



**Seguimiento de cambios topobatimétricos: Informe cuantitativo de la evolución topobatimétrica en el periodo 2021 - 2022 en el Laboratorio costero de la universidad de Antioquia (Arboletes Antioquia)**

Luis Alfredo García Oquendo

Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero Oceanográfico

Asesor

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera, Especialista (Esp) en Mecánica de Suelos

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental  
Ingeniería Oceanográfica  
Turbo, Antioquia, Colombia  
2022

<b>Cita</b>	(García Oquendo, L., 2022)
<b>Referencia</b>	García Oquendo, L. (2022). <i>Seguimiento de cambios topobatimétricos: Informe cuantitativo de la evolución topobatimétrica en el periodo 2021 - 2022 en el Laboratorio costero de la universidad de Antioquia (Arboletes Antioquia)</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Créditos: Vladimir Toro, Carlos Eduardo Gutiérrez, Alba Cecilia Bustamante, Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA), Universidad de Antioquia, Departamento Administrativo para la Gestión del Riesgo de Desastres de Antioquia (DAGRAM), Gobernación de Antioquia.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez L.

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 y Agradecimientos**

Este trabajo de grado está dedicado a mi madre y hermanos quienes me ayudaron y apoyaron en mi proceso de formación académica; a mi amada compañera Alma Niño que me ayudó en los momentos más difíciles y me brindó fuerzas para terminar esta titulación.

A todos los profesores que desde su experiencia y voluntad me brindaron su amistad y conocimiento para formar un profesional con responsabilidad, honestidad y respeto.

Especial agradecimiento a mi amigo y asesor, el profesor Carlos E. Gutiérrez, por su acompañamiento y asesoría durante el desarrollo de este trabajo; a la profesora Alba Cecilia Bustamante por la orientación y apoyo; al profesor Vladimir Toro por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo en marco del proyecto PIMECLA.

A la Gobernación de Antioquia, y al “*Programa integral para el monitoreo y mitigación de la erosión costera en el litoral antioqueño (PIMECLA)*” en el convenio DAGRAN-UDEA.

Un grato agradecimiento a todos los que apoyaron en las mediciones e hicieron posible el desarrollo del proyecto PIMECLA.

A toda mi Universidad de Antioquia por estar en la región de Urabá generando oportunidades y transformando vidas.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
3.1. GEOFORMAS COSTERAS .....	12
3.2. EROSIÓN COSTERA.....	13
3.3. FACTORES OCEANOGRÁFICOS (OLEAJE, MAREAS Y CORRIENTES) .....	13
3.4. FACTORES GEOLÓGICOS .....	14
3.5. OBRAS DURAS DE PROTECCIÓN COSTERA.....	14
3.6. OBRAS BLANDAS DE PROTECCIÓN COSTERA .....	15
3.7. PERFILES .....	16
3.8. LEVANTAMIENTOS BATIMÉTRICOS.....	18
3.9. LEVANTAMIENTOS CON DRON.....	18
3.10. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM). .....	20
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>23</b>
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	<b>24</b>
5.1. MEDICIONES CON DRON .....	24
5.2. MEDICIONES CON GPS DIFERENCIAL Y ECOSONDA .....	25
5.3. PROCESAMIENTO DE DATOS .....	27
<b>6. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>30</b>
6.1. PERFILES .....	30
6.2. VUELOS DE DRON .....	39
6.3. BATIMETRÍA .....	47
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>56</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>57</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>58</b>

## Lista de tablas

<b>TABLA 1.</b> <i>SEGUIMIENTO DE EROSIÓN EN LOS PERFILES 1 AL 8.</i> .....	35
<b>TABLA 2.</b> <i>VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS EN EL PIE DEL TALUD.</i> .....	37
<b>TABLA 3.</b> <i>MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL.</i> .....	49
<b>TABLA 4.</b> <i>MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL PARA LA BATIMETRÍA DEL 14 DE FEBRERO DEL 2021</i>	51
<b>TABLA 5.</b> <i>MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL PARA LA BATIMETRÍA DE AGOSTO DEL 2021.</i> .....	53
<b>TABLA 6.</b> <i>VOLUMEN EROSIONADO Y SEDIMENTADO.</i> .....	55

## Lista de figuras

<b>FIGURA 1.</b> <i>ÁREA DE ESTUDIO. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL LABORATORIO COSTERO, ARBOLETES.</i> .....	23
<b>FIGURA 2.</b> <i>DRON, DGPS Y ECOSONDA MONOHAZ.</i> .....	24
<b>FIGURA 3.</b> <i>PLAN DE VUELO ESTABLECIDO PARA EL LOTE DE EROSIÓN COSTERA.</i> .....	25
<b>FIGURA 4.</b> <i>PERFILES DE CONTROL EN EL TALUD.</i> .....	26
<b>FIGURA 5.</b> <i>LÍNEAS HIDROGRÁFICAS USADAS EN EL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO.</i> .....	27
<b>FIGURA 6.</b> <i>PROCESO IMPLEMENTADO PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.</i> .....	28
<b>FIGURA 7.</b> <i>ÁREA TRANSVERSAL EROSIONADA EN LOS PERFILES 1 AL 2.</i> .....	31
<b>FIGURA 8.</b> <i>ÁREA TRANSVERSAL EROSIONADA EN LOS PERFILES 3 Y 4.</i> .....	32
<b>FIGURA 9.</b> <i>ÁREA TRANSVERSAL EROSIONADA EN LOS PERFILES 5 Y 6.</i> .....	33
<b>FIGURA 10.</b> <i>ÁREA TRANSVERSAL EROSIONADA EN LOS PERFILES 7 Y 8.</i> .....	34
<b>FIGURA 11.</b> <i>ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE (WIND WAVES AND SWELL).</i> .....	36
<b>FIGURA 12.</b> <i>VOLUMEN EROSIONADO EN LOS PERFILES DE CONTROL.</i> .....	38
<b>FIGURA 13.</b> <i>RETROCESO DEL PIE DEL TALUD EN EL LABORATORIO DESDE 6 DE FEBRERO 2021 AL 23 DE ABRIL 2022.</i> .....	39
<b>FIGURA 14.</b> <i>RETROCESO DEL PIE DEL TALUD DESDE 6 DE FEBRERO HASTA EL 14 DE AGOSTO DEL 2021.</i> 40	
<b>FIGURA 15.</b> <i>DESPLAZAMIENTO DEL PIE DEL TALUD DESDE EL 14 DE AGOSTO DEL 2021 AL 23 DE ABRIL DEL 2022.</i> .....	41
<b>FIGURA 16.</b> <i>RETROCESO DEL BORDE SUPERIOR DEL TALUD.</i> .....	43
<b>FIGURA 17.</b> <i>RETROCESO DE LA PARTE SUPERIOR DEL ESCARPE (RIO HOBO).</i> .....	44
<b>FIGURA 18.</b> <i>RETROCESO DE LA PARTE BAJA DEL ESCARPE (RIO HOBO).</i> .....	45
<b>FIGURA 19.</b> <i>RETROCESO DE LA PARTE SUPERIOR DEL ESCARPE INTERMEDIO ENTRE RIO HOBO Y EL LABORATORIO.</i> .....	46
<b>FIGURA 20.</b> <i>RETROCESO DEL PIE DEL ESCARPE INTERMEDIO ENTRE RIO HOBO Y EL LABORATORIO.</i> .....	47
<b>FIGURA 21.</b> <i>LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO ARBOLETES (ANTIOQUIA).</i> .....	48
<b>FIGURA 22.</b> <i>DEM MODELO NATURAL NEIGHBOR CON TAMAÑO DE MALLA DE 20CM.</i> .....	49
<b>FIGURA 23.</b> <i>RECORTE DEL MODELO NATURAL NEIGHBOR PARA EL ÁREA DEL LABORATORIO.</i> .....	50
<b>FIGURA 24.</b> <i>BATIMETRÍA DEL 14 DE FEBRERO 2021.</i> .....	52
<b>FIGURA 25.</b> <i>BATIMETRÍA DE AGOSTO DEL 2021 (MALLA 4M).</i> .....	53
<b>FIGURA 26.</b> <i>RESULTADO DE LA DIFERENCIA ENTRE LA BATIMETRÍA DE AGOSTO Y FEBRERO DEL 2021.</i> ...	54

## Resumen

La erosión costera ha generado la necesidad de crear obras de protección costera, sin embargo, al implementarse estas obras de forma empírica se ha intensificado este fenómeno, generando impactos en ecosistemas, centros urbanos y actividades costeras. Este trabajo consistió en evaluar la funcionalidad del talud construido en el Laboratorio costero de la Universidad de Antioquia, ubicado en el municipio de Arboletes, para mitigar la erosión presente en el lugar; haciéndole seguimiento a través de perfiles de control, usando dispositivos con precisión centimétrica: GPS diferencial y dron, en el periodo comprendido entre agosto del 2021 y abril del 2022. A demás, se monitoreo la zona sumergida adyacente al talud por medio de batimetrías realizadas con ecosonda monohaz en los meses de febrero y agosto del 2021.

Con base en el seguimiento de los perfiles, se encontró que la parte afectada por la erosión fue el pie del talud, debido a que esta zona careció de protección contra la incidencia del oleaje. En la zona sumergida adyacente al talud se encontró que para agosto del 2021 había mayor acumulación de sedimentos respecto al mes de febrero del 2021.

