



Propuesta de ubicación de una estructura permeable para la mitigación de la erosión costera. Caso específico, Laboratorio costero, Arboletes.

Kisay Yusira Vargas Coa

Informe de práctica para optar al título de Ingeniera Oceanográfica

Asesor

Vladimir Giovanni Toro Valencia
PhD en Oceanografía Física

Tutora

Ángela Patricia Duque Ramírez
Arquitecta, Especialista en Diseño Urbano

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Oceanográfica
Turbo, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Vargas Coa, 2022)
Referencia	Vargas Coa, K. (2022). <i>Propuesta de ubicación de una estructura permeable para la mitigación de la erosión costera. Caso específico, laboratorio costero, Arboletes Antioquia</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez.

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

Dedicatoria

A mi querida yo del pasado, que atravesó momentos difíciles y agotadores, mientras corría sin descanso hacia este gran sueño.

A mi familia por todo el apoyo incondicional que me brindaron durante toda mi carrera. En especial a mis padres, Manuel A. Vargas y Pastora Coa (mi motor e inspiración), y mis tías Eleida E. Coa y Raquel Coa quienes me apoyaron y confiaron en que lograría obtener el primer título profesional en la familia.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por haberme dado fortalezas para lograr esta meta. A mi familia por creer en mí y apoyarme de manera incondicional en todo momento.

A todos los docentes que han hecho parte de mi proceso de aprendizaje como persona y como profesional, de manera especial, al PhD Vladimir G. Toro asesor de este trabajo de grado, quien me ha guiado con su paciencia y rectitud como docente.

A la Gobernación de Antioquia y el DAGRAN por brindarme la oportunidad de realizar las prácticas de excelencia con ellos. A mi tutora en la Gobernación Ángela Duque por su acompañamiento y apoyo durante mis practicas académicas.

Al proyecto PIMECLA por facilitarme la información y equipos requeridos para la realización de este trabajo.

A todos mis compañeros y futuros colegas que me brindaron su conocimiento y apoyo para llevar este trabajo de grado a buen término, Isabel C. López, Giner A. Jiménez, José M. Zapata, Juan G. Torres, María C. Aguirre y Luis A. García Oquendo.

A todas las personas, quienes con sus consejos y compañía me brindaron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

¡A todos, muchas gracias!

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico	15
2.1 Estructura permeable.....	15
2.2 XBeach	17
2.3 Delft3D.....	17
3. Metodología	18
3.1 Área de estudio.....	18
3.2 Métodos.....	19
3.2.1 Revisión documental de las condiciones oceanográficas y morfológicas de la zona del Laboratorio costero	19
3.2.2 Diseño y construcción de una estructura permeable en el Laboratorio Costero	19
4. Resultados	23
4.1 Modelación numérica.....	27
Caso 1. Sin estructuras permeables.....	27
Caso 2. Con estructuras permeables cada 50 m y a una profundidad aproximada de 2.5 m. .	30
Caso 3. Con estructuras permeables cada 50 m y a una profundidad aproximada de 1.4 m. .	32
5. Conclusiones	36
6. Recomendaciones.....	37
Referencias	38

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros integrales del oleaje21

Tabla 2. Valores de algunos parámetros usados en el modelo XBeach22

Lista de figuras

Figura 1. Configuración de la estructura permeable. Fuente Winterwerp et al. (2020).....	16
Figura 2. Esquema de vista (a) frontal y (b) lateral de la estructura permeable.	16
Figura 3. Área de estudio, Laboratorio costero de la Universidad de Antioquia.	18
Figura 4. Configuración de la estructura permeable piloto instalada en el Laboratorio costero de la UdeA	20
Figura 5. Postes de pino inmunizado usado como sustitución de las guaduas verticales. Se observan guaduas horizontales de menor calibre usadas para amarrar la estructura.	20
Figura 6. Postes arrojados fuera del agua por la energía del oleaje	23
Figura 7. Montaje de prueba en la zona swash	24
Figura 8. Monitoreo de la estructura y evolución del depósito de sedimentos del 6 al 9 mayo del 2022	24
Figura 9. Evidencia del desgarre del polisombra en la estructura.....	25
Figura 10. Refuerzo realizado a la polisombra	25
Figura 11. Amarre e instalación del relleno de la parte 1 de la estructura	26
Figura 12. Monitoreo de la estructura y la evolución del depósito de sedimentos del 10 al 5 mayo del 2022	26
Figura 13. Levantamiento batimétrico en 3D del sector Laboratorio costero sin estructuras.....	28
Figura 14. Caso 1. Vista en planta, campos de oleaje (columna izquierda), corrientes (columna central) y transporte de sedimentos (columna derecha) para la zona de estudio en el primer (a) y séptimo (b) día.....	29
Figura 15. Levantamiento batimétrico en 3D sector laboratorio costero. Estructuras cada 50m y a 2.5m profundidad	30
Figura 16. Vista en planta, campos de oleaje (fila arriba), corrientes (fila abajo) en la zona de estudio para el caso1 (columna izquierda) y caso2 (columna derecha).	31
Figura 17. Vista en planta, campos de transporte de sedimentos en la zona de estudio para el caso1(izquierda) y caso2 (derecha).	31

Figura 18. Levantamiento batimétrico en 3D sector laboratorio costero. Estructuras cada 50m y a 1.4m profundidad	32
Figura 19. Vista en planta, campos de oleaje para la zona de estudio en el caso 2 (izquierda) y caso 3 (columna derecha).....	33
Figura 20. Vista en planta, campos de corrientes para la zona de estudio en el caso 2 (izquierda) y caso 3 (columna derecha).....	33
Figura 21. Zoom a la vista en planta de la magnitud de la corriente en el laboratorio costero con las estructuras permeables caso 2 (a) y caso 3 (b).....	34
Figura 22. Vista en planta del transporte de sedimentos en el laboratorio costero con las estructuras permeables caso 2 (a) y caso 3.....	35

Siglas, acrónimos y abreviaturas

DAGRAN	Departamento Administrativo para la Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia
PIMECLA	Programa integral para el monitoreo y mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño
UdeA	Universidad de Antioquia
m	metros
NE	Noreste
s	Segundos
mm	milímetro
N/A	no corresponde en el caso
Km	Kilómetros
3D	Tercera dimensión

Resumen

El litoral entre Arboletes y Turbo en los últimos años ha presentado tasas erosivas promedias de 7 m/año y máximas de 40 m/año. Las actividades antrópicas, la presencia de diapiros de lodos, la orientación de la línea de costa y la instalación de obras de protección costera sin estudios previos son los principales factores desencadenantes del aumento de la erosión en la zona. La pérdida del litoral y algunos ecosistemas tienen consecuencias en el corto, mediano y largo alcance para la comunidad y la economía regional.

En busca de mitigar estos procesos erosivos, se realizó una práctica académica bajo la supervisión del DAGRAN, que consistió en explorar sitios costeros adecuados para la implementación de obras adaptativas que permitan mitigar el retroceso de la línea de costa. Este experimento se implementó en el Laboratorio Costero de la Universidad de Antioquia. Para esto se diseñó y construyó una estructura permeable de bajo presupuesto, se hizo monitoreo de la misma y a la par se implementó un modelo numérico costero. El modelo permitió entender la dinámica costera antes, durante y después de la implementación de este tipo de estructuras. Los resultados sugieren que las estructuras permeables laterales, tienen una instalación y mantenimiento sencillo y son capaz de retener sedimentos sin intervenir de manera importante el transporte de sedimentos de la playa. Además, que entre más cercana a la línea de costa sea su ubicación, menos modificará la rotura de la ola y por tanto no será eficiente para disipar la energía del oleaje.

Palabras claves: Erosión costera, línea de costa, solución adaptativa, estructura permeable, modelación numérica, Arboletes.

Abstract

The coastline between Arboletes and Turbo in recent years has shown average erosion of 7m/year and maximum rates of 40m/year. Anthropogenic activities, the presence of mud diapirs, the orientation of the coastline and the installation of coastal protection works without prior studies are the main factors that trigger increased erosion in the area. The loss of the coastline and some ecosystems has consequences in the short, medium and long term for the community and the regional economy.

