio de los ecosistema de manglar, y además, afectar su estado por el vertimiento de contaminantes.

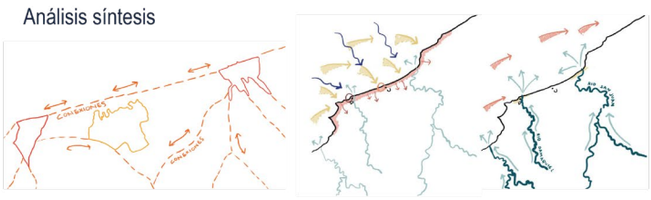


ILUSTRACIÓN. Fotografía contexto. Marzo 2023. Tomada por Juliana Vélez Amaya

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

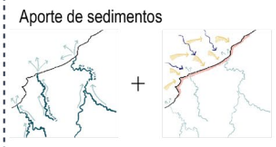
Presión del ambiente construído sobre la desembocadura del río Damaquiel y la playa de arena. Situación que ha debilitado las defensas naturales para contrarrestar la erosión costera y las inundaciones.

Análisis síntesis



Análisis factores naturales

Aporte de sedimentos





Análisis factores socioculturales

Reconocimiento a la comunidad











Figura 8.3A. Arquitectura del paisaje en las costas inundables (Restrepo, A., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

ARQUITECTURA DEL PAISAJE DE LAS COSTAS INUNDABLES

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Cómo re-configurar el borde costero como un paisaje provisto de infraestructura que aproveche su potencial ecoturístico sin afectar los procesos ecosistémicos del manglar y las dunas?

OBJETIVO GENERAL

Plantear lineamientos de diseño paisajístico desde un enfoque ecoturístico y comunitario, incorporando infraestructuras para la adaptación a las inundaciones y al restablecimiento del balance sedimentario.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconocer el ambiente construído próximo a la desembocadura del río Damaquiel y sus afectaciones al manglar y a las playas de arena.

2. Identificar tecnologías del paisaje que contribuyan a la construcción de un hábitat costero sostenible, caracterizado por el ecosistema de manglar y las playas de arena.

3. Ofrecer alternativas de reconfiguración del borde costero combinando de manera teórica algunas tecnologías del paisaje.

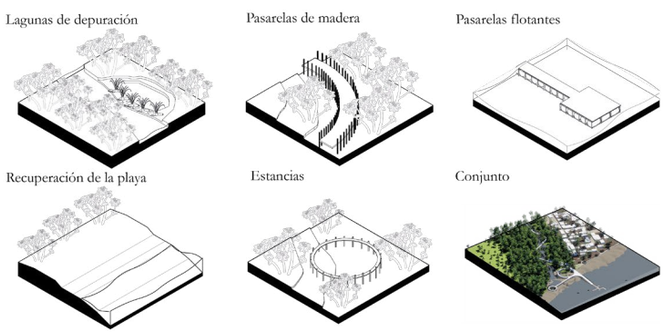
6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

Mediante el recorrido en campo fue posible constatar como las arquitecturas próximas a la desembocadura del río Damaquiel y a la línea de costa aún no incorporan criterios de diseño acordes a la fragilidad de los ecosistemas de manglar y dunar. A su vez, se registró las expectativas de la comunidad por promover el ecoturismo.



7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Integración de la situación actual y analizada del lugar con tecnologías adaptativas aplicadas al territorio.



8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN



El planteamiento de reconfiguración del borde costero se estructura a partir de unas pasarelas elevadas sobre la ronda del río Damaquiel, articuladas a su vez a la estructura del centro urbano y rematando en un muelle flotante. También se aprecia necesario la conformación de lagunas de depuración para filtrar las aguas residuales antes de que tributen al cauce principal. Y sobre la zona intermareal se dispondrían el ahincado de troncos de madera y el sembrado de vegetación para la restauración de las dunas.

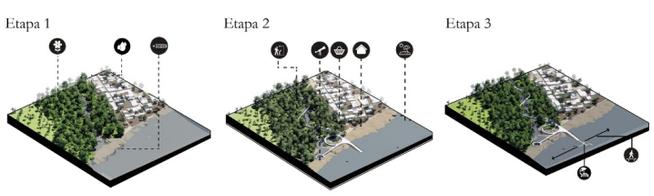




Figura 8.3B. Arquitectura del paisaje en las costas inundables (Restrepo, A., 2023). Corregimiento de *Damaquiel* (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

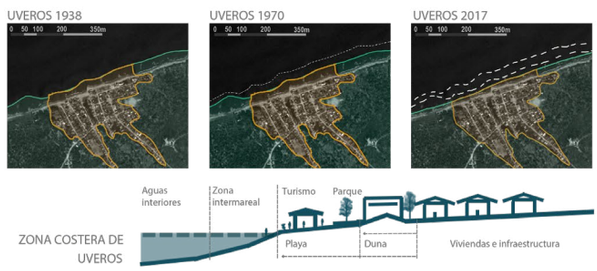
ALTERNATIVAS PARA RECUPERAR EL PAISAJE COSTERO CON POTENCIAL TURÍSTICO EN RIESGO DE INUNDACIÓN

Marcela Echeverri Palacio

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

El resumen de esta monografía aborda la búsqueda de alternativas sostenibles para la mitigación de los efectos erosivos e inundaciones en paisajes costeros como en Uveros, San Juan de Urabá. Dicha búsqueda parte de la compresión de la degradación de los ecosistemas costeros por las actividades antrópicas y las consecuentes pérdidas de defensas naturales frente a los embates climáticos.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



3. MAPA DE CONCEPTOS

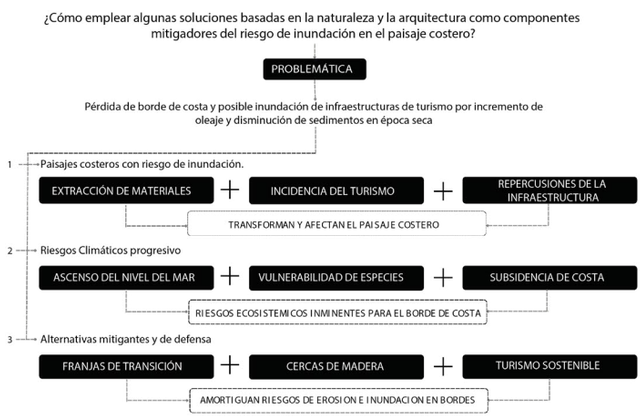


ILUSTRACIÓN. Mapa conceptual. Elaborado por Marcela Echeverri

En el litoral de Uveros se aprecia un significativo retroceso de la línea de costa, situación que ha afectado ecosistemas marino-costeros, así como infraestructura local. Por lo que urge rescatar la costa como una franja de transición e intercambio de energía entre los sistemas terrestres y marinos, en el que las comunidades locales desplieguen de manera sostenible sus actividades socioeconómicas.