De acuerdo a estos resultados, se concluye que para que la obra funcione correctamente es necesario proteger el pie del talud, ya sea con vegetación (mangle rojo) o materiales ecológicos que protejan los limos y arcillas de la incidencia del oleaje; de lo contrario, la estructura está comprometida al colapso por pérdida del pie del talud y socavación.

*Palabras clave:* Protección costera, Talud, Perfiles topográficos, Batimetría, Línea de costa, Erosión costera.

### **Abstract**

Coastal erosion has generated the need to create coastal protection works, however, the empirical implementation of these works has intensified this phenomenon, generating impacts on ecosystems, urban centers and coastal activities. This work consisted of evaluating the functionality of the slope built at the Coastal Laboratory of the University of Antioquia, located in the municipality of Arboletes, to mitigate the erosion present in the place, monitoring it through control profiles, using devices with a centimetric precision: differential GPS and drone, in the period between August 2021 and April 2022. In addition, the submerged zone adjacent to the slope will be monitored by means of bathymetry using a single beam echo sounder in February and August 2021.

Based on the monitoring of the profiles, it was found that the part affected by erosion was the foot of the slope, because this area lacked protection against the impact of waves. In the submerged area adjacent to the slope, it was found that by August 2021 there was a greater accumulation of sediments compared to February 2021.

Based on these results, it is concluded that for the work to function properly, it is necessary to protect the foot of the slope, either with vegetation (red mangrove) or ecological materials that protect the silts and clays from the impact of waves; otherwise, the structure is committed to collapse due to loss of the foot of the slope and scour.



## 1. Introducción

Arboletes es un municipio perteneciente al departamento de Antioquia ubicado en la región de Urabá, limita al norte con el mar caribe, al oriente con el municipio los Córdoba (Departamento de Córdoba), al sur con los municipios de San Pedro de Urabá y Turbo y al occidente con los municipios de San Juan de Urabá y Necoclí. Su ubicación geográfica permite ser un destino con diferentes atractivos turísticos como lo son ríos, montañas, el mar y volcán de Iodo. En este municipio la universidad de Antioquia estableció un laboratorio costero que se encuentra entre las coordenadas comprendidas entre la latitud 8°50'54.85"N, longitud 76°26'12.39"O y la latitud 8°50'53.24"N, longitud 76°26'15.67"O, en donde se pueden realizar experimentos en escala 1:1 y entre otros; se estudian los cambios de la línea de costa provocados por factores como: oleaje, corrientes, precipitaciones, entre otros.

La zona de interacción entre la tierra y el mar, es decir, la línea de costa de arboletes se localiza en el “Cinturón del Sinú”, una secuencia sedimentaria de unos 8 km de espesor, conformada principalmente por depósitos de origen terrígenos, como son limos y arcillas, o de material biogénico derivado de la masa terrestre u organismos que vivieron en el agua durante el Oligoceno-Plioceno (Caro, 1984). En esta zona se presentan en verano vientos alisios con magnitudes de 4 y 9.4 m/s, precipitaciones de 40mm/mes; en invierno predominan los vientos del sur y precipitaciones de 200mm/mes, tiene un régimen mareal semidiurno mixto, con dos altos y dos bajos de diferentes amplitudes en un día mareal que puede llegar a tener alturas máximas de 40cm (Correa & Vernet, 2004); estas condiciones oceanográficas meteorológicas y geológicas favorecen los procesos erosivos presentes en el lugar.

En los últimos años los habitantes y empresas que tiene patrimonios en la orilla del mar de este municipio, han sido testigos del avance de este sobre el continente, generando pérdida de playas y el desprendimiento de taludes que precisan a la construcción de obras de protección costera; como se ha evidenciado en el lote de la universidad de Antioquia, en donde se recurrió a técnicas de perfilamiento de taludes como experimento para controlar el retroceso de la línea de costa y el desprendimiento de los taludes sin necesidad de recurrir a obras de concreto y hormigón (obras duras), pues este tipo de obras pueden trasladar el problema a otros lugares afectando otras comunidades y/o ecosistemas, como mencionó (Rangel et al, 2012), “ *los problemas de erosión se han visto multiplicados en los últimos años debido a la implementación de obras duras empíricas de protección costera*” .

Para realizar este experimento, la Universidad de Antioquia en convenio con el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (DAGRAN) y la Gobernación de Antioquia, disminuyeron la pendiente de la ladera de casi 90° presente en el laboratorio costero a 35° en la parte superior, y 15° en la zona inferior del talud, con el fin de monitorear mediante perfiles de control y vuelos de dron, el desprendimiento de material terrígeno por acción del oleaje y concluir si esta intervención en el talud genera disminución en el proceso erosivo que afecta este lugar. Con base a esto, este trabajo consistió en monitorear por medio de topografía y batimetría el comportamiento de la línea de costa, el cambio de las pendientes del talud, la cantidad de sedimentos erosionados en los perfiles de control establecidos para el monitoreo, la sedimentación y erosión en el área de estudio sumergida, y mediante estos monitoreos determinar si la intervención realizada en el acantilado establece un equilibrio en la franja costera y cumple con propósito para el que fue realizado.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Analizar a través de métodos topobatimétricos, los efectos que genera el cambio de la pendiente realizada en el acantilado, sobre el proceso erosivo presente en Laboratorio costero de la universidad de Antioquia.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Proponer una metodología para realizar el monitoreo.
- Obtener perfiles de control que permitan identificar los cambios morfológicos después de la intervención del talud.
- Generar modelos de elevación digital para identificar cambios morfológicos en el área estudiada.
- Establecer la funcionalidad de la obra blanda con las condiciones físicas y oceanográficas del terreno.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Geoformas costeras

Las geoformas costeras son el resultado de procesos erosivos, transporte y depósito de sedimentos que han evolucionado en un tiempo geológico relativamente corto (Vargas-T et al, 2016), dando forma, tamaño y volumen a la costa.

Según (Belmonte & Ibarra, 2017), las costas se clasifican en tres categorías:

- 1) Costas rocosas y arenosas: Las costas rocosas tienen cambios muy lentos a escala temporal humana (Perez-Alberti et al, 2013), mientras que las costas arenosas (playas) cambian con gran facilidad. Las playas son depósitos de material sólido particulado (sedimentos) en lugares costeros, sujetos a la acumulación y erosión por la influencia del oleaje y las corrientes (Hattersley & Foster, 1968; Masselink & Hughes, 2003; Boak & Turner, 2005).
- 2) Costas formadas por cambios del nivel del mar: Las costas emergentes son formadas cuando hay un descenso del nivel del mar, ya sea por efectos de un cambio global o elevaciones locales. Un litoral sumergido es el resultado del aumento del nivel del mar, ya sea a nivel global, por hundimiento de la superficie terrestre (subsistencia local) o equilibrios isostáticos.
- 3) Según la estructura geológica: Una costa es concordante cuando las bandas de diferentes tipos de rocas se disponen de forma paralela y la tendencia de la erosión es la formación de cabos de bahía; en cambio en las costas discordantes la disposición de las rocas es perpendicular

De acuerdo a la anterior clasificación, la geoforma presente en el Laboratorio de erosión costera de la Universidad de Antioquia, es una costa formada por cambios del nivel del mar (terracea marina emergida) compuesta por una secuencia sedimentaria de unos 8 km de espesor, conformada principalmente por depósitos de origen terrígenos, como son limos y arcillas, o de material biogénico derivado de la masa terrestre u organismos que vivieron en el agua durante el Oligoceno-Plioceno (Caro, 1984).

Estas geoformas usualmente se ven afectadas por procesos erosivos que se intensifican de acuerdo a factores climáticos, oceanográficos, geológicos, meteorológicos, etc. Cuando son inestables y/o propensas a erosionarse o desprenderse, se recurre a soluciones que involucran obras duras o blandas como son muros de contención, perfilamientos y otros métodos para

controlar la erosión costera y/o el desprendimiento de estos, y proteger la línea de costa. La línea de costa es definida como un “*elemento de contacto entre la superficie terrestre y la superficie sumergida*” (Dolan et al, 1980). En el Laboratorio de erosión costera de la Universidad de Antioquia se definió la línea de costa como el pie del talud, para verificar el comportamiento de este, ya que este límite natural es muy dinámico y se presentan procesos de erosión costera que moldean constantemente la geoforma.

### **3.2.Erosión costera**

La erosión costera se entiende como el retroceso de la línea de costa con pérdidas importantes de playas y terrenos aptos para el desarrollo de actividades humanas (Merlotto & Bértola, 2007). A demás, también afecta ecosistemas que están presentes en la línea de costa, como son pastos marinos, bosques de manglar, bosques tropicales, entre otros. Este proceso natural se ve afectado por factores geológicos (tipos y propiedades del suelo), factores oceanográficos (oleaje, mareas y corrientes) y demás factores propios del sector costero, como el clima, y acciones antrópicas (actividad humana) (Hinrichsen, 1999).

### **3.3.Factores oceanográficos (oleaje, mareas y corrientes)**

Los factores oceanográficos con mayor importancia en el moldeamiento de las geoformas costeras son el oleaje, mareas y corrientes, pues estos tienden a ser más constantes durante el paso del tiempo.

Según (Belmonte & Ibarra, 2017) el oleaje es el “*agente climático marino con mayor capacidad de acción sobre la costa, es definido, como la perturbación ejercida por el viento sobre la superficie del mar durante cierto periodo de tiempo, generando ondas con periodos entre 1 y 30 segundos con diferentes niveles de energía*”.