Under the supervision of DAGRAN, an academic practice was carried out in search of mitigating these erosive processes, which consisted of exploring suitable coastal sites for the implementation of adaptive works that allow mitigating the retreat of the coastline. This experiment was implemented in the Coastal Laboratory of the University of Antioquia. A low-budget permeable structure was designed and built; it was monitored; and at the same time, a coastal numerical model was implemented. The model allowed us to understand the coastal dynamics before, during, and after the implementation of this type of structure. The results suggest that lateral permeable structures are easy to install and maintain, and are capable of retaining sediment without significantly interfering in beach sediment transport. In addition, the closer it is to the coastline, the less it will modify the breaking of the wave, and therefore, it will not be efficient to dissipate the energy of the waves.

Keywords: Coastal erosion, coastline, adaptive solution, permeable structure, numerical modeling, Arboletes.

Introducción

La gran mayoría de las costas del Caribe colombiano presentan problemas de erosión, los cuales han afectado la infraestructura existente y, por ende, la economía regional y nacional. El litoral de la región de Urabá no está exento de la erosión, siendo una de las problemáticas ambientales que más ha afectado la región (Bernal *et al.*, 2005). En la franja costera comprendida entre el Distrito de Turbo y el municipio de Arboletes se han realizado estudios de la línea de costa, balances sedimentológicos e identificación de zonas de erosión buscando contribuir al conocimiento de esta amenaza (Caicedo & Hernández, 2016).

En un estudio sobre el problema de erosión, Correa & Vernet (2004) estimaron que la tasa de erosión promedio del litoral Antioqueño era de 7 m/año y la máxima de 40 m/año (Puerto Rey, sector de Arboletes). Estudios afirman que, la orientación general de la línea de costa en la parte sur del municipio de Arboletes, causa que el oleaje proveniente del norte incida de manera casi perpendicular alcanzando a transportar grandes cantidades de sedimento. Adicionalmente, entre Puerto Escondido (Córdoba) y Arboletes (Antioquia), por su configuración morfológica se presenta una zona donde se concentra la energía del oleaje, su rompimiento es oblicuo y se intensifican las corrientes longitudinales, causas que potencializan los procesos erosivos (Restrepo *et al.*, 2005).

Por otra parte, la presencia de diapiros y volcanes de lodo sumergidos, es otro de los factores que podrían incrementar las tasas de erosión en la región (Rangel & Posada, 2005). Los fluidos (agua-gas) transportados por este fenómeno, producen inestabilidad en las capas de terreno costero, ya que, al moverse a través de ellas, causan una disminución en su resistencia, lo cual favorece la erosión. Su presencia puede llegar a incidir de manera notable en variaciones batimétricas y esto sumado al campo de corrientes, se convierte en otra de las causas de la erosión de las zonas costeras.

Debido a la acción de procesos erosivos intensos y teniendo en cuenta que la línea de costa de Arboletes se encuentra en gran parte modulada por acciones antrópicas (p.e. construcción de obras convencionales sin rigurosidad técnica), es necesario avanzar en el conocimiento de los procesos físicos asociados a la dinámica oceanográfica y condiciones oceanográficas de la zona y sus posibles implicaciones en los procesos erosivos, con el fin de proponer soluciones encaminadas a la gestión del riesgo.

En numerosos esfuerzos para revertir/mitigar la erosión costera en el municipio de Arboletes, se han construido estructuras costeras tradicionales, como espolones, rompeolas, diques

exentos, entre otros. En general, estas estructuras tienen una incidencia directa en el balance de sedimentos, lo cual es una de las principales causas del fenómeno erosivo y del escaso éxito de los esfuerzos de recuperación de costas erosionadas (Winterwerp *et al.*, 2005; Anthony & Gratiot, 2012; Besset *et al.*, 2019).

Con el fin de mitigar la perturbación al transporte de sedimentos producida por las estructuras convencionales, Winterwerp *et al.* (2005, 2013) proponen el uso de estructuras permeables no reflectantes. Las primeras estructuras fueron instaladas de manera exitosa a lo largo de las costas de Demak (Indonesia). En este lugar se obtuvieron tasas de sedimentación promedio de 0.5 m en los meses con mayor energía del oleaje. Simultáneamente, se observó una colonización espontánea de manglares. Otros registros de casos exitosos en los que se implementaron dichas estructuras se reportaron en provincias de Tailandia, Guayana y Vietnam.

La filosofía detrás de las estructuras permeables es mantener el balance neto de sedimentos, y disminuir la energía de las olas, reduciendo la erosión inducida por estas. Al mismo tiempo que mejora las tasas netas de sedimentación cerca de la línea de costa al atrapar los sedimentos que viajan en los flujos marino-costeros (Winterwerp *et al.*, 2020).

Estas estructuras consisten en postes verticales (generalmente de guadua) que soportan elementos horizontales. Su diseño y ubicación depende de las condiciones morfológicas y sedimentológicas particulares de cada sitio. Su construcción es relativamente rentable y en su instalación se usa tecnología común, lo que implica que pueden ser construidos y mantenidos por las comunidades costeras locales, con una capacitación básica. Además, dado que su construcción es con materiales degradables será una estructura con un periodo de vida útil lo suficiente para contribuir a la reconstrucción natural de los ambientes marinos degradados (población de manglares, captura de sedimentos, etc.) pero sin afectar a largo plazo la dinámica de la zona de intervención.

Teniendo en cuenta el éxito de las estructuras permeables en varias costas, en este trabajo se propone identificar el lugar cerca de la línea de costa más adecuado para su implementación, que permita mitigar el retroceso de la línea de costa en una zona de acantilados blandos en el municipio de Arboletes. Con este fin, se consideraron, parámetros oceanográficos y batimétricos, así como también las obras de protección preexistentes. Además, se implementó un modelo costero, el cual permitió tener una visión integral de la dinámica con y sin estructuras.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer un sitio donde se podrán ubicar estructuras permeables para contribuir en la mitigación de la erosión costera en el sector del Laboratorio de la Universidad de Antioquia.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir una barrera permeable en el Laboratorio Costero.
- Implementar un modelo numérico para el estudio de escenarios con y sin estructura.
- Apoyar las actividades administrativas del DAGRAN en la zona del Urabá antioqueño.

2. Marco teórico

Para la implementación de cualquier tipo de obra de protección costera se requiere conocer las condiciones oceanográficas del entorno de la obra (oleaje, corrientes, sedimentos, entre otros) y entender el funcionamiento de la estructura. Este último aspecto es importante ya que sus dimensiones (longitud, altura) y distribución espacial no son generales y varían en cada lugar. Adicional a eso, también es de vital importancia conocer el comportamiento hidrodinámico de la obra en el área de estudio, por lo que la modelación numérica es una de las herramientas más importantes en el ajuste de la obra. Teniendo en cuenta lo mencionado, a continuación, se presentan algunos aspectos teóricos a considerar.

2.1 Estructura permeable

Es una solución de tipo verde (*green solution*) que permite reducir la perturbación al transporte de sedimentos producida por las estructuras convencionales. Estas estructuras usan un enfoque basado en la naturaleza, el cual consiste en construir con materiales degradables con un periodo de vida útil suficiente que permita reconstruir los ambientes marinos degradados, pero sin afectar a largo plazo la hidrodinámica de la zona. Las estructuras permeables se componen de elementos verticales unidos horizontalmente (generalmente de guadua), que reducen la energía del oleaje. En el caso particular de este trabajo, se ajustó la metodología propuesta por Winterwerp *et al.* (2020) para el establecimiento de una estructura permeable.

La estructura modelo consiste en dos hileras de guadas verticales con diámetro medio de aproximadamente 0.1 m, dispuestas a unos 0.6 m de distancia una de la otra. La distancia entre las dos hileras es de unos 0.4 o 0.5 m. Dos filas de vigas horizontales se unen a los postes verticales para generar firmeza, y por dentro de esta configuración se introduce madera de desecho. Toda esta configuración es atada con cuerdas (Ver **Figura 1** y **Figura 2**).

Figura 1. Configuración de la estructura permeable. Fuente Winterwerp et al. (2020).