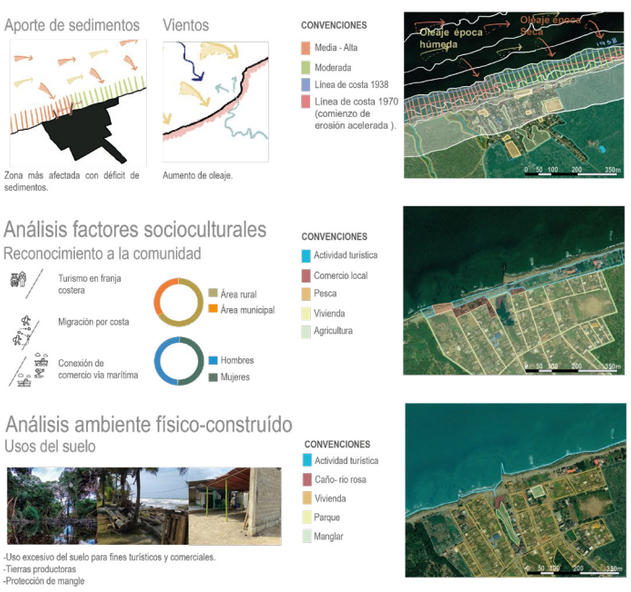


ILUSTRACIÓN. Fotografía contexto. Marzo 2023. Tomado por Marcela Echeverri

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una franja costera de Uveros cada vez más constreñida por la erosión y con amenaza de inundación frente a escenarios de calentamiento global que muestran incrementos significativos del nivel del mar.

Análisis factores naturales y erosión



Análisis síntesis- Tendencia frente a los cambios de la costa en Uveros



Impactos por el calentamieto global

-Incremento del nivel del mar que ha reducido la extensión de las playas de arena de forma significativa en la última década.

Pérdida de fuentes económicas

-Aumentaría el riesgo de inundación en los asentamientos costeros como Uveros, lo que afectaría las infraestructuras para el turismo, así como áreas de cultivo de subsistencia.

Intrusión Salina

-Por el incremento del nivel del mar, las partes bajas de Uveros estarían expuestas al movimiento de agua salada tierra adentro, lo que afectaría las zonas de cultivo.

Figura 8.4A. Alternativas para recuperar el paisaje costero con potencial turístico en riesgo de inundación (Echeverry, A., 2023). Corregimiento de Uveros (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

ALTERNATIVAS PARA RECUPERAR EL PAISAJE COSTERO CON POTENCIAL TURÍSTICO EN RIESGO DE INUNDACIÓN

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Cómo se puede mitigar el riesgo de inundación en Uveros desde soluciones basadas en la naturaleza y arquitectónicas que permitan adaptar la infraestructura turística que se está expandiendo?

OBJETIVO GENERAL

Formular alternativas de mitigación y defensa para recuperar el paisaje costero en Uveros con potencial turístico que está en riesgo de inundación y eutrofización.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconocer las dinámicas sociales y vulnerabilidad de actividades costeras para la identificación de causas de problemas relacionados a la erosión.

2.Analizar acciones antropogénicas en otras costas y como modifican el lugar para una correcta adaptación a su contexto o problemática.

3. Examinar alternativas tecnológicas y de diseño para la protección del borde costero y adaptación del turismo en Uveros.

6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

Al recorrer Uveros se hicieron varios hallazgos.La playa de Uveros tiene barreras y planicies, con riesgo de erosión e inundación debido al aumento del nivel del mar. La forma de la playa cambia debido a la acumulación de arena por olas. El río rosado desemboca en el mar, rodeado de manglares, pero recibe residuos de casas cercanas, lo que afecta al ecosistema y aumenta el riesgo de eutrofización debido a nutrientes y contaminantes en exceso. Ademas, se volvió zona turística por su singularidad del río color rosa.



Estuario | Explicación oleaje | Turismo en borde | Rodeado de manglar | Espolón en costa

7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Se propone una intervención que consta en dos momentos el primero estrategias costeras para reducir la erosión, restaurar dunas y reconfigurar infraestructuras adecuadas para turismo de playa. La segunda, estrategias junto al río, como barreras vegetales para retener y filtrar agua durante inundaciones.

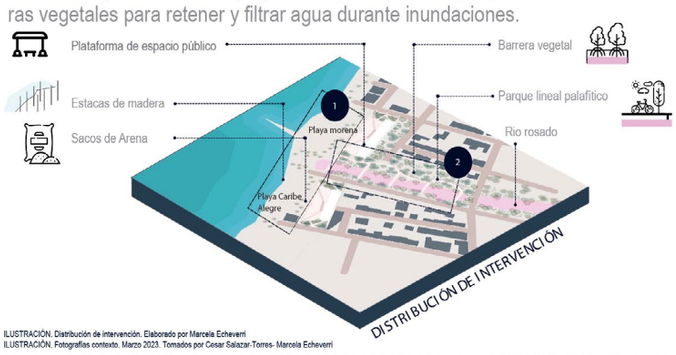


ILUSTRACIÓN. Distribución de intervención. Elaborado por Marcela Echeverri
ILUSTRACIÓN. Fotografías contexto. Marzo 2023. Tomados por Cesar Salazar-Torres- Marcela Echeverri

8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN







La falta de soluciones efectivas para la erosión costera e inundaciones en Uveros se atribuye a las prioridades de infraestructura de las administraciones locales, así como a la falta de investigación y limitaciones presupuestarias. Uveros es especialmente vulnerable debido a su topografía, por lo que se proponen soluciones verdes y duras para equilibrar el turismo y la conservación.

Vegetación en torno al río | Parque lineal en torno al río | Plataformas de Comercio



Frente intervenido

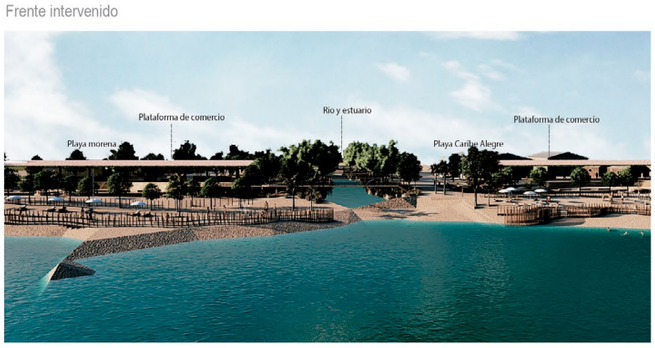


Figura 8.4B. Alternativas para recuperar el paisaje costero con potencial turístico en riesgo de inundación (Echeverry, A., 2023). Corregimiento de Damaquiel (San Juan de Urabá). En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

ARQUITECTURA CONFRONTADA A LA PÉRDIDA DE PLAYA

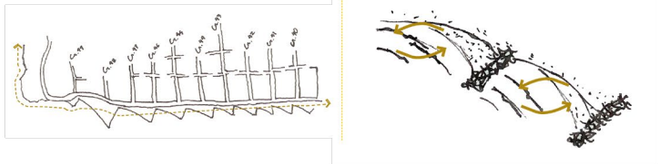
Pablo Arango Echeverry

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

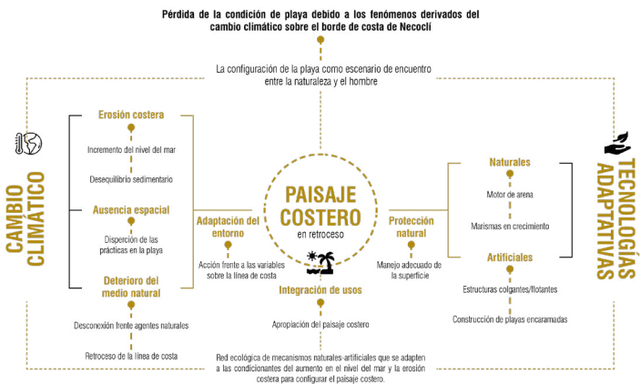
Este resumen de monografía ofrece una aproximación a la erosión costera del centro urbano de Necoclí. Su comprensión parte del reconocimiento tanto de algunas de las variables naturales que intervienen en este proceso, así como de la aceleración del mismo ocasionado por la presión de actividades antrópicas, especialmente las promovidas por el turismo de playa.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

- Análisis del transporte sedimentario en la costa sur.
- Dinámica del mar sobre el borde de costa y los espolones.