La acción del oleaje como agente de la erosión costera es importante, pues genera corrientes longitudinales y transversales a lo largo de la costa, que hacen migrar a los sedimentos desde el límite superior de la playa seca (*Coast Line*) hasta el límite inferior de la playa sumergida o punto de cierre (*Closure depth*) (Belmonte & Ibarra, 2017).

La marea es otro agente de la erosión costera, que con el incremento y descenso periódico (semidiario o diario) del nivel del mar modifica la línea de costa, permitiendo que el oleaje incida en diferentes niveles de litoral costero. Este agente se caracteriza por tener alturas máximas denominadas pleamar y mínimas, bajamar. A demás, genera corrientes de flujo

(llenantes) y reflujo (vaciantes) las cuales pueden ser muy intensas en áreas con profundidades bajas (marismas) o en cuerpos de aguas confinados (estuarios o rías).

Otro rasgo que lo caracteriza es el régimen mareal, el cual se puede clasificar como marea diurna donde se produce una pleamar y una bajamar durante un día mareal. La marea semidiurna en la que se producen dos pleamares y dos bajamares de cada día mareal, y presentan alturas similares; y la marea mixta tiene desigualdades relativamente marcadas en pleamar y bajamar o ambas.

Las corrientes superficiales son un agente erosivo que se generan por diferentes factores, como son el oleaje, marea, fricción del viento, gravedad, cambios de presión, rotación de la tierra (fuerza de Coriolis), interferencia de los continentes, e indirectamente la radiación solar (Schneider et al, 2004). Estas generan circulaciones oceánicas superficiales que intercambian energías y transportan materia entre continente y mar. La magnitud de la materia transportada por estas corrientes se determina de acuerdo a los factores geológicos que componen el suelo.

### **3.4. Factores geológicos**

Los factores geológicos son un factor importante en el moldeamiento de las geoformas costeras, pues estos son los que determinan cómo se producen los cambios generados por la influencia de los factores erosivos oceanográficos.

La influencia de los factores erosivos oceanográficos, se intensifica cuando se tienen suelos desprotegidos y con poca resistencia a la erosión; como es el caso de los suelos finos (limos y arcillas) caracterizados por tener bajo módulo de elasticidad, facilidad de erosión o meteorización, baja resistencia al hundimiento por rotura, riesgos de caídas de bloques, o deslizamientos en taludes y cortes, dificultad de compactación, alterabilidad por vibraciones y alterabilidad por presencia de agua (Jaramillo-Morilla, 2008). Al tener este tipo de suelos expuestos a la influencia del mar, se generan cambios en la línea de costa que pueden perjudicar obras públicas, ecosistemas y predios privados, generando impactos negativos sobre el desarrollo de actividades económicas (turismo, refinerías, puertos, pesca y acuicultura) del sector costero.

### **3.5. Obras duras de protección costera**

Con el fin de evitar que estos agentes erosivos oceanográficos y geológicos tengan impactos sobre las zonas costeras donde se desarrollan estas actividades se han desarrollado en

países como México, Estados Unidos, Colombia y otros, diferentes estructuras rígidas de “solución rápida” como son espolones, rompeolas y muros de protección costera, los cuales son construidos mediante materiales duros compuestos de grava, roca, concreto, acero y otros, generando protección a costas, playas y demás sectores de interés, disipando, refractando y difractando el oleaje incidente. Estas obras mediante su funcionamiento, construcción y propiedades físicas, son denominadas obras duras de protección costera. Estas estructuras cumplen con la protección para las que fueron creadas, permitiendo la preservación de algunas zonas, pero causando desequilibrios en el balance de sedimentos al impedir la circulación natural de estos, por lo cual, Rangel et al, (2012), propone que debe implementarse una protección del litoral por medio de obras blandas, en la cual la solución apropiada se debe seleccionar teniendo en cuenta las características de la región costera estudiada. Esta propuesta se establece teniendo en cuenta que las obras rígidas al interrumpir el transporte natural de sedimentos, provocan erosiones más intensas en zonas adyacentes, generando impactos ambientales que perjudican ecosistemas o asentamientos urbanos (Collazos & Aldiber, 2012), por lo cual, la implementación de las estructuras duras como protección de un sistema costero debe ir cambiando a obras más amigables con el ambiente (obras blandas) que preserven los ecosistemas existentes y garanticen la estabilidad futura de estos.

### **3.6. Obras blandas de protección costera**

Una obra blanda o amigable con el ambiente costero puede definirse como una estructura diseñada a partir de elementos naturales, con el fin de crear nuevas playas o rehabilitarlas, defender playas, restablecer el transporte natural de sedimentos, proteger un ecosistema costero, proteger un centro poblado o estructura pública sin necesidad de utilizar materiales rígidos como el hormigón, roca, acero, entre otros.

Existen varios tipos de obras blandas que son usadas de acuerdo con la problemática afrontada y el tipo de solución que se necesite dar; por ejemplo, si se necesita rehabilitar una playa de forma rápida y acertada, se recurre a rellenos de arena que cumplan las características granulométricas de la zona afectada, es decir, que la arena utilizada para el relleno sea de las mismas características físicas y químicas a las presentes en el lugar. Además de rellenos, otros ejemplos de estas obras son la reconstrucción de dunas para defender playas, el uso de espolones de madera, reforestación con vegetación nativa del lugar estudiado, bolsas de arenas, estructuras compuestas por geotextiles, perfilamiento de taludes, entre otros.

Cada una de estas obras tiene funcionalidades diferentes respecto a las condiciones geológicas, oceanográficas, meteorológicas y demás condiciones propias del lugar afectado, por ejemplo, el perfilado de escarpes cumple la función de estabilizar el sistema ante la presencia de socavación y erosión que generan los procesos erosivos geológicos, climáticos y oceanográficos de un sector costero. Todas estas obras mencionadas anteriormente cuentan con características y cualidades importantes que las hacen ser una mejor solución a la hora de elegir cómo enfrentar problemas naturales como la erosión, pues estas requieren menor tiempo de construcción en comparación con las rígidas, menor inversión y se contrastan mejor al paisaje (Collazos & Aldiber, 2012).

Cuando se implementan obras blandas para protección y/ o recuperación de un sector costero, como son perfilados de escarpes o acantilados; es importante implementar métodos de medición continuos en el tiempo, tales como perfiles de elevación topográfica, vuelos de dron, batimetrías, entre otros.

Estos métodos involucran topografía de detalle, implementando dispositivos como son: teodolitos, niveles, taquímetros, estación total, GPS diferencial, dron, inclinómetros, galgas de deformación, imágenes satelitales, entre otros. Estos instrumentos permiten medir las coordenadas y altitud de uno o varios puntos sobre un área específica, generando datos representativos que permiten establecer modelos lineales (perfiles) y/o modelos de elevación digital (DEM) que representan la información topográfica y/ o batimétrica del lugar estudiado.

Los perfiles obtenidos por los instrumentos mencionados anteriormente, permiten observar en dos dimensiones las variaciones verticales y horizontales de una superficie durante un periodo de medición determinado, además, estas representaciones numéricas permiten cuantificar en términos de área y porcentaje la cantidad de material erosionado o acumulado durante el tiempo de medición; mientras que los DEM permiten conocer variaciones espaciales y altimétricas (X,Y,Z) mediante interpolaciones a modelos líneas o puntos aleatorios georeferenciados .

### **3.7.Perfiles**

Un perfil es la medición de la inclinación, altura y ancho de una superficie, ya sea en playas, escarpes, vertientes, entre otros. Los perfiles cumplen con ciertas directrices de medición las cuales son: Se deben de medir desde un punto fijo, en tramos de longitud fija; y se deben establecer marcadores permanentes que indiquen el inicio y la dirección de la medición (Fonseca, 2009). Existen muchos métodos de medición de perfiles que involucran



instrumentos artesanales como es el método Emery, el cual fue desarrollado por el científico K.O. Emery en el año 1961, este método es considerado uno de los más sencillos para mediciones de perfiles de playa, pues requiere de un mínimo de dos personas para su uso, y está compuesta por dos varas graduadas (Torres, 2021). Además, otros métodos de mediciones de perfiles involucran instrumentos más especializados, como son estación total, GPS diferencial, teodolito, entre otros; los cuales tienden a tener precisiones en orden de centímetros o milímetros, lo cual ayuda a determinar con mayor precisión los estados morfodinámicos de un sector estudiado. Estos estados (erosión y sedimentación) definen el tipo de perfil presentes en el área de estudio, ya sea perfil de erosión o perfil de sedimentación.

El perfil de erosión se produce bajo en condiciones energéticas de oleaje, provocando pérdida de material en la parte visible del perfil, con retroceso de línea de costa y muchas veces acumulación de sedimentos en la zona sumergida del mismo (Medina et al, 1995); mientras que el perfil de sedimentación se da debido al depósito de sedimentos colocado por acción de factores climáticos como son, lluvias, corrientes, entre otros.

Una forma de determinar el tipo de perfil que se tiene, consiste en realizar monitoreos continuos en épocas de verano, invierno y transición, y luego mediante la ecuación (1) se calcula la longitud del perfil y evolución en las alturas.

$$Distancia = \sqrt{(x_{fijo} - x_{no\ fija})^2 + (y_{fijo} - y_{no\ fija})^2} \quad (1)$$

En donde:

$x_{fijo}$ : Es la componente horizontal del punto fijo establecido para la medición del perfil (coordenada Este del punto fijo).