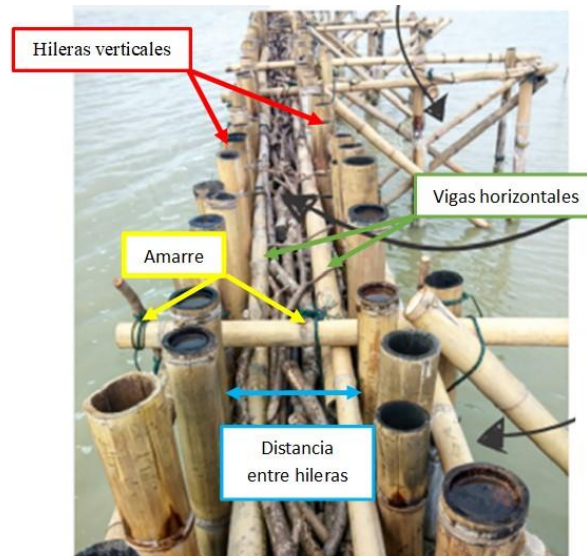
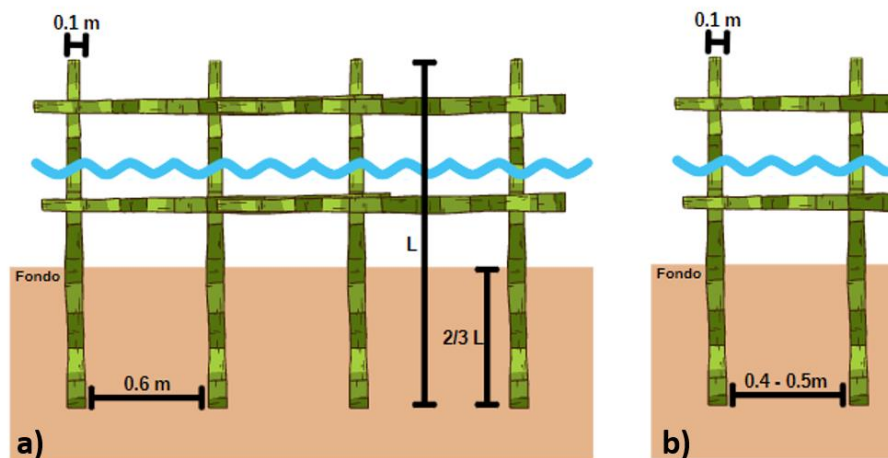


Figura 2. Esquema de vista (a) frontal y (b) lateral de la estructura permeable.



Para lograr una buena estabilidad en la estructura, los postes deben enterrarse preferiblemente hasta $2/3$ de su longitud total (L), dicha longitud dependerá de la altura de ola significativa de cada lugar y de la profundidad donde se instalará la obra (zona de aguas someras o profundas).

2.2 XBeach

Es un modelo numérico de código abierto desarrollado por Deltares junto con UNESCO-IHE y TU Delft¹. Utilizado para simular procesos e impactos hidrodinámicos y morfodinámicos en la costa y bajo la ocurrencia de eventos extremos, evaluando procesos como el de la erosión y la sedimentación considerando los efectos de la vegetación y las estructuras de protección costera.

El modelo incluye los procesos hidrodinámicos de transformación de onda corta, transformación de onda larga, configuración inducida por onda y corrientes inestables, así como inundación. Además de procesos morfodinámicos que incluyen carga de fondo y transporte de sedimentos suspendidos, actualización del fondo y ruptura del oleaje.

Esta herramienta resuelve las ecuaciones de balance de acción de la ola, de masa y momentum en aguas poco profundas. Incluye fórmulas de transporte de sedimento, así como las de actualización del fondo (Roelvink *et al.*, 2010). Permite estimar la propagación del oleaje, la magnitud de las corrientes y los cambios morfológicos en sectores de la línea de costa.

2.3 Delft3D

Es un modelo numérico desarrollado por Deltares - Delft Hydraulics en los Países Bajos, y perfeccionado a través de una serie de versiones a lo largo de los últimos 20 años². Consiste en un sistema de modelación acoplado compuesto por varios módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, transporte de sedimentos, calidad de agua y transporte de sustancias en general.

El módulo principal, Delft-3D FLOW, permite definir las condiciones del flujo no estacionario en la zona de estudio, así como las corrientes litorales, variaciones de la onda de marea, salinidad, viento y la descarga de ríos y procesos como el transporte de sedimento y contaminantes. Por otro lado, el módulo RGFGRID permite crear, modificar y visualizar grillas para el módulo Delft3D-FLOW y otros modelos numéricos como XBeach.

¹<https://www.deltares.nl/en/software/xbeach/>

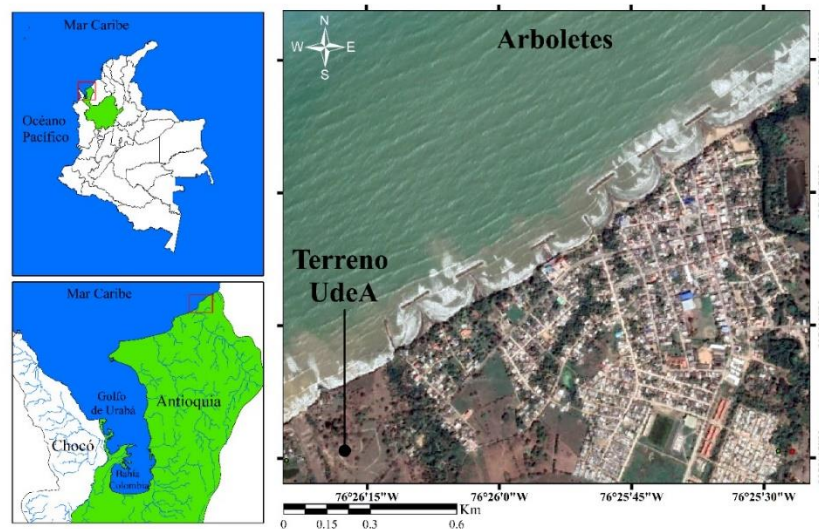
² <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

3. Metodología

3.1 Área de estudio

Este trabajo se desarrolló en el municipio de Arboletes, específicamente en el Laboratorio costero de la Universidad de Antioquia. Este Laboratorio está ubicado en la costa caribe a una altura promedio respecto al nivel del mar de 9 m (**Figura 3**; Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Figura 3. Área de estudio, Laboratorio costero de la Universidad de Antioquia.



El clima en este municipio está influenciado por los desplazamientos en la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Esto permite dos periodos climáticos: periodo seco desde finales de diciembre hasta principios de abril, influenciado por los vientos alisios del NE con velocidades entre 4 y 9 m/s y precipitaciones promedio de 40 mm/mes (Thomas *et al.*, 2007). Y un periodo de lluvias de mayo a noviembre, con vientos predominantes del sur con velocidades entre 2 y 4 m/s y precipitaciones promedio de 100 mm/mes (Thomas *et al.*, 2007).

Arboletes al estar más alejados del golfo de Urabá y de las descargas fluviales del río Atrato, muestra una menor concentración de sedimentos en suspensión caracterizado principalmente por limos medios, gruesos y arenas finas (Gobernación de Antioquia [Gob.ANT], Universidad de Antioquia [UdeA], Universidad Nacional [UNAL], Universidad del Norte [UNINORTE], 2021). Además de presentar mayor probabilidad de ocurrencia para alturas de olas significantes entre 0.7

m y 2.5 m para periodos de 4 y 8 s respectivamente; y corrientes en magnitudes promedio de 0.2 m/s con dirección predominante nor-este.

En términos del transporte de sedimentos, el municipio presenta una distribución de sedimentos heterogénea a lo largo de la línea, produciendo lugares intercalados de acreción/erosión, pero siendo más intensos los de erosión, el cual está asociado a las obras existentes (espolones) (Gob.ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021). Parte de ese material erosionado en los acantilados es transportado de manera perpendicular a la línea de costa, formando una barra sumergida a lo largo del lugar y en la desembocadura de río Hobo (Gob.ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021).

3.2 Métodos

Para llevar a cabo los objetivos propuestos en este trabajo se desarrollaron 3 actividades:

3.2.1 *Revisión documental de las condiciones oceanográficas y morfológicas de la zona del Laboratorio costero*

Con el fin de tener un mayor conocimiento sobre las condiciones actuales de la zona de estudio se realizó una recopilación, revisión y análisis de los estudios de oleaje, sedimentología y topo-batimetría realizados en el año 2021 por la universidad de Antioquia en colaboración con el DAGRAN en el marco del proyecto PIMECLA.