3. MAPA DE CONCEPTOS



La erosión costera sobre el litoral antioqueño está fuertemente influenciado por el incremento del nivel del mar, sin embargo, en cada una de las áreas locales se suman otros factores que pueden aumentar las tasas del retroceso en la línea de costa. En el caso de Necoclí, se aprecia necesario plantear alternativas diferentes a la costrucción de espolones, ya que se aprecia como afectan el balance sedimentario en las áreas circunvecinas.



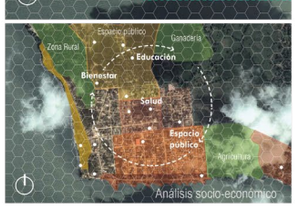


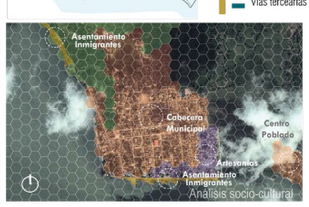
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una playa de arena constreñida en Necoclí por procesos erosivos y la interrupción de su continuidad como espacio público efectivo, debido a la aplicación de obras grises que afectan el transporte de sedimentos.









Análisis físico-natural





Deterioro del espacio a causa de la erosión.



Ausencia de espacio para las embarcaciones artesanales y materiales.



Presencia de mayor vegetación nativa conservada en el lugar.

Figura 8.5A. Arquitecturas para la recuperación de playas (Arango, P., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son del autor.

ARQUITECTURA CONFRONTADA A LA PÉRDIDA DE PLAYA

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Qué tipo de alternativas de defensas costeras se podrían implementar en el frente costero de Necoclí que protejan la playa sin interrumpir el transporte de sedimentos?

OBJETIVO GENERAL

Plantear una serie de infraestructura híbrida costera (verdes y grises) que contribuyan a la recuperación de la playa de arena sin interrumpir el transporte de sedimentos a otras áreas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. **Comprender** los impactos generados por los espolones en el transporte de sedimentos en el frente costero de Necoclí.

2. **Analizar** alternativas de defensas costeras grises y verdes empleadas en playas de arena.

3. **Proponer** alternativas de combinación de defensas costeras grises y verdes que podrían adaptarse al frente costero de Necoclí.

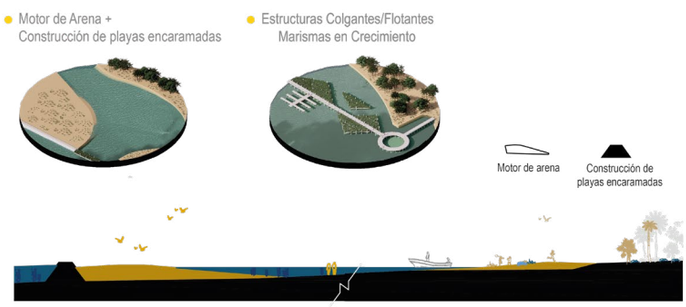
6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

En la salida de campo se pudo constatar el alto nivel de uso y apropiación del frente costero de Necoclí y de las afectaciones que el retroceso de la línea de costa ha traído a las comunidades locales. Así como también el interés de los líderes comunitarios de ser involucrados en el diseño e implementación de otras alternativas de protección costera.



7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Integración de la situación actual y analizada del lugar con tecnológías adaptativas aplicadas al territorio.



8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN



Se aprecia factible la combinación de diferentes medidas de protección costera, empleando obras grises como intervenciones verdes (diques sumergidos, muelles sobre estructuras palifíticas, recuperación de bancos de arena con vegetación de playa, entre otros) que articulados entre sí restablezcan tanto la protección costera, así como la continuidad del espacio público.



Figura 8.5B. Arquitecturas para la recuperación de playas (Arango, P., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son del autor.

RED DE ESPACIOS PÚBLICOS ENTORNO A LA DESEMBOCADURA DEL CAÑO DE JAIME

Ana Maria Osorio Serna

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

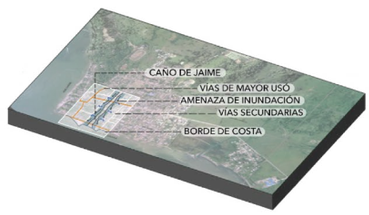
Este resumen de monografía plantea como la recuperación ambiental de la desembocadura del caño Jaime en el golfo de Urabá, podría contribuir a la protección de la playas de arena de Necoclí, y a su vez, a la regulación hídrica para el manejo de las inundaciones sobre su ronda.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Nivel urbano



Desembocadura del caño de jaime



3. MAPA DE CONCEPTOS

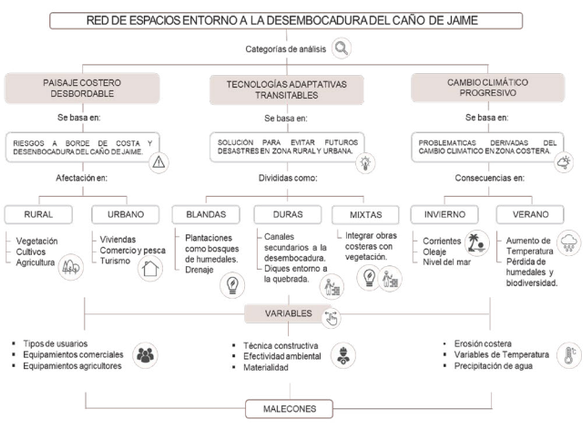


ILUSTRACIÓN. MAPA CONCEPTUAL - ELABORACIÓN PROPIA (2022)

Necoclí es un municipio diverso en lo natural y cultural, destacado por su paisaje costero que atrae al turismo de playa y de mar. Esta actividad económica que sustenta gran parte de sus ingresos propios, se encuentra en dificultades por los efectos del calentamiento global y el vertimiento de contaminantes a su red de drenaje, que afectan los ecosistemas que ofrecen protección natural frente a la erosión costera.