$x_{no\ fijo}$ : Es la componente horizontal de los puntos medidos en el perfil (Coordenada Este los puntos medidos).

$y_{fijo}$ : Es la componente vertical del punto fijo establecido para medición del perfil (Coordenada Norte del punto fijo).

$y_{no\ fija}$ : Es la componente vertical de los puntos medidos en el perfil (Coordenada Norte de los puntos medidos en el perfil).

Con la distancia calculada por la ecuación (1) y las alturas medidas, se realiza un gráfico en dos dimensiones que muestra la altura de cada punto del perfil, con respecto a distancia correspondiente a cada uno.

Esta forma de analizar los perfiles, es muy diferente a la empleada en los DEM, pues estos se basan en interpolaciones de perfiles o nubes de puntos georreferenciados.

### **3.8. Levantamientos batimétricos**

Cuando se hacen levantamientos batimétricos con ecosondas monohaz, lo que se mide son perfiles que representan las variaciones altimétricas del fondo oceánico; estos se miden por medio de líneas hidrográficas que abarcan toda el área a estudiar.

Debido a que los levantamientos batimétricos deben de representar con alta precisión los detalles en los fondos de los cuerpos de agua, cada día se avanza en dispositivos electrónicos más efectivos para estos tipos de mediciones, es por esto que instrumentos como ecosondas vienen con diferentes formas de medición, uno de ellos es la cantidad de haz usadas por el dispositivo para la toma de los puntos que representan el relieve del suelo, ya sea Monohaz o Multihaz, influyendo en los resultados obtenidos. Otra característica importante en estos dispositivos es la frecuencia con la que trabajan, ya sea frecuencia alta o baja. Las frecuencias altas, que son valores de 200KHz se reflejan en materiales de baja densidad, mientras que las frecuencias bajas que están alrededor de los 15 KHz, se reflejan en capas de alta densidad, siendo adecuado trabajar con frecuencias del orden de los 50 KHz con el fin de minimizar los errores en las mediciones (Serta et al, 1994). La Asociación British Ports en 1987 en su estudio de (*An evaluation of echo-sounders for Hydrographic surveying in ports*) establece que el uso de las frecuencias debe ser adecuado con la tipología y características de los materiales del fondo, para evitar errores de interpretación de los valores arrojados por los dispositivos y poder garantizar datos de calidad.

### **3.9. Levantamientos con dron**

Los levantamientos con dron siguen el mismo principio de los levantamientos batimétricos, es decir; por medio de líneas (similares a las líneas hidrográficas) se crea un plan de vuelo y el dron realiza la toma de imágenes correspondientes al área de estudio, que determinan las variaciones altimétricas de la topografía terrestre, así como las batimetrías representan el fondo oceánico. La calidad de los datos (fotos) tomadas por el dron depende de la calidad y tipo de la cámara usada, el plan de vuelo implementado, los puntos topográficos de control usados para establecer con mayor precisión la ubicación y altura de los datos, y la altura a la que el dron realiza el vuelo.

Según Villareal Moncayo, (2015), en su tema de investigación “Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control”, concluyó que la precisión de los levantamientos topográficos realizados con dron, varían de acuerdo con la ubicación y cantidad de los puntos de control, y determinó que se necesitan como mínimo 3 puntos de control para realizar levantamientos topográficos con drones, obteniendo una máxima precisión de 1.64 píxeles por modelo.

En el mismo año (Hilario Tacca, 2015) al comparar los DEM obtenidos por los vuelos realizados con un dron y los obtenidos por los datos medidos con estación total, concluyó que ambos métodos tienen resultados de volúmenes y áreas similares; por lo cual, los drones son dispositivos muy útiles para levantamientos topográficos si son usados por expertos en temas de fotogrametría, ya que se requiere proyectar de manera ortogonal sobre un plano de referencia las imágenes tomadas por el dron, y si las personas que emplean estos métodos no saben interpretar los resultados obtenidos, se pueden obtener modelos con pocos puntos de correlación entre las imágenes y por consiguiente, poca precisión.

Estos monitoreos topográficos y batimétricos mencionados anteriormente, que pueden hacerse de forma continua en el tiempo, generan modelos de elevación digital basados en interpolaciones de perfiles o conjunto de puntos aleatorios georreferenciados.

### **3.10. Modelo de elevación digital (DEM).**

Un modelo de elevación digital es la representación matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar; la unidad básica de información en un DEM, es un punto acotado, definido por coordenadas espaciales X, Y, Z. Estos modelos tienen datos estructurados con sistemas de información geográfica, por lo cual históricamente se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y ráster (Felicísimo, s.f).

Estos modelos se caracterizan por representar los datos de acuerdo a unas características, como es el caso de los modelos compuestos por datos vectoriales, que se basan en representaciones formadas por formas u objetos geométricos definidos por las coordenadas de nodos y vértices, en los cuales, los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos; mientras que los modelos de datos ráster están basados en representar localizaciones espaciales, a las cuales se le asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie; en estos, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que dividen el terreno en celdas con distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada (Felicísimo, s.f).

Para obtener estos modelos (DEM) es necesario la captura de datos con la información topográfica o batimétrica representativa de un lugar, con la cual se transformará la realidad geográfica a la estructura digital de datos. Esta es una fase de gran importancia ya que la calidad de datos es el factor limitante para los procesamientos que se realicen posteriormente, por eso es importante usar dispositivos que usen métodos de mediciones directas con precisiones milimétricas o centimétrica a la hora de obtener los datos, como es el caso de ecosonda, estación total, GPS diferencial, entre otros.

Estos datos son interpolados a través de métodos como Kriging, vecinos naturales, TIN, y demás; que ayudan a estimar valores en lugares no muestreados, utilizando la información proporcionada por los dispositivos de medición. Los modelos resultantes de estos métodos presentan diferentes valores dispersos de un valor central, es decir, tienen diferentes rangos de precisión, lo que hace difícil elegir cual modelo representa con mayor precisión la información suministrada por los dispositivos de medición. Con el fin de hacer una buena elección, se hacen análisis estadísticos que involucran la desviación estándar, error cuadrático medio y error medio, los cuales ayudan a en la elección de estos modelos.

### 3.10.1. Error medio

El error medio (EM) se define como la sumatoria de la diferencia del valor observado y el valor predicho por un modelo, y está representado por la siguiente ecuación:

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (Z_i^{modelo} - Z_i^{medido}) \quad (2)$$

Donde:

n: es la totalidad de los datos medidos en campo.

$Z_i^{modelo}$  es el valor de elevación calculado por el modelo.

$Z_i^{medido}$  es el valor de elevación medido en campo.

### 3.10.2. Error cuadrático medio ECM

Es un estimador que trata de evaluar el valor esperado de la pérdida del error al cuadrado entre valores predicho por un modelo predeterminado, y los valores observados en campo.

$$EMC = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n}\right) * (Z_i^{modelo} - Z_i^{medido})^2} \quad (3)$$

### 3.10.3. Desviación estándar

La desviación estándar es una medida de dispersión que pretende estimar que tan dispersos están los datos respecto a un valor central, generalmente la media aritmética.

Para el caso especial, el valor central será el ERROR MEDIO ya que, por las características de las variables analizadas, es improbable determinar un valor medio  $\mu$  de datos espaciales ya que estos están amarrados a su posición.

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n}\right) * [(Z_i^{modelo} - Z_i^{medido}) - EM]^2} \quad (4)$$

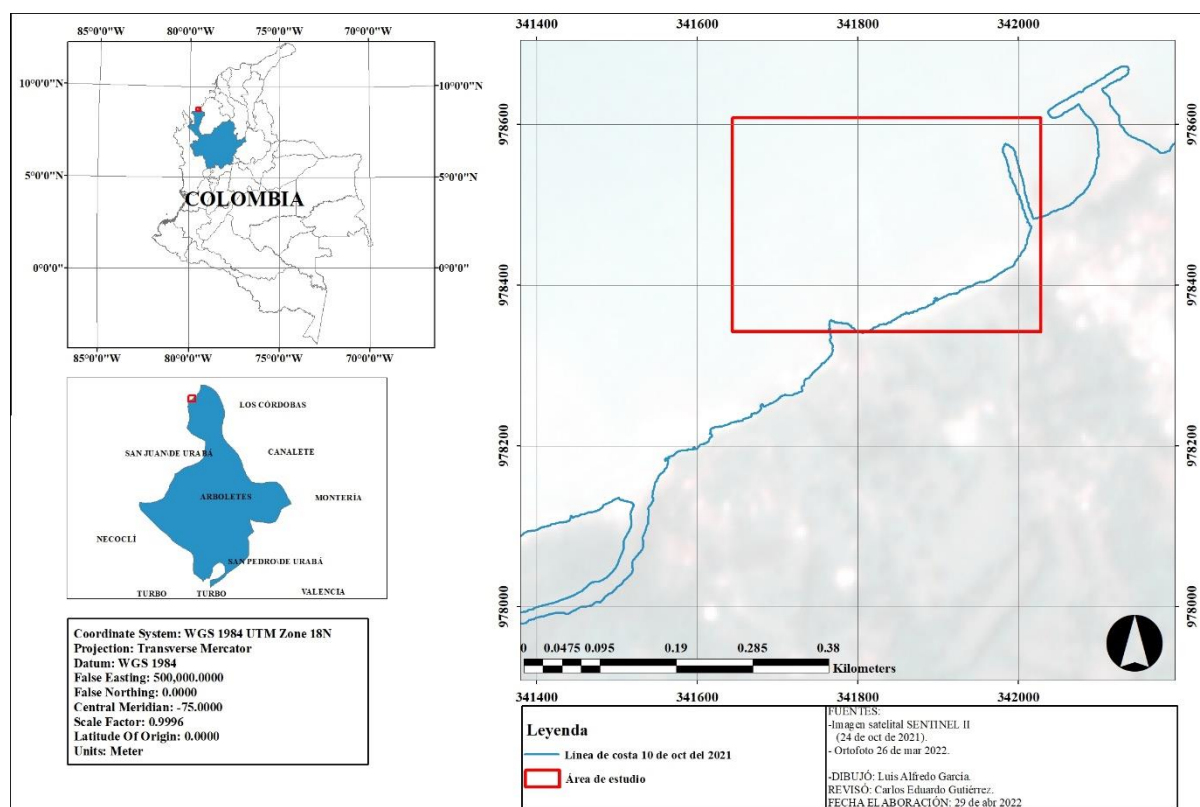
Con estos valores estadísticos, se permite seleccionar modelos que representan de forma más acertada los levantamientos topográficos o batimétricos de un área de estudio.