3.2.2 *Diseño y construcción de una estructura permeable en el Laboratorio Costero*

Con la finalidad de diseñar y ubicar espacialmente una estructura permeable, se realizó una campaña del 02 al 10 de mayo del 2022. Se construyó una estructura permeable piloto y se realizó un monitoreo a la misma con el objetivo de analizar las condiciones antes, durante y después de la instalación.

Esta estructura estaba constituida por 2 partes. La primera parte se construyó siguiendo la metodología propuesta por Winterwerp *et al.* (2020) en donde se instalan dos hileras de palos verticales y con un relleno de material vegetal entre ellas. Mientras que la parte 2 consistió en una barrera lineal de postes con una cubierta de polisombra (**Figura 4**).

La primera parte tuvo las siguientes dimensiones: 1 m de alto, 1.15 m de largo y 0.5 m de ancho, con un recubrimiento en polisombra hasta una altura de 0.8 m. La segunda parte, estuvo

constituida por una hilera con postes ubicados cada 0.7 m, con recubrimiento polisombra y las guaduas horizontales de refuerzo, similares a las de la primera parte. Es importante resaltar que debido a la imposibilidad de conseguir guaduas en la zona con las especificaciones propuestas por Winterwerp *et al.* (2020), se tomó la decisión de utilizar postes de pino inmunizado de 1.5 m de longitud y 0.09 m de diámetro, usados como varas verticales en el diseño (**Figura 5**).

Figura 4. Configuración de la estructura permeable piloto instalada en el Laboratorio costero de la UdeA



Figura 5. Postes de pino inmunizado usado como sustitución de las guaduas verticales. Se observan guaduas horizontales de menor calibre usadas para amarrar la estructura.



3.2.3 Implementación de un modelo numérico costero.

Con el fin de analizar la hidrodinámica antes y después de la implementación de las estructuras permeables, se implementó el modelo XBeach. En este modelo fueron definidas las posibles ubicaciones espaciales de las estructuras.

Para la ejecución de los casos en XBeach, se diseñó una malla estructurada rectangular (archivo .grd) mediante la interfaz gráfica RGFGRID de Delft3D. Con este fin se usó la batimetría y parte de la línea de costa medidas por la componente de topo-batimetría del proyecto PIMECLA.

Una vez elaborada la malla se procedió a realizar la interpolación de la batimetría mediante la interfaz QUICKIN de Delft3. Con estos datos y mediante la función Triangular Interpolation y smoothing se obtuvo la interpolación de la batimetría (archivo .dep). Adicional a esto, el modelo es forzado con datos de los parámetros integrales del oleaje (archivo params). Los parámetros integrales del oleaje medidos en el marco del proyecto PIMECLA, fueron utilizados para obtener un espectro en función de la frecuencia tipo JONSWAP (**Tabla 1**).

Tabla 1. Parámetros integrales del oleaje.

Parámetro	Valor usado	Valor por defecto	Rango	Descripción
Hm0	0.55	0	0 -5	Altura de ola significativa (m)
fp	0.147	0.08	0.06258 – 0.4	Frecuencia pico del espectro de onda (s ⁻¹)
mainang	270	270	180 - 360	Ángulo de la ola principal (convención náutica)
gammajsp	3.3	3.3	1 -5	Factor de mejora de picos en el JONSWAP
s	20	10	1-1000	Coefficiente de propagación direccional
fnyq	1.0	0.3	0.2 – 1	Frecuencia más alta utilizada para crear el espectro JONSWAP

El archivo params es editable y allí se modifican los valores asociados a las palabras claves para que el modelo XBeach se pueda ejecutar. En la **Tabla 2** se muestran algunos de los parámetros usados durante la implementación del modelo.

Tabla 2. *Valores de algunos parámetros usados en el modelo XBeach*

Parámetro	Valor usado	Valor por defecto	Intervalo	Descripción
flow	1	1	0 – 1	Activar cálculo de flujo (cero está desactivado, 1 está activado)
D50	0.0002	N/A	N/A	Diámetro tal que el 50% de la masa de la muestra está compuesta de partículas con un diámetro menor que este valor (metros)
D90	0.0003	N/A	N/A	Diámetro tal que el 90% de la masa de la muestra está compuesta de partículas con un diámetro menor que este valor (metros)
bedfriction	chezy	chezy	chezy, cf, white-colebrook, manning, white-colebrook-grainsize	Formulación de fricción del lecho

Una vez obtenidos y modificados todos los archivos mencionados (archivo.grd, archivo .dep, archivo txt, jonswap) se procedió a la ejecución del XBeach. Estos experimentos numéricos fueron realizados en el servidor Poseidón de la Universidad de Antioquia. Los resultados de las salidas del modelo fueron obteniendo en archivos tipo netcdf.

4. Resultados

Con el apoyo del coordinador del proyecto PIMECLA, se recopiló toda la información necesaria para la ejecución del modelo numérico. Entre la información recabada se encuentra: topografía, parámetros del oleaje y parámetros sedimentológicos en la zona del laboratorio costero.

El día 3 de mayo del 2022 se dio inicio al diseño y construcción de la estructura permeable piloto en el laboratorio costero de la UdeA. En este día se instalaron 2 postes de pino inmunizado en la zona de la rompiente a 0.5 m de profundidad con el fin de conocer su respuesta a la dinámica del lugar y su capacidad de soportar el oleaje y las corrientes. De manera inmediata alrededor de los postes se empezó a observar socavación en la parte inferior de los mismos. Los postes se dejaron hasta el 4 de mayo, día en el cual se encontró que los postes habían sido arrojados fuera del agua (**Figura 6**; Error! No se encuentra el origen de la referencia.). La alta energía del oleaje, fue el motivo por el cual se decidió hacer el mismo experimento, pero un poco más cerca de la línea de costa en la zona *swash* (**Figura 7**).

Figura 6. Postes arrojados fuera del agua por la energía del oleaje



Figura 7. *Montaje de prueba en la zona swash*



El 5 mayo del 2022 al revisar montaje, se encontró que los postes hincados el día anterior en la zona *swash* estaban estables, por lo cual, se concluyó que los postes podían soportar la socavación en su parte inferior. Por lo tanto, se procedió a construir las dos partes de la estructura permeable (**Figura 4**). Este mismo día se logró instalar el 90% de la estructura, dado que no se realizó el relleno de la parte 1, debido a problemas de orden público en la región. Al finalizar la instalación se logró una protección de 6 m de playa. El monitoreo de la estructura (partes 1 y 2) se realizó mediante fotografías desde una base del proyecto Coast Snap ubicada en el Laboratorio Costero.

Figura 8. *Monitoreo de la estructura y evolución del depósito de sedimentos del 6 al 9 mayo del 2022*



En la **Figura 8**, se muestra el cambio en el depósito en los primeros 4 días del monitoreo, donde del 6 al 7 de mayo se observa una sedimentación notoria. El día 8 de mayo se empezó a perder la sedimentación, razón por la cual se decidió revisar la estructura. El día 9 de mayo se revisó la estructura y se encontró que la pérdida de sedimento se estaba presentando debido a que el polisombra que recubría la estructura se había desgarrado (**Figura 9**).

Figura 9. Evidencia del desgarro del polisombra en la estructura



Debido a esta situación, se tomó la decisión de reforzar la polisombra en la parte externa de las estructuras (**Figura 10**). Adicionalmente, se terminó la construcción de la estructura por medio de la incorporación del relleno de la parte 1. Este relleno se llevó a cabo haciendo un amarre de las guaduas que sobraron con madera proveniente del mar, para finalmente ser envuelto con polisombra (**Figura 11**).

Figura 10. Refuerzo realizado a la polisombra



Figura 11. *Amarre e instalación del relleno de la parte 1 de la estructura*



Una vez terminado el montaje de la estructura se retomó el monitoreo periódico. Durante este nuevo monitoreo se logró apreciar un depósito importante de sedimentos hasta el día 14 de mayo. El 15 de mayo se empieza a perder nuevamente el depósito (**Figura 12**). Estos resultados sugieren que la barrera tuvo algún daño en su estructura nuevamente, razón por la cual se revisó y en efecto, la polisombra se había vuelto a desgarrar. Debido a esta situación que se presentó por segunda vez, el 15 de mayo se tomó la decisión de realizar un mantenimiento para corregir y perfeccionar algunos aspectos de la estructura permeable implementada.