ILUSTRACIÓN. FOTOGRAFÍA AÉREA, ALCALDÍA DE NECOCLÍ - INTERVENCIÓN PROPIA (2022)

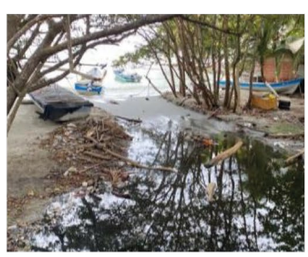
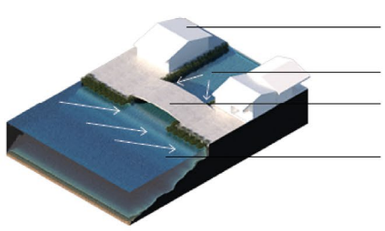


ILUSTRACIÓN. FOTOGRAFÍAS PROPIAS DEL LUGAR (2022)

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

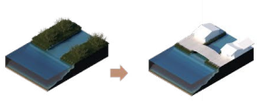
La ronda hídrica del caño Jaime ha sido ocupado de forma inadecuada, tanto por el tejido residencial como por las actividades comerciales y turísticas. La reducción de las zonas verdes y el vertimiento de aguas residuales ha afectado al manglar, ecosistema que entre varios de sus servicios ambientales, se constituye en una defensa natural contra la erosión costera.

Análisis síntesis



- Las viviendas se encuentran cada vez más cerca al caño.
- Por el mal cuidado del caño el agua esta contaminada y causa inundaciones.
- Se ven afectadas las vías cercanas.
- Las corrientes del viento no ayudan a que el agua fluya mejor.

Análisis factores naturales





Análisis factores socioculturales

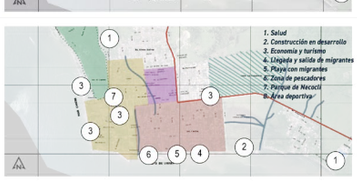
1 - 7 Edificios públicos y de mayor tránsito.





Análisis ambiente físico-construído

1 - 8 Puntos estratégicos.



Usuarios.

- Pescadores
- Turistas
- Migrantes

Economía.

- Pesca
- Hotelería
- Restaurantes
- Transporte

Amenaza de inundación y erosión costera



Pérdida de manglar por la expansión urbana

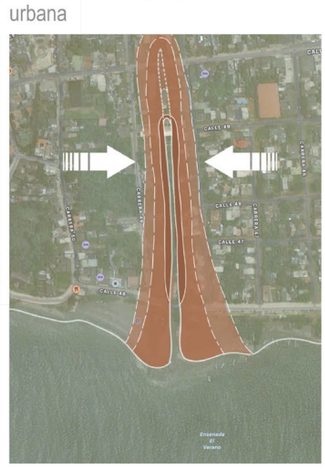


Figura 8.6A. Red de espacios públicos entorno a la desembocadura del caño Jaime (Osorio, A., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

RED DE ESPACIOS PÚBLICOS ENTORNO A LA DESEMBOCADURA DEL CAÑO DE JAIME

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Cómo recuperar la ronda hídrica y la desembocadura del caño Jaime por medio de la configuración de un espacio público para un uso sostenible del borde costero?

OBJETIVO GENERAL

Proponer una infraestructura urbana que genere espacios públicos adecuados para sus habitantes y turistas desde un punto de vista ambiental, de forma que ayude a dar solución a las problemáticas que se dan en la desembocadura del caño de Jaime.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconocer infraestucturas locales ya empleadas para adaptarlas a franjas costeras inundables.

2. Plantear estrategias de recuperación de zonas verdes públicas en el caño Jaime y su articulación al tejido residencial circundante.

3. Reconfigurar la red de espacios públicos de la desembocadura del caño Jaime de tal forma que facilite la recuperación ambiental y el desarrollo de las actividades comerciales y turísticas.

6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

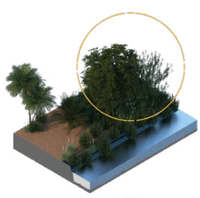
En el recorrido de campo se constató la ocupación informal de la ronda hídrica del caño Jaime, así como el vertimiento de aguas residuales sobre éste. A su vez, en los talleres de participación la comunidad local expresó la necesidad del diseño de infraestructura que regule las actividades comerciales y turísitcias próxima a la desembocadura del caño.

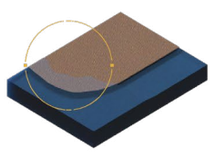


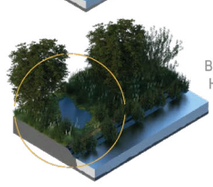


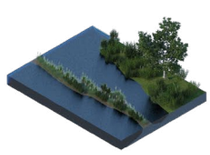
7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Solución a la problemática desde las tecnologías adaptativas.

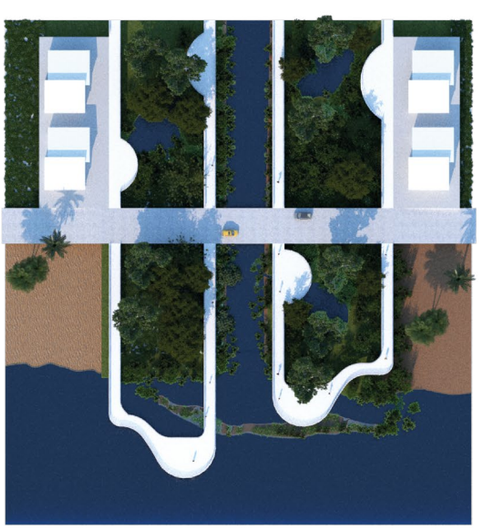

INTEGRAR LA VEGETACIÓN


REALINEACIÓN COSTERA

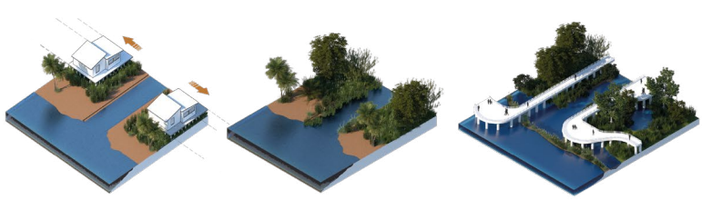

BOSQUES DE HUMEDALES


DIQUES NATURALES

8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN



La recuperación ambiental de la desembocadura y de la ronda hídrica del caño Jaime sería factible realizarlo a través de unas plataformas elevadas que garanticen la continuidad del espacio público costero para tal turistas y habitantes, y a la par, el área mínima suficiente para el restablecimiento del manglar que ha sido afectado.



ETAPA 1

REDISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS EN RIESGO

ETAPA 2

RECUPERACIÓN DEL MANGLAR COMO SISTEMA DE REGULACIÓN HÍDRICA

ETAPA 3

RECORRIDOS PARA EL TURISMO Y PROTECCIÓN DEL PAISAJE.





Figura 8.6B. Red de espacios públicos entorno a la desembocadura del caño Jaime (Osorio, A., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

CONFIGURACIÓN DE PAISAJES RURALES COSTEROS

Isabella Marin Gil

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

El resumen de esta monografía se aproxima a la afectación de equipamientos sanitarios por la erosión costera. En este caso se plantean alternativas de la combinación de tecnologías para la disipación de la energía del oleaje que golpea el acantilado, y a la vez, se incorporen como componentes del espacio público.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



La erosión costera al norte de la cabecera municipal y en límites con el ámbito rural se ha visto especialmente afectado por el retroceso significativo de la línea de costa. Al punto que equipamientos colectivos como el cementerio han perdido buena parte del suelo que soportaba su infraestructura, y a la par, ha visto como se socava parte de los componentes del espacio público costero.