#### 4. Área de estudio

El lote de erosión costera se encuentra ubicada al sur del casco urbano del municipio de Arboletes entre las coordenadas latitud  $8^{\circ}50'54.85''N$ , Longitud  $76^{\circ}26'12.39''O$ , y latitud  $8^{\circ}50'53.24''N$  y longitud  $76^{\circ}26'15.67''O$  (ver **Figura 1**), cuenta un área aproximada de 2.6 hectáreas; la zona del talud que fue perfilada con pendientes de  $35^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  tiene una longitud lineal de unos 100 metros aproximadamente. Este lugar se sitúa al norte de río Hobo a una distancia aproximada de 350 metros; presenta suelos compuestos por limos y arcillas que hacen parte de una secuencia sedimentaria de unos 8 km de espesor conformada principalmente por depósitos de origen terrígeno o de material biogénico correspondiente al Oligoceno – Plioceno (Caro, 1984). Además, presenta precipitaciones medias de 40 mm/mes, vientos con magnitudes comprendidas entre 4 y 9.4 m/s, correspondiente a vientos alisios del Norte y Noroeste, presenta un régimen mareal semidiurno mixto, con amplitudes máximas de mareas comprendidas entre 40 y 50 cm (Correa & Vernet, 2004).

**Figura 1.**

*Área de estudio. Ubicación geográfica del Laboratorio costero, Arboletes.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia (2022).



## 5. Metodología

Las mediciones realizadas en el area de estudio, se hicieron mediante tres dispositivos: Dron, GPS diferencial y ecosonda monohaz (ver **Figura 2**), en el marco del proyecto PIMECLA.

**Figura 2.**

*Dron, DGPS y Ecosonda monohaz.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia (2022).

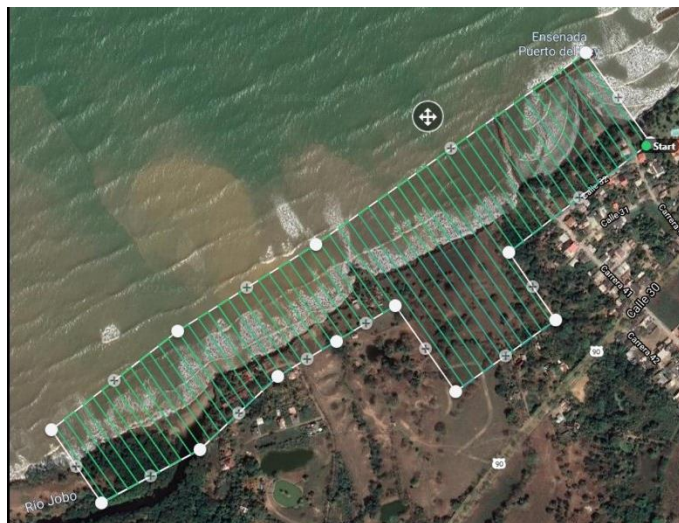
### 5.1. Mediciones con dron

Mediante el uso de la aeronave autónoma (dron) en el marco del proyecto PIMECLA, se realizaron 25 vuelos a 90m de altura, con periodicidad de 15 días, siguiendo el plan de vuelo mostrado en la **Figura 3**.



### Figura 3.

*Plan de vuelo establecido para el lote de erosión costera.*



*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA (2021).

Este plan de vuelo (**Figura 3**) fue diseñado para tener registros fotogrametricos que identifiquen la linea de costa apartir de la desembocadura de rio Hobo, hasta la segunda estructura rigida de protección costera presente el lote del laboratorio costero.

### 5.2.Mediciones con GPS diferencial y Ecosonda

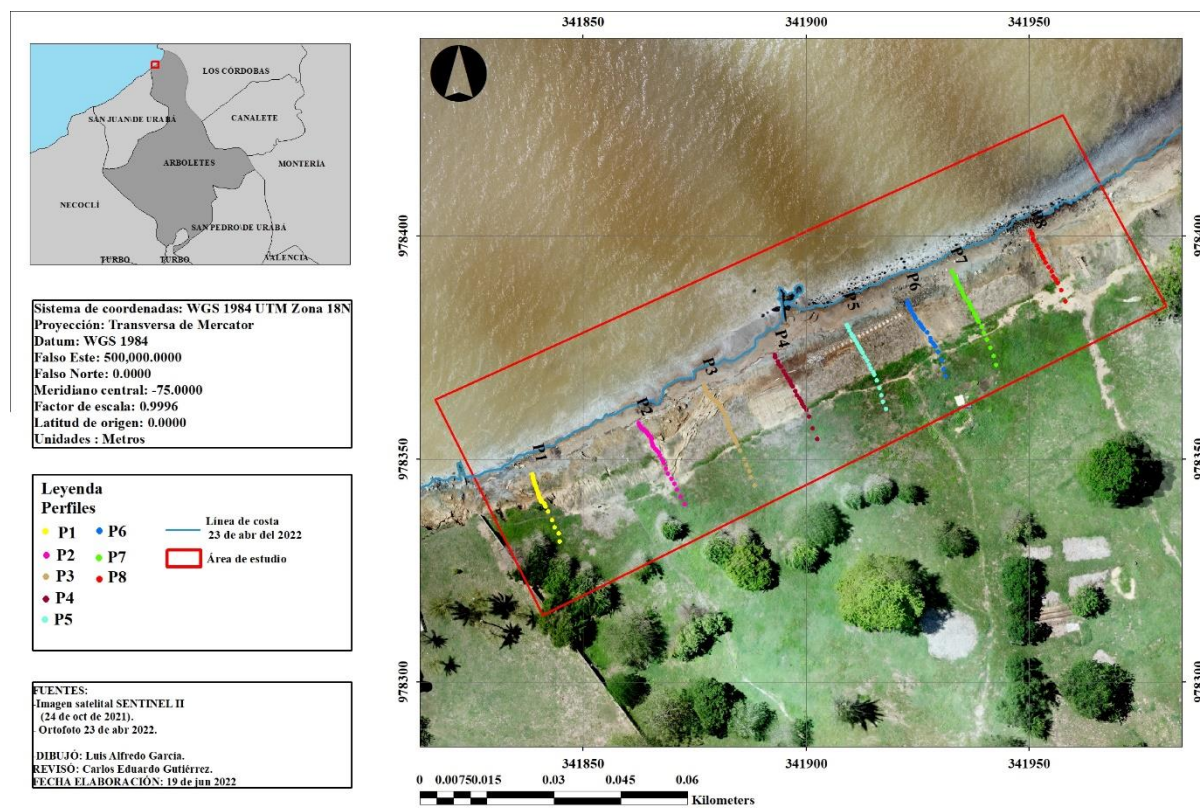
Con el GPS diferencial se monitorearon 10 perfiles sobre el area perfilada del laboratorio costero (**Figura 4**), de los cuales solo se eligieron 8 perfiles para el desarrollo de este trabajo; estos, fueron monitoreados desde el mes de agosto del 2021 hasta el abril del 2022.

Cabe destacar que estos perfiles estan ubicados en 3 zonas diferentes, una zona sin pendiente perfilada (estado natural del talud) en el cual se tienen 2 perfiles, la zona de transición en la cual hay un perfil y la zona que cuenta con 2 pendientes diferentes (  $15^\circ$  y  $35^\circ$ ) que cuenta con cinco perfiles.

A demás, el GPS diferencial se usó para establecer el rumbo de la embarcación y obtener las coordenadas X y Y de los datos obtenidos en los levantamientos batimétricos realizados en el marco del proyecto PIMECLA, pues las líneas hidrográficas necesitan estar georeferenciadas y con dirección de rumbo establecida por un DGPS para poder realizar el levantamiento batimétrico.