Figura 12. *Monitoreo de la estructura y la evolución del depósito de sedimentos del 10 al 5 mayo del 2022*



Dicha intervención en la estructura se programó para el día 23 de mayo, Sin embargo, el día 21 de mayo la parte 1 de la estructura fue encontrada destruida en su totalidad. Las causas de esta eventualidad probablemente se deben a una carga importante de madera proveniente de los ríos ya que durante los días 19 y 20 de mayo, se presentaron fuertes lluvias poco comunes en la región. Debido a este último incidente que se decidió desmontar la parte 2 de la estructura para así evitar la pérdida de los materiales que la componen.

4.1 Modelación numérica

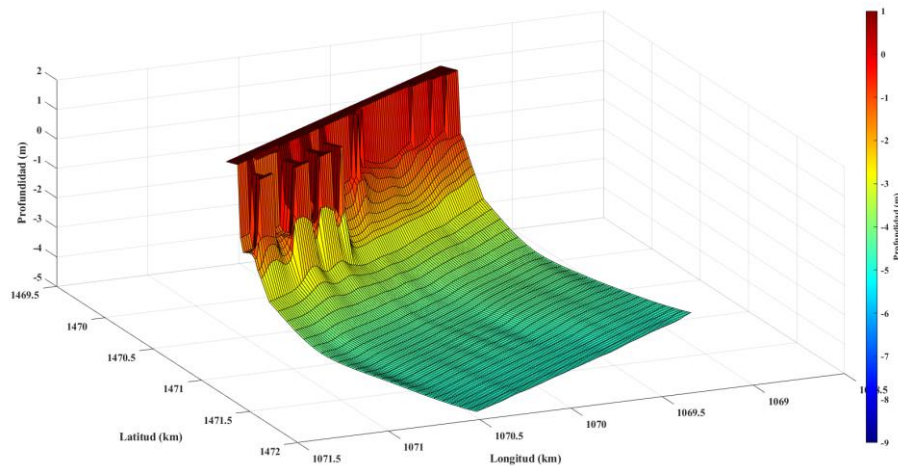
El modelo numérico fue implementado tratando de mantener las mismas condiciones de oleaje y batimetría de la zona durante la época del experimento. Con este fin se analizaron 3 casos con un tiempo de simulación de 1 semana:

1. Sin estructuras permeables.
2. Con estructuras permeables cada 50 m y a profundidad aproximada de 2.5 m.
3. Con estructuras permeables cada 50 m y a profundidad aproximada de 1.4 m.

Caso 1. Sin estructuras permeables

Este caso se implementó con el fin de conocer las condiciones iniciales del área de intervención y que pueda servir como línea base para la comparación con los casos donde fueron ubicadas las estructuras. Para este caso se hizo necesario extender el área de estudio para que no solo abarcara el laboratorio costero de la UdeA, sino también, parte de la línea de costa de sus alrededores, esto con el fin evitar errores frontera y tener una representación lo más realista posible de la dinámica en la zona (**Figura 13**).

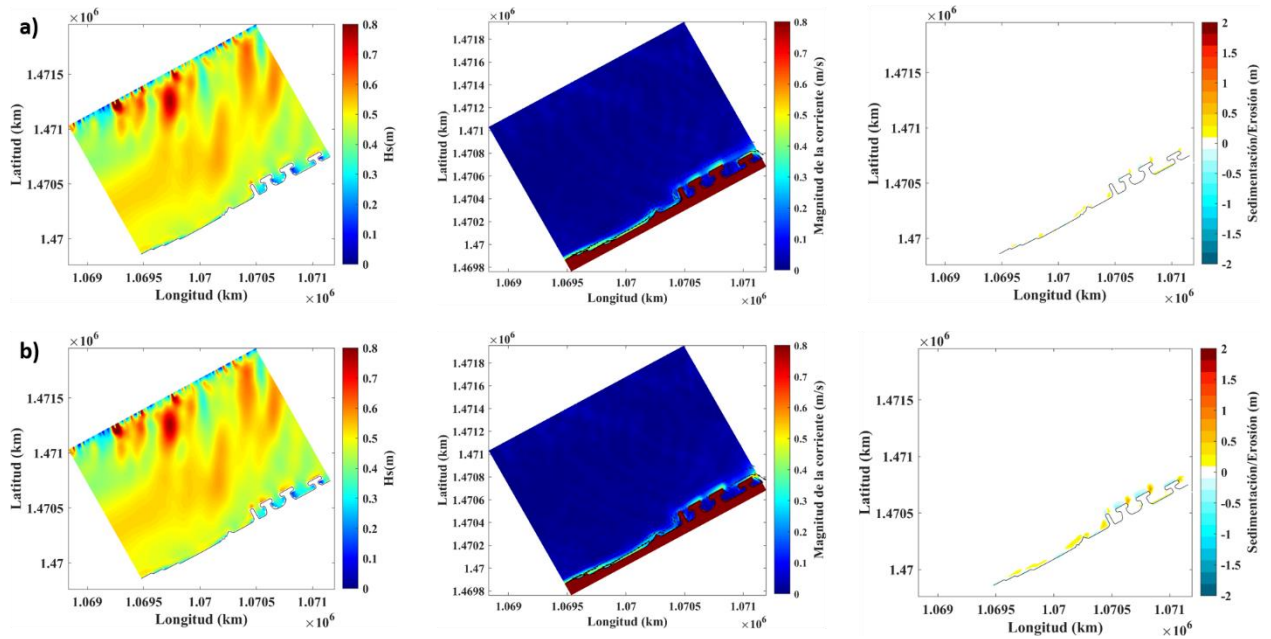
Figura 13. Levantamiento batimétrico en 3D del sector Laboratorio costero sin estructuras.



La figura 13 muestra una interpolación en 3D del área de estudio extendida algunos metros después de río Hobo y hasta el tercer espolón al este del Laboratorio costero. En esta batimetría se logra apreciar que el relieve del fondo marino en esta área es relativamente homogéneo con profundidades máximas de aproximadamente 5 m. Es importante aclarar que, el cambio abrupto de pendiente presentado cerca de la línea de costa se debe a una diferencia de escala entre la profundidad (m), la longitud (Km) y la latitud (Km), la cual se hace necesaria para poder apreciar los pequeños relieves del fondo marino.

También es importante resaltar que, aunque la topo-batimetría corresponde al periodo de lluvias (mediados de agosto 2021), no se está considerando los aportes de río Hobo en ninguno de los resultados de los campos de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos (**Figura 14**). Esta aproximación se realizó teniendo en cuenta que la entrada del río estaba cerrada por una barra de arena al momento de realizar el levantamiento topo-batimétrico. Lo que sugiere que el transporte de sedimentos para este estudio esta modulado en gran parte por la corriente litoral que viene del nor-este.

Figura 14. Caso 1. Vista en planta, campos de oleaje (columna izquierda), corrientes (columna central) y transporte de sedimentos (columna derecha) para la zona de estudio en el primer (a) y séptimo (b) día.



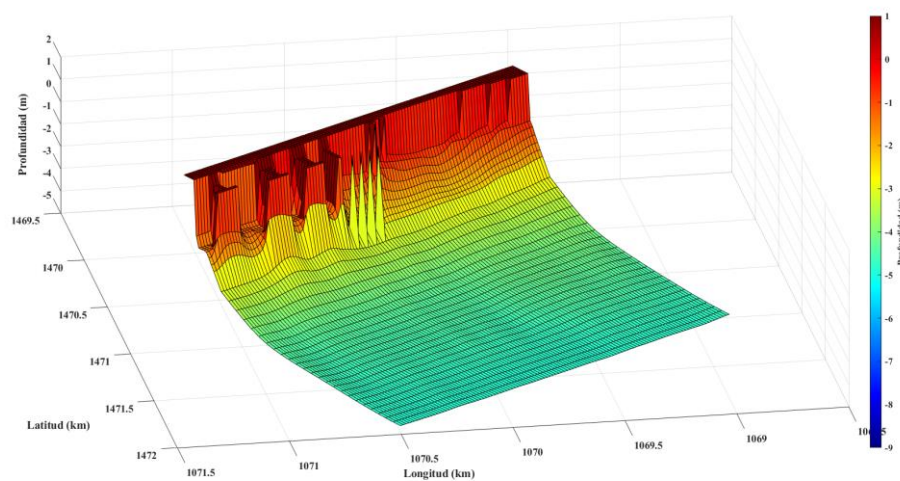
Los resultados sugieren que la magnitud de las corrientes y el oleaje no presentan cambios significativos durante el periodo de modelación, y que por lo tanto los campos de estos parámetros son relativamente homogéneos para una pequeña escala de tiempo (días). Por otra parte, el transporte de sedimento si presenta cambios a esta escala temporal. Los resultados muestran que en el Laboratorio costero existe un balance de sedimentos, ya que los sedimentos que están siendo erosionados en la zona cerca al espolón se están depositando a lo largo de la línea de costa.