ILUSTRACIÓN. Fotografía contexto. Marzo 2023.

3. MAPA DE CONCEPTOS

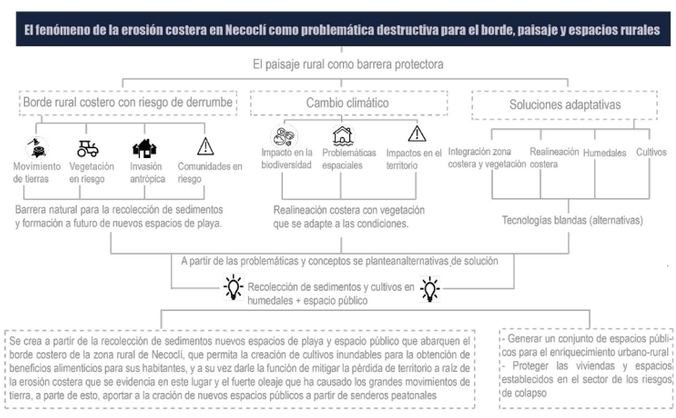


ILUSTRACIÓN. Mapa conceptual. Elaboración propia

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cementerio de Necoclí afectado en la prestación de los servicios funerarios y conservación de sus criptas por el retroceso de la línea de costa. Y a su vez, pérdida de áreas efectivas de espacio público costero.

Análisis ambiente físico - construído

Usos del suelo



Análisis factores socioeconómicos

Actividades

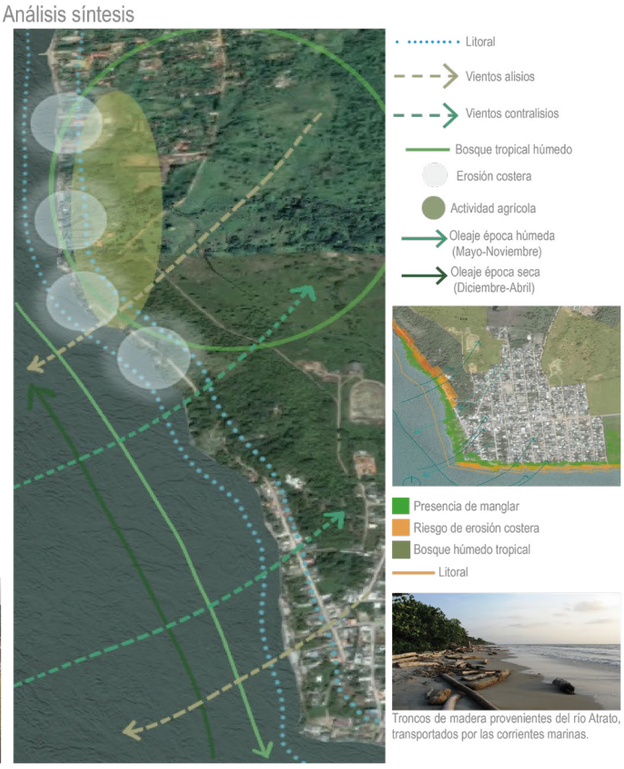


Análisis ambiente natural

Riesgos



Análisis síntesis



Troncos de madera provenientes del río Atrato, transportados por las corrientes marinas.

Figura 8.7A. Configuración de paisajes rurales costeros (Marín, I., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

CONFIGURACIÓN DE PAISAJES RURALES COSTEROS

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

¿Cuáles tecnologías de disipación del oleaje podrían emplearse en el cementario de Necoclí para la estabilización del borde costero?

OBJETIVO GENERAL

Plantear un conjunto de acciones en el borde costero del cementerio de Necoclí que contribuyan a la disipación de la energía del oleaje y por ende a la protección del acantilado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar tecnologías que se adapten a franjas costeras de acantilados deleznables que disipen la energía del oleaje.

2. Considerar los ritos funerarios en la recuperación del cementerio en el costero urbano-rural de Necoclí.

3. Proponer una combinación de tecnologías verdes para la estabilización del acantilado del cementerio de Necoclí.

6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el recorrido de campo y en el taller de participación ciudadana con algunos habitantes locales se facilitó el reconocimiento de la apropiación social de la franja costera. Así como también, el registro de la percepción de los líderes comunitarios sobre el retroceso de la línea de costa y de su interés por la implementación de defensas costeras más integrales.

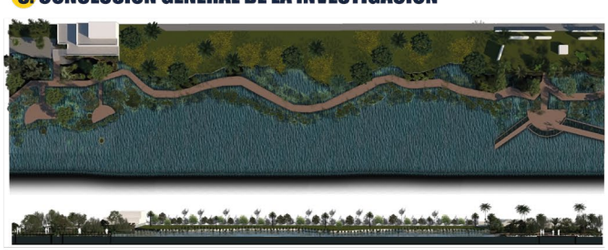


7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Se busca dar una alternativa de solución a la situación actual con las tecnologías adaptativas:



8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN



Se considera que es posible la reconfiguración del borde costero del cementerio de Necoclí, empleando varias tecnologías verdes que deberían articularse entre sí. Esto para la disipación del oleaje como principal factor erosivo, y a la par, para ofrecer una nueva espacialidad pública costera.

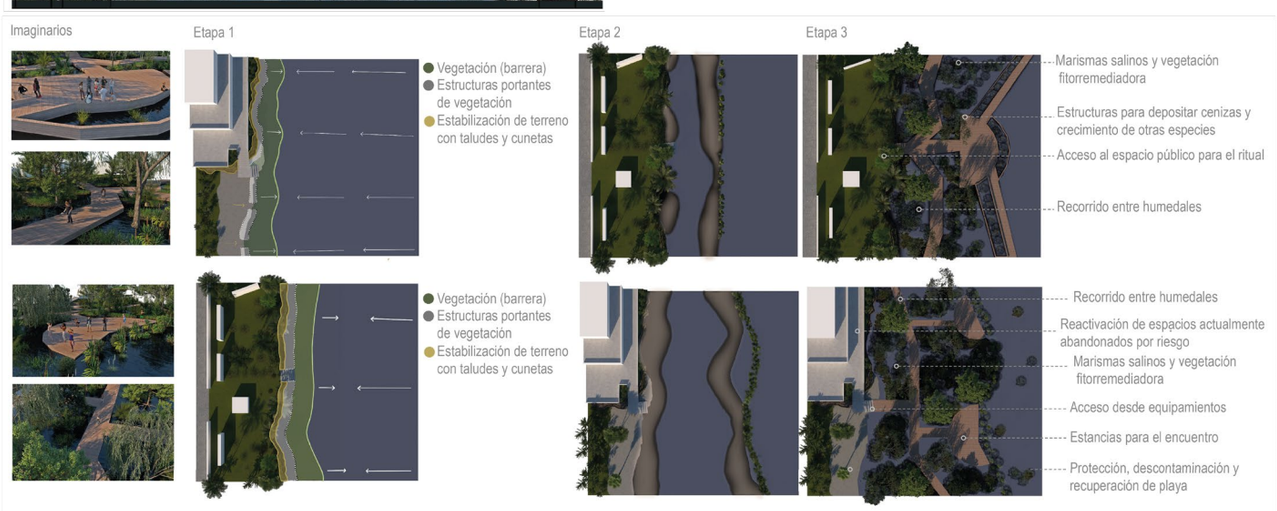


Figura 8.7B. Configuración de paisajes rurales costeros (Marín, I., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