**Figura 4.**

*Perfiles de control en el talud.*

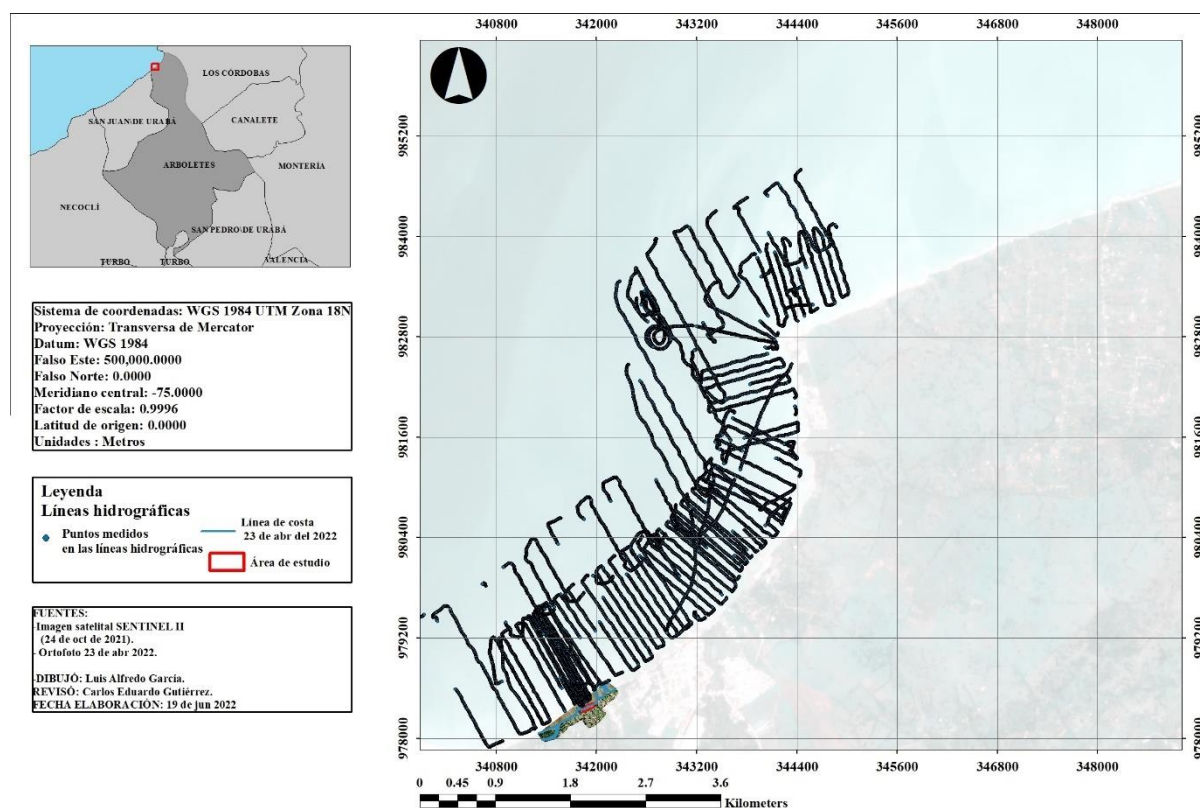


*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA (2022).

La **Figura 4** muestra la distribución espacial de los perfiles de control establecidos en el monitoreo, en el cual se evidencia que solo dos perfiles están en la zona no perfilada, un perfil en la zona de transición y cinco perfiles en la parte perfilada.

**Figura 5.**

*Líneas hidrográficas usadas en el levantamiento batimétrico.*



*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla (2021)

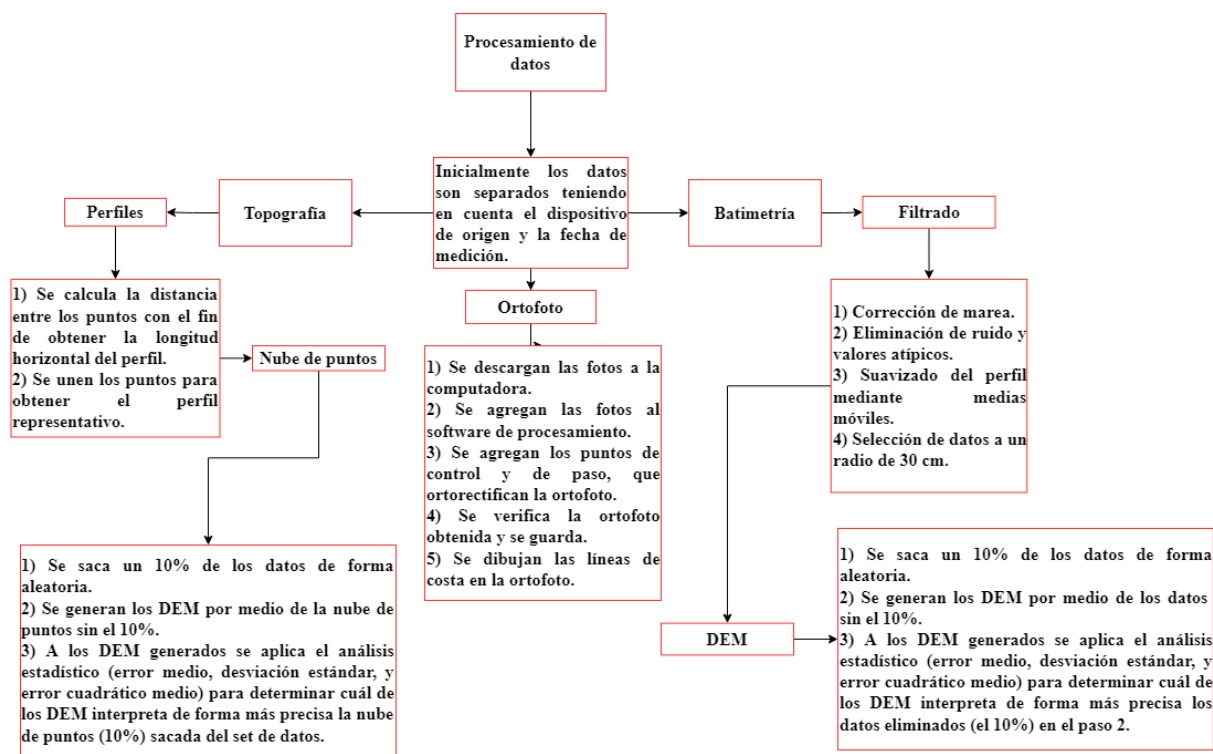
La **Figura 5** muestra las líneas hidrográficas usadas para el levantamiento batimétrico; en donde se tomaron 409595 puntos de elevación, de los cuales se seleccionaron puntos en diámetro de 50 cm, obteniendo un total de 19810 datos para el cálculo de los modelos de elevación digital.

### 5.3. Procesamiento de datos

Los datos medidos a partir del 14 de agosto del 2021 se procesaron teniendo en cuenta los dispositivos y la fecha de medición, adicional mente, la información se analiza y se procesa teniendo en cuenta las limitaciones de los equipos y la cantidad de datos medidos, este proceso se ve de forma general en el diagrama de flujo mostrado en la **Figura 6**.

**Figura 6.**

*Proceso implementado para el procesamiento de los datos.*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia en <https://app.diagrams.net/>

Este diagrama se usó para describir la metodología implementada en el procesamiento de los datos medidos en campo, el cual parte de un punto en común que consiste en la clasificación de los datos a través de su dispositivo de origen y fecha de medición. La **Figura 6** resume toda la metodología de procesamiento implementada en tres ramas (GPS diferencial, Dron y Ecosonda monohaz) en las cuales, para cada una se describe los pasos empleados de la siguiente manera:

### 5.3.1. Perfiles

1. Se calcula la distancia entre el punto de origen hasta el punto final, con el fin de obtener la longitud horizontal de los perfiles.
2. Se grafican los perfiles mediante la distancia obtenida y la altura dada por el DGPS.
3. Se extrae el 10% de los datos de forma aleatoria y se genera el DEM con los datos equivalentes al 90%.

4. Se calcula la desviación estándar, error cuadrático medio y error medio a los DEM generados, con el fin de saber cuál es el modelo que mejor interpreta el 10% de los datos ausentes.

### **5.3.2. Ortofoto**

1. Se descargan las fotos resultantes de los vuelos en el computador de procesamiento fotogramétrico.
2. Se agregan las fotos al programa de fotogrametría para crear el proyecto que exporta la ortofoto.
3. Se agregan los puntos de control y puntos paso que ortorectifican la imagen final.
4. Se verifica la calidad de la ortofoto generada por el set de datos mediante el gráfico de correlación arrojado por el software de fotogrametría.

### **5.3.3. Batimetría**

1. Se realiza la corrección de marea a través de datos sacados de modelos donde son proyectadas las mareas para zonas lejanas del lugar de estudio (Boya DIMAR localizada cerca de Capurganá), y mediante software especializado se realiza la corrección.
2. Se eliminan los valores de ruido y valores no correspondientes a la naturalidad del perfil.
3. Se suaviza el perfil mediante medias móviles con tamaño de paso que puede ser elegido entre 1-64 puntos.
4. Se seleccionan los datos suavizados con un radio de 50cm.
5. Se generan los DEM siguiendo los pasos empleados en el procesamiento de los datos del GPS diferencial.