Es importante aclarar que, debido a la homogeneidad en los cambios de la magnitud de corriente y el oleaje para la escala temporal implementada y que nuestro objeto de estudio es el cambio en el transporte de sedimentos antes y después de la implementación de las estructuras permeables, los análisis y comparaciones para los casos 2 y 3 solo se realizarán para el séptimo día de modelación.

Caso 2. Con estructuras permeables cada 50 m y a una profundidad aproximada de 2.5 m.

Para este caso se ubicaron 4 estructuras equidistantes entre sí a unos 50 m en el sector del Laboratorio costero (**Figura 15**), con el fin de analizar la variación del oleaje, las corrientes y el transporte de sedimentos después de la instalación de las obras.

Figura 15. Levantamiento batimétrico en 3D sector laboratorio costero. Estructuras cada 50m y a 2.5m profundidad



En la figura 15 se muestra el escenario con estructuras en el sector del laboratorio costero, ubicadas de manera paralela a la línea de costa y a la misma distancia de la parte externa del espolón cercano al Laboratorio. Es importante aclarar que debido a las limitaciones de la escala del modelo (celdas de XX m) no fue posible simular la forma original de la estructura permeable como se hizo con los espolones, ya que si se ubicaban más estructuras verticales el modelo al hacer la interpolación las reconocía como una sola estructura impermeable, razón por la cual se ven en la batimetría como si fueran una especie de pilotes.

Los resultados del caso modelado con las estructuras muestran una reducción del oleaje de aproximada de 0.2 m en la zona donde se instalaron las estructuras y una pequeña disminución en la magnitud de las corrientes (**Figura 16**). Estas variaciones están asociadas a la pérdida de energía

que sufre la ola al encontrarse con las estructuras y se hacen mucho más visibles al comparar el campo de transporte de sedimento (**Figura 17**).

Figura 16. Vista en planta, campos de oleaje (fila arriba), corrientes (fila abajo) en la zona de estudio para el caso1 (columna izquierda) y caso2 (columna derecha).

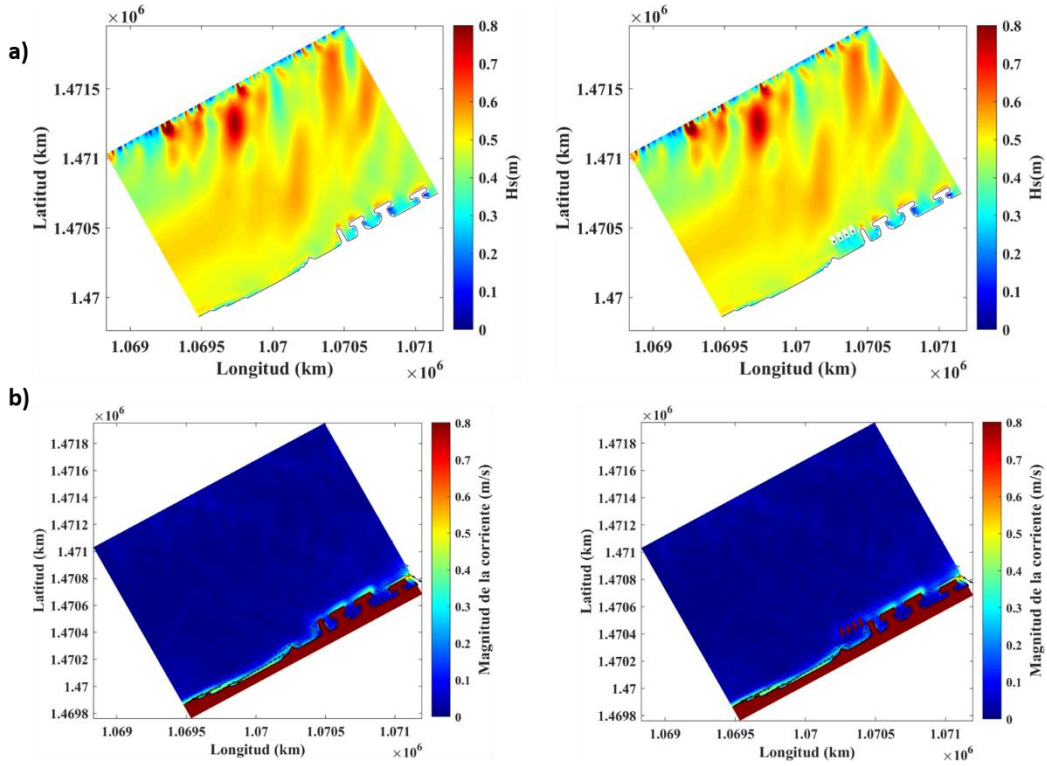
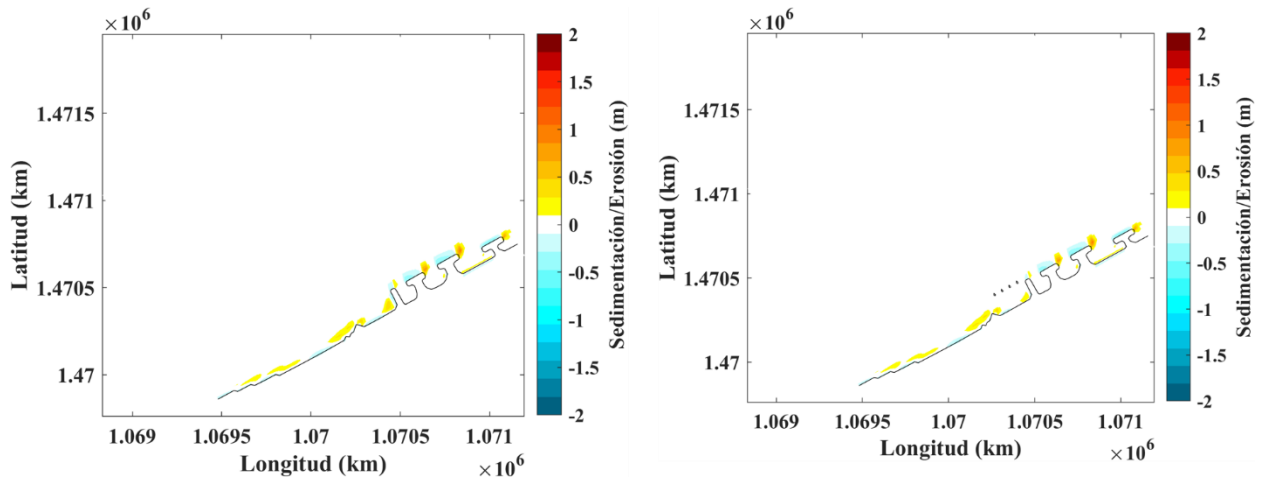


Figura 17. Vista en planta, campos de transporte de sedimentos en la zona de estudio para el caso1(izquierda) y caso2 (derecha).