INFRAESTRUCTURA MIXTA HABITABLE

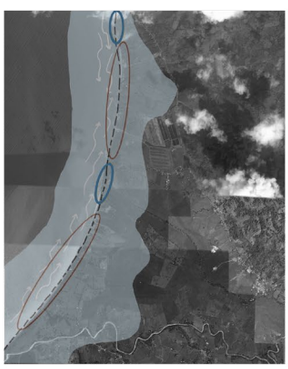
Melany Contreras Chavarría

1. INTRODUCCIÓN : ¿DE QUÉ SE TRATA?

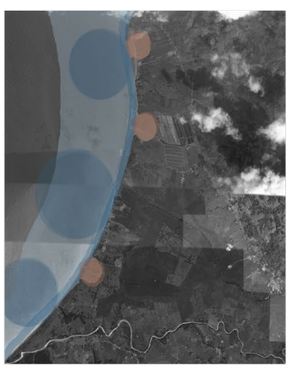
Este resumen de monografía se fundamenta en el reconocimiento de las formas de ocupación preexistente de la playa La Martina. Y a su vez, en como las comunidades locales se han visto afectadas por la erosión costera. A partir de la vocación ecoturística prevaleciente en el sector se plantea la posibilidad del mejoramiento de la infraestructura de esta actividad económica y que a la par, contribuya al restablecimiento del balance sedimentario para la protección de las playas de arena.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sector de la playa La Martina se constituye en un área de oportunidad de desarrollo económico para Turbo, dado su atractivo turístico a escala local. Sin embargo, este potencial se encuentra en riesgo de no ser debidamente aprovechado sino se ofrecen medidas de mitigación de la erosión costera.

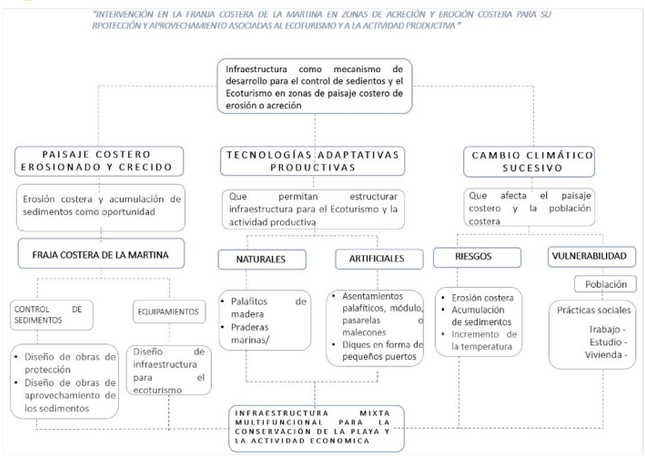


El desbalance sedimentario en la playa La Martina se debe a una combinación de factores naturales y antrópicos que deben ser comprendidos para la definición de acciones multifuncionales. Se requiere una infraestructura que interprete el comportamiento dinámico de las franjas costeras.



Las infraestructuras a definir deben incorporar componentes flexibles que se adapten a los cambios de las temporadas climáticas, así como a las demandas socioeconómicas de una población local que se dedica no solo al turismo sino también a la pesca y al agricultura.

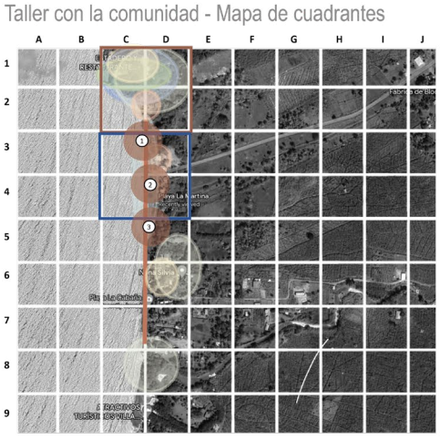
3. MAPA DE CONCEPTOS

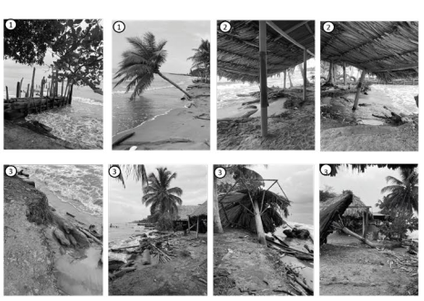


4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una playa de arena cada vez más constreñida por el desbalance sedimentario en el sector de La Martina. Situación que viene afectando sensiblemente los medios de subsistencia de las comunidades locales. Comunidades que a su vez, demandan ser tenidas en cuenta en el diseño de las medidas a implementar para asegurar que se consideren sus actividades socioeconómicas.

Taller con la comunidad - Mapa de cuadrantes





Análisis factores naturales



Identifique con el color correspondiente

- ¿En que cuadrante evidencia que el mar ha ganado terreno sobre la playa?
- ¿En que cuadrante identifica que la playa le ha ganado terreno al mar (acumulacion de sedimentos)?
- ¿En que cuadrante evidencia mayor riesgo de inundación?
- ¿En que cuadrante evidencia deforestación?
- ¿En qué cuadrante identifica mayor conjunto de arboles. y plantas?
- ¿En qué cuadrante identifica mayores atractivos turísticas ?
- ¿En qué cuadrante: identifica mayor actividad económica?

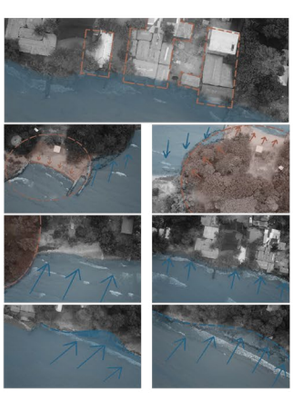


Figura 8.8A. Infraestructura mixta habitable (Contreras, M., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 1. Introducción; 2. Localización; 3. Enfoque conceptual; 4. Planteamiento del problema. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

INFRAESTRUCTURA MIXTA HABITABLE

5. OBJETIVOS Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué tipo de infraestructuras grises y verdes podrían integrarse en la reconfiguración de la playa La Martina para contribuir al balance sedimentario?

OBJETIVO GENERAL

Proponer estrategias de control de sedimentos con infraestructura mixta en la franja de playa La Martina que beneficie a la comunidad y aporte al balance de sedimentos que conservan la condición de playa y de territorio costero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Reconocer infraestructura habitable mixta que permita el control de la distribución de sedimentos de manera equitativa a lo largo de la franja costera de La Martina.

2. Valorar el ecoturismo desde la arquitectura, como principal actividad económica que aumente los paisajes verdes y permita un sustento económico a los habitantes y la aporte a valorización de la zona.

3. Aplicar infraestructura palafítica en la franja costera de La Martina que permita el desarrollo de las diferentes actividades y promueva la interacción del ecoturismo con la comunidad y la vegetación local.