## **6. Resultados y Análisis**

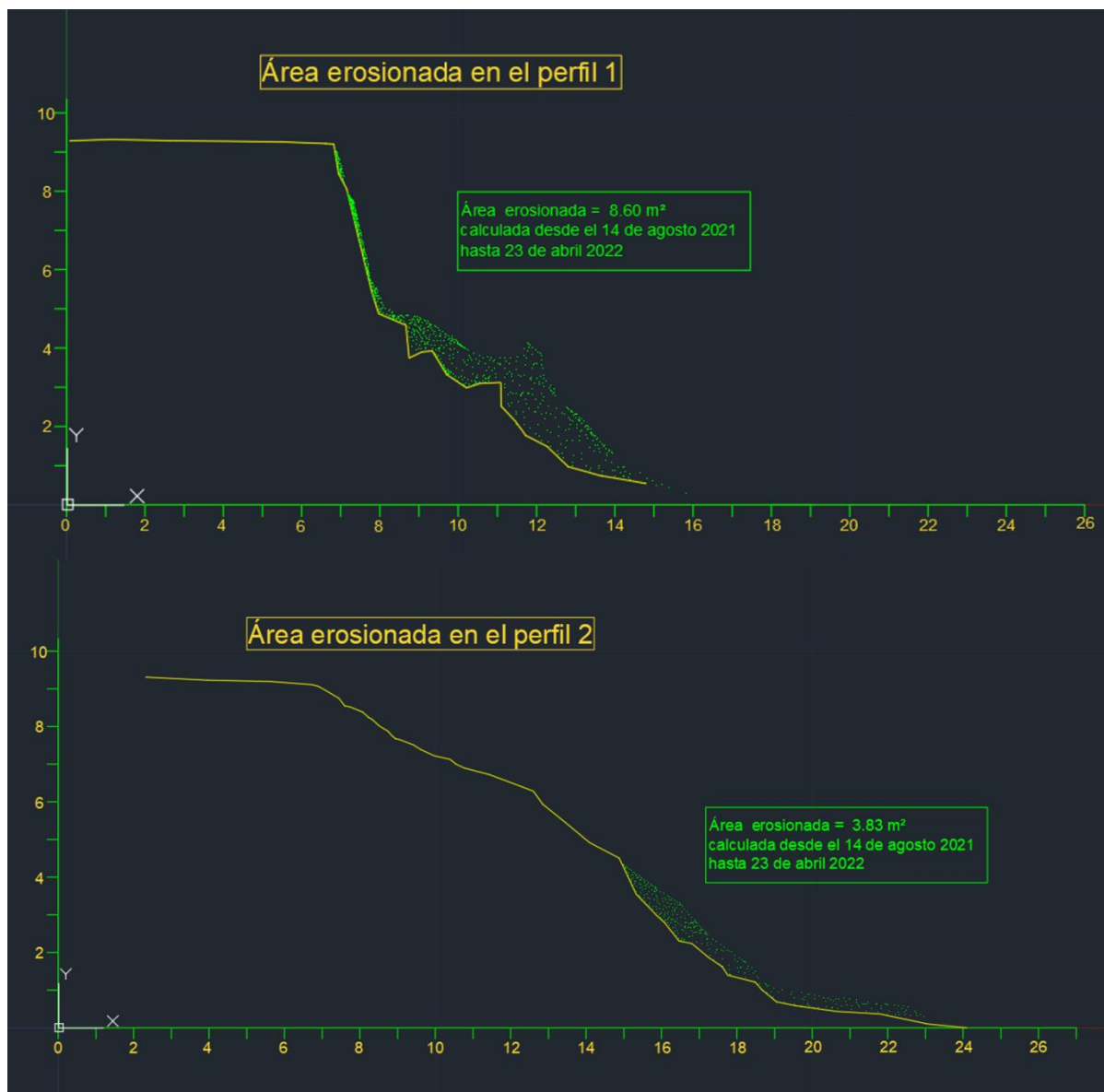
Con respecto a la metodología empleada en la **Figura 6** para el procesamiento de los datos obtenidos en campo desde 14 de agosto del 2021, hasta el 23 de abril del 2022 se obtuvieron resultados clasificados de la siguiente manera:

### **6.1. Perfiles**

A continuación, se muestra los perfiles 1 al 8, en donde se evidencia la evolución de estos durante todo el tiempo de estudio.

**Figura 7.**

*Área transversal erosionada en los perfiles 1 al 2.*

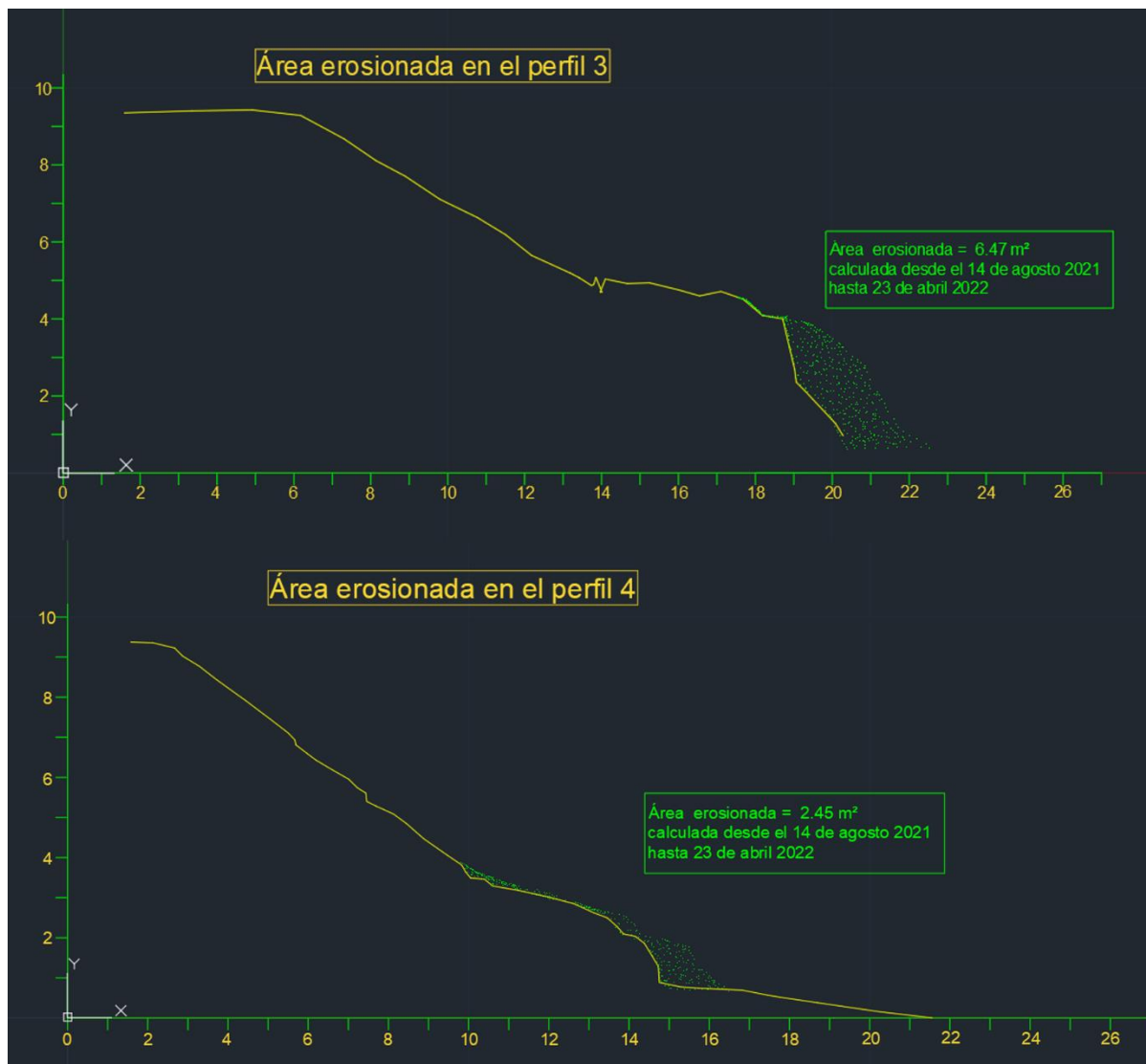


*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 7** muestra el área transversal erosionada en los perfiles 1 y 2; se puede ver en el perfil 1 un área transversal erosionada de  $8.60 \text{ m}^2$  y en el perfil 2 un área transversal erosionada de  $3.83 \text{ m}^2$ . Cabe destacar que el perfil 1 y 2 están ubicados en el escarpe (zona no perfilada), y se observa que la mayor erosión se presenta en el perfil con mayor inclinación.