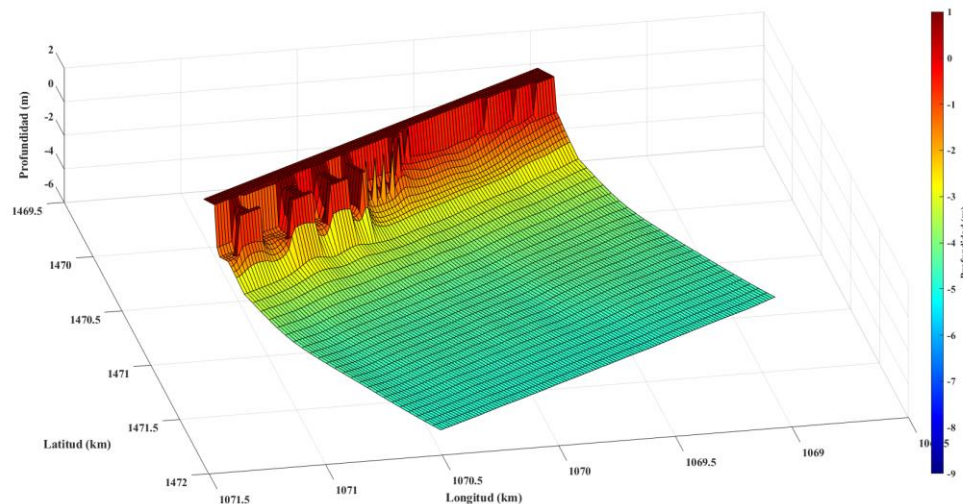


La figura 17 muestra el transporte de sedimentos para un periodo de una semana en la zona de estudio antes y después de la instalación de las estructuras del caso 2. En los resultados se puede apreciar la reducción en la tasa de erosión que había cerca del espolón y la saliente que se encuentran a lado y lado del laboratorio costero.

Caso 3. Con estructuras permeables cada 50 m y a una profundidad aproximada de 1,4 m.

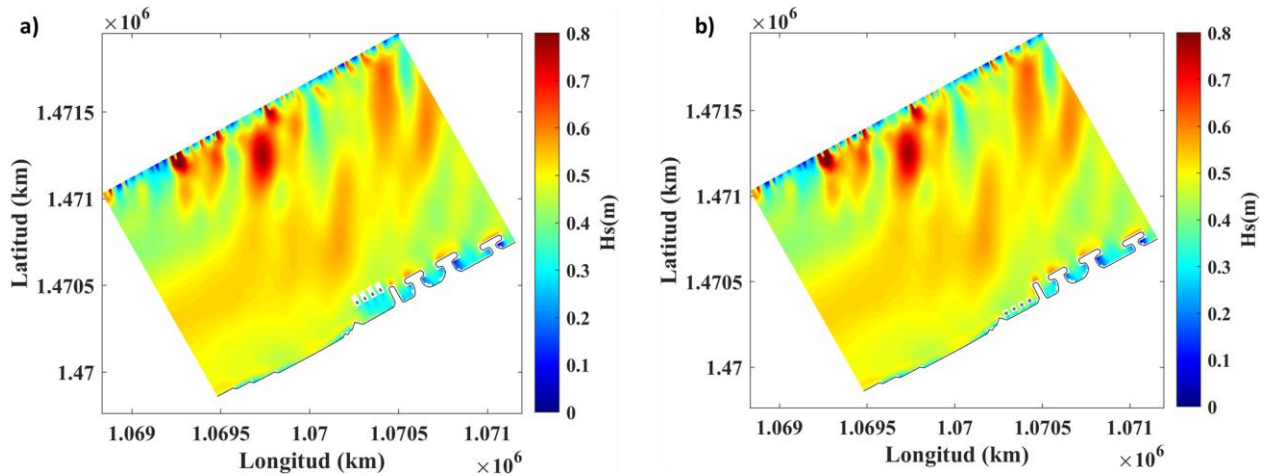
Teniendo en cuenta los resultados adecuados, en términos de erosión, del caso anterior y considerando los buenos resultados obtenidos durante la implementación de una estructura piloto en la zona *swash* del laboratorio costero (**Figura 8** y **Figura 12**), se decidió implementar el modelo con estructuras un poco más cerca de la línea de costa (**Figura 18**).

Figura 18. Levantamiento batimétrico en 3D sector laboratorio costero. Estructuras cada 50m y a 1.4m profundidad



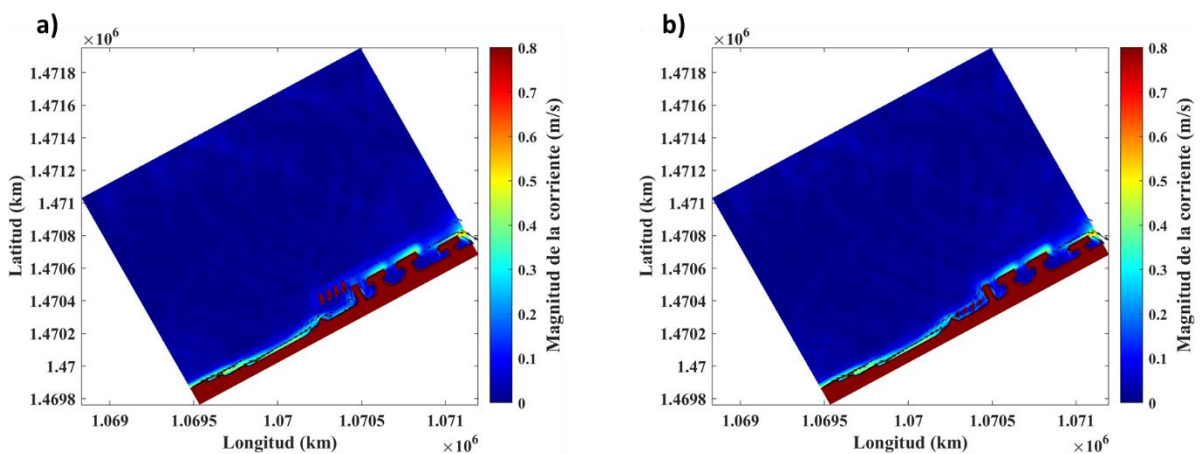
Al igual que en el caso 2 y debido a las limitaciones del modelo, las estructuras se representaron como una especie de pilotes para su visualización en la batimetría. Una vez obtenidos los resultados se procedieron a comparar con las condiciones dinámicas del caso anterior.

Figura 19. Vista en planta, campos de oleaje para la zona de estudio en el caso 2 (izquierda) y caso 3 (columna derecha).



En los resultados de los campos de oleaje, la variación de su energía no implicó un cambio significativo cerca de la línea de costa. Sin embargo, en el caso 3 se observa una reducción en el área protegida mar adentro, dado que al estar un poco más someras las estructuras, su intervención en la dinámica del oleaje es menor.

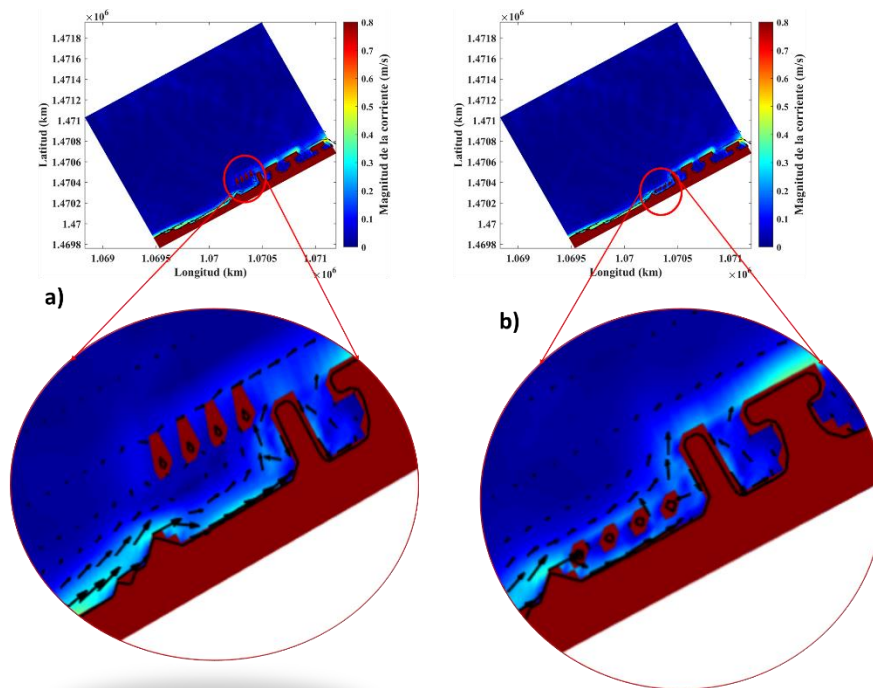
Figura 20. Vista en planta, campos de corrientes para la zona de estudio en el caso 2 (izquierda) y caso 3 (columna derecha).