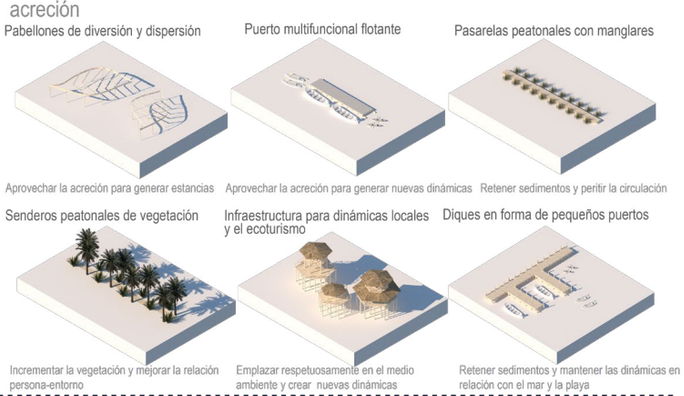
6. HALLAZGOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el recorrido realizado en campo, así como en la interacción con líderes de las comunidades locales de playa La Martina se pudo constatar la necesidad de mejorar la infraestructura de servicio para el turista, y en paralelo, para contribuir al restablecimiento del balance sedimentario.



7. SÍNTESIS DE LA IDEA PROYECTUAL

Infraestructura mixta habitable como mecanismo de desarrollo para el control de sedimentos y el ecoturismo en zonas de paisaje costero que presentan erosión o acreción



8. CONCLUSIÓN GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN





La propuesta se basa en un conjunto de infraestructura mixta habitable sobre la franja costera de la playa La Martina. Combina diferentes tecnologías adaptativas en función del ecoturismo, la protección de la playa y el desarrollo del territorio. Estas también ayudan a controlar el fenómeno de erosión, aprovechan las zonas de la playa en condición de acreción y generan espacios y oportunidades para el desarrollo de actividades sociales, culturales y turísticas. De esta manera, incrementan los valores del lugar y se contribuye con la idea de Turbo como ciudad puerto para el desarrollo sostenible.

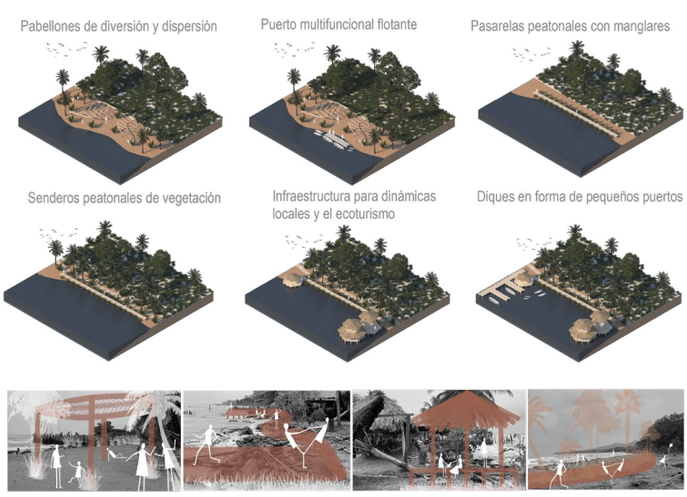


Figura 8.8B. Infraestructura mixta habitable (Contreras, M., 2023). Centro urbano de Necoclí. En la ficha se muestran: 5. Objetivos; 6. Hallazgos; 7. Síntesis proyectual; 8. Conclusión. Todas las imágenes y fotografías son de la autora.

Juliana Vélez Amaya (Vélez, J., 2023), en su monografía titulada *"Paisajes resilientes a las inundaciones y a la erosión. Damaquiel, Antioquia"* plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible seguir habitando las costas a pesar de los eventos producidos por el cambio climático?, luego de identificar, por ejemplo, que el aumento de las temperaturas y el incremento del nivel del mar provoca desbalances en los ciclos naturales que derivan en problemáticas como la erosión y las inundaciones de las costas. En esta monografía se proponen criterios de diseño y de tecnologías para que la comunidad de Damaquiel, en Urabá, pueda enfrentar y buscar soluciones a esta problemática, posibilitando la permanencia en su centro poblado; plantea, además, la necesidad de que las comunidades que viven más próximas a la línea de costa integren sus formas de habitar con los ciclos y dinámicas costeras.

Por su parte, Ana Isabel Restrepo Martínez (Restrepo, A., 2023), en su monografía titulada *"Arquitectura del paisaje en las costas inundables. Reconfiguración paisajística del borde costero entre Damaquiel y Uveros"*, se centra en la comprensión del deterioro ambiental de la franja de transición urbano rural entre los dos centros corregimentales costeros del municipio de San Juan de Urabá. En dicha franja se evidencia como la expansión de la frontera agrícola y la ocupación suburbana ha venido menguando significativamente la extensión y la densidad del manglar, ecosistema que contribuye notablemente a la regulación hídrica, así como a la atenuación del impacto de la marea y del oleaje sobre la línea de costa. Esta monografía realiza una propuesta que brinda alternativas de diseño conceptual paisajístico para la articulación de los centros poblados con las zonas de manglar en procura de conservar los humedales y pantanos costeros que dan soporte a este ecosistema.

Mientras tanto, Marcela Echeverri Palacio (Echeverri, M., 2023), en su monografía titulada *"Alternativas para recuperar el paisaje costero con potencial turístico en riesgo de inundación. Uveros - San Juan de Urabá"* plantea soluciones para abordar las problemáticas de erosión y de riesgos de inundación en zonas costeras en el entorno de la desembocadura del río Rosado en el golfo de Urabá. Igualmente esta monografía propone una intervención tanto sobre el frente marítimo para la recuperación de las playas y el sistema dunar, así como un parque lineal que recupere las rondas de los retornos del río Rosado, posibilitando el repoblamiento del manglar y otro tipo de flora que se adapte a las condiciones de inundación. Las arquitecturas que acompañan estas acciones se plantean de una forma tal que no interrumpan las estrategias de recuperación. Al contrario, las plataformas, senderos, miradores y demás componentes arquitectónicos se hibridan con la infraestructura verde.

Pablo Arango Echeverri (Arango, P., 2023), en su monografía titulada *"Arquitectura confrontada a la pérdida de playa. Mecanismos de adaptación frente la pérdida de la condición de playa sobre el borde de costa en Necoclí",* propone un acercamiento al proceso de la erosión costera en la zona sur del centro urbano Necoclí. Formular, mediante un diseño, una red de mecanismos adaptativos para la sustitución de los espolones y tómbolos, por infraestructuras sumergidas que puedan ser colonizadas por fauna y flora marina para que se constituyan en trampas naturales de sedimentos, sin interrumpir el tránsito de estos hacia otros sitios de la línea de costa. Los componentes arquitectónicos son planteados entre la zona de playa y la franja intermareal para facilitar el desarrollo de las actividades turísticas, integrándose al sistema de los diques sumergidos.

Ana María Osorio Serna (Osorio, A., 2023), en su monografía titulada *"Red de espacios públicos en torno a la desembocadura del caño de Jaime. Recuperación del manglar como conjunto de recorridos y estancias para el disfrute de la comunidad y de los turistas"* también se aproxima al sector sur de la costa del centro urbano, pero centrando su atención en la desembocadura de aguas contaminadas muy próximas a playas de uso turístico. En la monografía se propone la recuperación de la ronda de este sistema de drenaje, sugiriendo en algunos casos la reubicación de algunas viviendas que ocupan de forma no adecuada la ronda de inundación. La idea planteada es la configuración de una red de senderos elevados que permitan la interconexión longitudinal y transversal, de tal forma que con la recuperación del suelo el manglar encuentre las condiciones para su repoblamiento.