En la figura 20 se muestran los campos de la magnitud de la corriente cerca al Laboratorio costero para los casos 2 (gráfica **a**) y el caso 3 (gráfica **b**). A simple vista pareciera que la dinámica para ambos casos fuera la misma, sin embargo, en el caso 3 ocurre una dinámica interesante con la

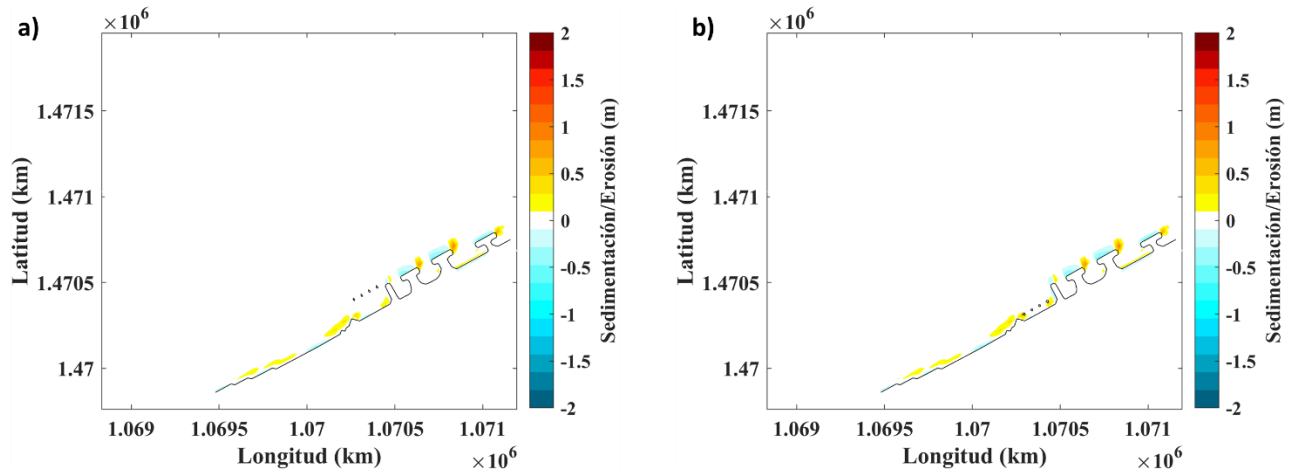
magnitud de las corrientes lo cual se observa de una mejor manera al realizar un zoom a la zona de interés (*Figura 21*).

Figura 21. Zoom a la vista en planta de la magnitud de la corriente en el laboratorio costero con las estructuras permeables caso 2 (a) y caso 3 (b)



En la Figura 21 se logra apreciar como para el caso 3, la magnitud de la corriente litoral es difractada por la estructura, haciendo que una parte, con menor magnitud, se desvíe hacia la costa. Mientras que la otra sigue su curso por encima de la estructura, reduciendo así la corriente en la línea de costa en 0.15 m/s en comparación con el caso 2, en el cual las estructuras realizan una disminución tenue a la corriente litoral. Teniendo en cuenta que el transporte de sedimentos en esta zona, se encuentra modulado en gran medida por la corriente litoral, la reducción de la magnitud en esta, refleja una disminución significativa de la erosión en el Laboratorio costero (**Figura 22**).

Figura 22. Vista en planta del transporte de sedimentos en el laboratorio costero con las estructuras permeables caso 2 (a) y caso 3



Los resultados de la figura 22 sugieren que para el caso 3 se presenta una reducción de la erosión que se encuentra al lado del espón cerca al lote de la universidad en comparación con el caso 2. Estos experimentos muestran las bondades de la implementación de estas estructuras.

5. Conclusiones

Las barreras permeables son estructuras de bajo costo, que tienen sencilla instalación y mantenimiento. Los resultados sugieren que estas estructuras pueden servir como moduladores de la energía del oleaje, modificación de la intensidad de las corrientes y reducción de las tasas de erosión. Sin embargo, es necesario mejorar el diseño siguiendo lo propuesto por Winterwerp *et al.* (2020), en cuanto al relleno de la estructura y su protección. Esto teniendo en cuenta que el material usado para esto, la polisombra, fue incapaz de proteger la estructura el embate de la madera proveniente de la descarga de los ríos.

Los resultados obtenidos sugieren que entre más cercana a la línea de costa sea la ubicación espacial de las estructuras permeables se podría modificar el patrón de la corriente litoral, aunque la disipación de la energía de las olas no sea tan eficiente. Sin embargo, esto muestra una respuesta positiva en la reducción de la erosión costera de la zona de intervención.

La implementación del modelo numérico es un poco limitada con respecto a la permeabilidad de las estructuras. Se hace necesario tener información más fina de la topografía.

6. Recomendaciones

Realizar una topo-batimetría más detallada de la zona de estudio que permita apreciar los cambios de pendiente en la zona intermareal y de esta manera mejorar la interpolación realizada por el modelo. Esto permitirá refinar la malla en Delft 3D, con el fin de poder hacer una representación más realista de la forma de las estructuras en el modelo numérico.

Hacer un monitoreo periódico de las condiciones oceanográficas y morfológicas del laboratorio costero que permita tener información actualizada de las condiciones en la zona, permitiendo tomar decisiones respecto a riesgos como la erosión costera.

Obtener espectros de oleaje de varios años con el fin de mejorar los resultados obtenidos en la modelación. Además de mejorar la serie de datos en campo para la validación de los resultados de la modelación.

Monitorear las condiciones de caudal presentes en río Hobo para la época seca y de lluvias, con el fin de incluir las descargas producidas por este en las modelaciones numéricas.

Referencias

- Anthony, E., & Gratiot, N. (2012). Coastal engineering and large-scale mangrove destruction in Guyana, South America: Averting an environmental catastrophe in the. *Ecological Engineering*, 47, 268-273.
- Bernal, G., Montoya, L., Garizabal, C., & Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera en el Golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 8, 123-135.
- Besset, M., Gratiot, N., Anthony, E., Bouchette, F., Goichot, M., & Marchesiello, P. (2019). Mangroves and shoreline erosion in the Mekong River delta, Viet Nam. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226, 106263. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272771419301672?via%3Dihub>
- Caicedo, A., & Hernández, J. (2016). Cambios estacionales en la dinámica sedimentaria de las playas desde Punta Yarumal hasta Playa Barajas (Golfo de Urabá, Caribe colombiano). (*Tesis de pregrado*). Universidad de Antioquía, Turbo.
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa Caribe colombiana. *Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras*, 33.
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional, & Universidad del Norte, .. (2021). *Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados*. Medellín, Antioquia/Colombia : Litografía Grafiservicios S.A.S.
- Rangel, N., & Posada, B. (2005). Geomorfología y procesos erosivos en la costa norte del departamento de Córdoba, Caribe colombiano (sector Nuevo-Cristo Rey). *Bol. Invest. Mar. Cost.* 3, ISSN 0122-9761., 101-119.
- Restrepo, A., Agudelo, P., Tejada, C., Molares, R., Torres, R., & Osorio, A. (2005). Estudio y Evaluación de Alternativas de Solución para la Protección Costera de unos Sectores de la costa Caribe colombiana. *Boletín Científico CIOH No. 23, ISSN 0120- 0542*, 90–102.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). *Xbeach Model Description and Manual*. Report 1200116/1002266. Delft, Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.

-
- Thomas, Y. F., Cesaraccio, M., Garc, C., & Ménanteau, L. (2007). Contribución de la hidrografía histórica al estudio de la cinemática de los fondos marinos: evolución del golfo de Urabá, Colombia. *Boletín Científico CIOH*, 25, 110-119.
- Winterwerp, J., Albers, T., Anthony, E., Friess, D., Mancheño, A., Moseley, K., . . . Van Wesenbeeck, B. (2020). Managing erosion of mangrove-mud coasts with permeable dams – lessons learned. *Ecological Engineering*, 158, 106078. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857420303669>
- Winterwerp, J., Borst, W., & De Vries, M. (2005). Pilot Study on the Erosion and Rehabilitation of a Mangrove Mud Coast. *Journal of Coastal Research*. *Journal of Coastal Research*, 21(2), 223–230.
- Winterwerp, J., Erfteimeijer, P., Suryadiputra, N., Van Eijk, P., & Zhang, L.-Q. (2013). Defining Eco-Morphodynamic Requirements for Rehabilitating Eroding Mangrove-Mud Coasts. *Wetlands*, 33, 515–526. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s13157-013-0409-x>