Isabella Marín Gil (Marín, I., 2023), en su monografía titulada *"Configuración de paisajes rurales costeros. Resiliencia y cambio climático"*. Este se centra en la frontera urbano rural de Necoclí, más específicamente en el cementerio municipal, cuyas criptas están en riesgo por el desmoronamiento de su base. En esta monografía se plantea el uso de diferentes acciones para atenuar la fuerza del oleaje sobre los acantilados, entre estas sugiriendo el empleo de estructuras semisumergidas y sumergidas que sirvan de soporte a la plantación de especies que en su consolidación amortigüen el impacto de la marea y del oleaje. La idea proyectual muestra como la implementación tendría que efectuarse por etapas, hasta lograr que se cuenten con las condiciones para el restablecimiento completo del equipamiento y el despliegue de los rituales funerarios.

Melany Contrera Chavarría (Contreras, M., 2023), en su monografía titulada *"Infraestructura mixta habitable. Mecanismo de desarrollo para el control de sedimentos y el ecoturismo en zonas de paisaje costero que presentan erosión o acreción de La Martina"*, concentra

su reflexión en la zona de La Martina, especialmente en lugares de reconocido valor agrícola, ganadero y turístico. De estas actividades económicas se destaca el turismo que se ve afectado por diferentes factores, naturales y antrópicos, que vienen modificando progresivamente diferentes dinámicas del entorno. Se proponen acciones basadas en tecnologías adaptativas con la intención de disminuir los impactos derivados del cambio climático, manifestados en zonas erosionadas o con gran acumulación de sedimentos. Las soluciones propuestas, basadas en infraestructura mixta, se orientan al control sedimentario que facilite el desarrollo de zonas para el ecoturismo que permitan la recuperación del borde costero y, a la par la habilitación de escenarios que enriquezcan las vivencias de los visitantes al lugar.

8.2.2 Conclusiones

Desde disciplinas como la arquitectura, el urbanismo y el paisaje pueden y deben realizarse aportes valiosos tanto en la comprensión de la problemática que atañe al riesgo costero, y a su vez, comprometerse con ofrecer diseños de espacios que permitan el desenvolvimiento de actividades antrópicas en los litorales en armonía con los ciclos de la naturaleza. Para tal efecto, es necesario ajustar los procesos de formación de arquitectos, urbanistas y paisajistas para que se aproximen a las dinámicas ecosistémicas, oceanográficas y culturales de las zonas costeras, de tal forma, que los análisis que se desprendan de este tipo de acercamientos conduzcan a diseño de infraestructuras adaptativas al cambio climático.

El diseño de componentes arquitectónicos en las zonas costeras implica, tanto el manejo de las variables espaciales, así como las de carácter temporal. Es decir, los arquitectos deben en sus ejercicios proyectuales además de analizar los componentes de los espacios por intervenir, reconocer los procesos de orden ecológico y cultural que tienen lugar en las áreas de estudio, de tal forma, que las estructuras que propongan sean lo suficientemente seguras y a la par flexibles a las fluctuaciones de las dinámicas naturales.

La experiencia académico investigativa apreciada en los resúmenes de las siete monografías previamente ilustradas hacen parte de un trayecto aún en construcción, con el cual se busca concientizar a los futuros arquitectos de la responsabilidad de intervenir las zonas costeras. Ya que el ejercicio profesional implica la incorporación de variables hasta ahora poco estudiadas en las facultades de arquitectura como lo son el comportamiento de la marea, las corrientes marinas, el oleaje, el viento, así como de las características de los ecosistemas marino costeros y las formas de habitar de los pobladores del litoral. Para allanar este camino, es necesario que las facultades de arquitectura se apoyen del conocimiento construido por otras universidades y facultades que tienen como objeto de estudio el mar y las zonas costeras.

Gracias a la colaboración interuniversitaria entre la Facultad de Arquitectura UPB y los programas vinculados a la sede de Ciencias del Mar de la UdeA ha surgido un espacio de debate académico que empieza a nutrir las soluciones demandadas en el litoral antioqueño, especialmente para atender el riesgo que provoca la erosión costera. Por supuesto, es importante que los diseños conceptuales paisajísticos presentados en este documento sean sujeto de revisiones y ajustes por expertos en campos como la ecología de zonas costeras, la oceanografía, la ingeniería oceanográfica, la sociología, entre muchas otras, con el fin de refinar las propuestas de intervención para que puedan orientar posteriores implementaciones. De lograrse esta siguiente etapa, el monitoreo de las acciones que se lleguen a ejecutar ofrecerá muy seguramente más información que permita la estandarización de algunos componentes arquitectónicos que puedan amalgamarse con elementos de la infraestructura verde-azul.

8.2.3 Referencias

Bouw, M., & Eekelen, E. (2020). Building with nature: Creating, implementing and upscaling Nature-based solutions. nai010.

García, M (2017). Hacia la metamorfosis sintética de la costa. Diseñando paisajes resilientes. Tesis doctoral. Presentado a: Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: https://oa.upm.es/48296/

Gobernación de Antioquia, UdeA, UNAL, UNINORTE (2021). Erosión costera en el litoral antioqueño. Medellín: Litografía Grafiservicios S.A.S

McHarg, I (2000). Diseñar con la naturaleza. Barcelona: Gustavo Gili

Orff, K (2016). Toward an urban ecology. New York: The Monacelli Press

Pascual, U., Balvanera, P., Anderson, C. B., Chaplin-Kramer, R., Christie, M., González-Jiménez, D. & Zent, E. (2023): Diverse values of nature for sustainability. Nature 1-11. Disponible en: https://www.nature.com/articles/s41586-023-06406-9

Reguero, B., Beck, M., Losada, I., & Narayan, S. (2017). Uniendo ingeniería y ecología: la protección costera basada en ecosistemas. En Revista Iberoamericana del Agua. Volumen 4, NO. 1, 41–58 Disponible en: https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332824

Silva, R., Chávez, V., Bouma, T., Tussenbroek, B.,

Arkema, K., Martínez, M., Oumeraci, H., Heymans, J., Osorio, A., Mendoza, E., Mancuso, M., Asmus, M., & Pereira, P. (2019). The Incorporation of Biophysical and Social Components in Coastal Management. En: Estuaries and Coasts 42, pages1695–1708 (2019). Disponible en: https://doi.org/10.1007/s12237-019-00559-5

Silva, R., Martínez,M., Tussenbroek,B., Guzmán, L., Mendoza, E., López, J. (2020). A Framework to Manage Coastal Squeeze. En: Sustainability. Nro:12. 1-21. Disponible en: https://doi:10.3390/su122410610

Waldheim, C. (2016). Landscape Urbanism. New Jersey: Princeton University Press.



PIMECLA

Compilación de resultados

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

DAGRAN

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA
República de Colombia

ISBN 978-628-7706-53-8