**Figura 8.**

*Área transversal erosionada en los perfiles 3 y 4.*



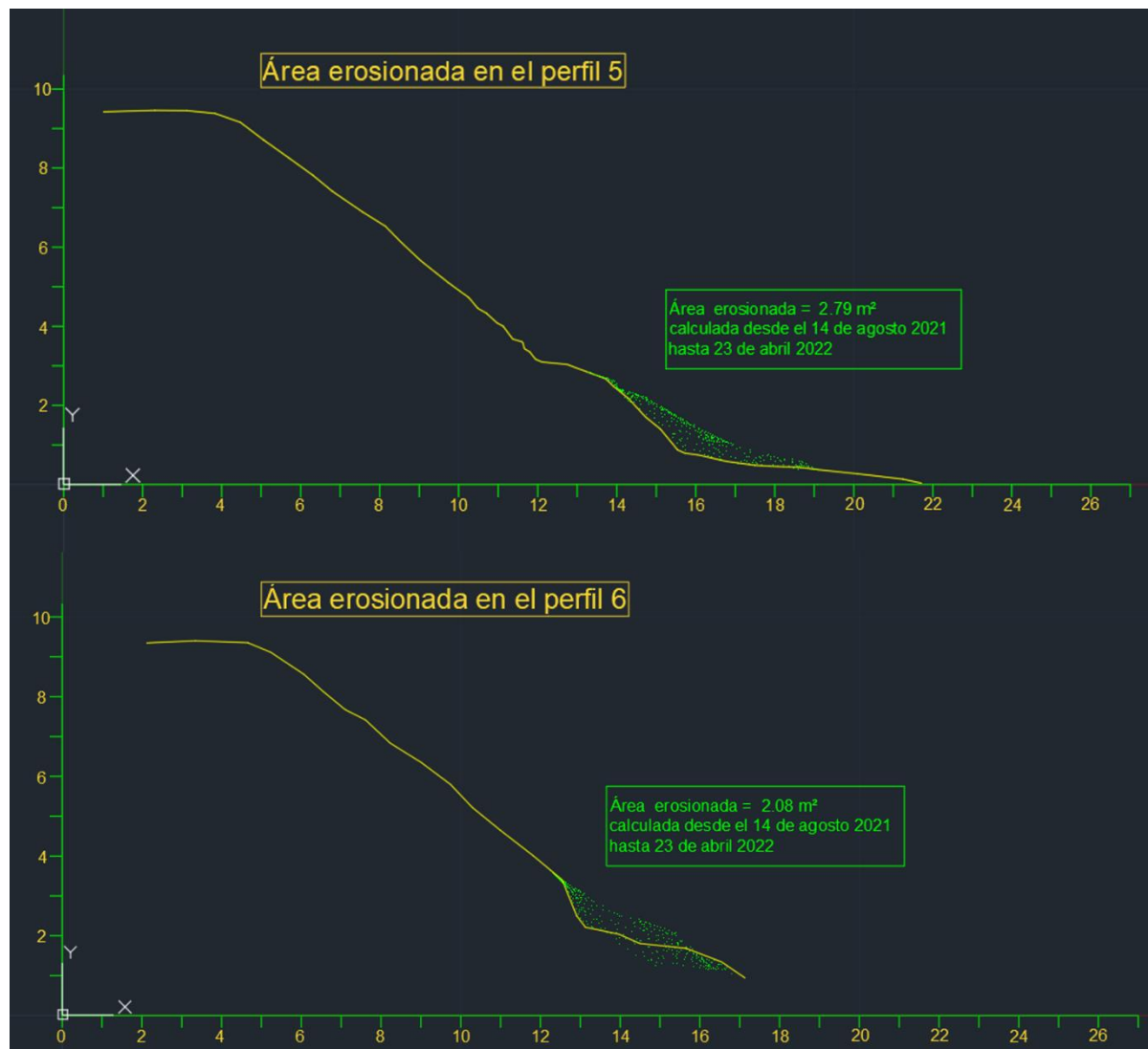
*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 8** muestra el área transversal erosionada en los perfiles 3 y 4; se puede observar que en el perfil 3 la erosión retrocedió la parte baja del perfil unos 3 metros obteniendo un área transversal erosionada de  $6.47 \text{ m}^2$ ; el perfil 4 retrocedió aproximadamente 2.5 metros obteniendo un área transversal erosionada de  $2.45 \text{ m}^2$ . Es importante resaltar que el perfil 3 está ubicado en la zona de transición y la mayor pérdida de sedimentos se presentó en el pie del perfil, zona de mayor inclinación, mientras que en el perfil 4 está ubicado en el talud (zona perfilada) y presentó menor erosión en comparación al perfil 3.



**Figura 9.**

*Área transversal erosionada en los perfiles 5 y 6.*

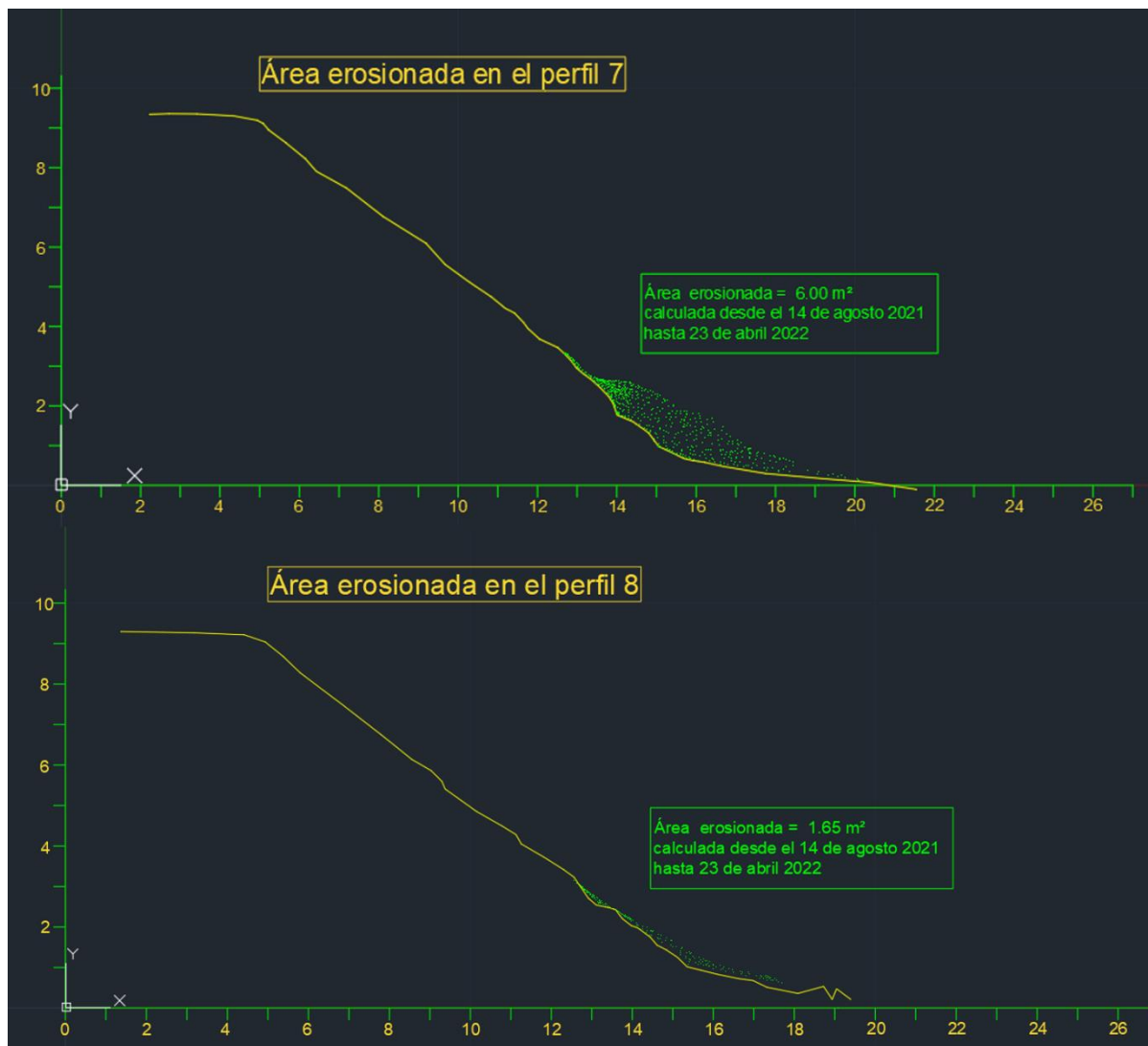


*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 9** muestra el área transversal erosionada en los perfiles 5 y 6; se puede observar que el perfil 5 perdió sedimentos en la parte baja correspondientes un área transversal de  $2.79 \text{ m}^2$ , mientras que el perfil 6 retrocede en la parte baja aproximadamente 5 metros, obteniendo un área transversal erosionada de  $2.08 \text{ m}^2$ . Es importante resaltar que estos dos perfiles están situados en el talud (zona perfilada) y presentaron valores de erosión muy cercanos entre sí; además, es importante aclarar que el perfil 6 fue intervenido con rocas que fueron colocadas en la zona afecta, esto se evidencia en el pie del perfil (a los 14 m), lugar donde se aprecia el cambio de altura.

**Figura 10.**

*Área transversal erosionada en los perfiles 7 y 8.*



*Nota. Fuente: Proyecto Pimecla 2022.*

La **Figura 10** muestra el área transversal erosionada en los perfiles 7 y 8; en esta se observa que el perfil 7 perdió por completo la pendiente de  $15^\circ$ , con un área transversal erosionada equivalente a  $6.00 \text{ m}^2$ ; mientras que el perfil 8, el cual tiene una sola pendiente de  $35^\circ$  perdió un área transversal de  $1.65 \text{ m}^2$ . Es importante resaltar que estos perfiles están cercanos a la quebrada las Dolencias, la cual fluye al mar solo en época húmeda.

Los valores de erosión mostrados en las figuras 7 hasta la 10, son el resultado de la energía del oleaje que incide sobre la zona desprotegida de los perfiles (pie de los perfiles), generando desprendimiento y lavado de los limos y arcillas. Estos valores de erosión se

calcularon para cada fecha de monitoreo como lo muestra la **Tabla 1**, en donde los valores positivos son erosión y los negativos sedimentación.

**Tabla 1.**

*Seguimiento de erosión en los perfiles 1 al 8.*

Erosión en los perfiles en $m^2$								
Fecha	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5	Perfil 6	Perfil 7	Perfil 8
14/08/2021*	-	-	-	-	-	-	-	-
28/08/2021	0.33	0.26	0.67	0.39	0.07	0.11	0.00	0.08
12/09/2021	0.00	0.99	0.13	0.03	0.00	0.01	0.00	0.05
25/09/2021	0.02	0.20	0.05	0.10	0.41	0.14	0.51	0.05
10/10/2021	0.78	0.17	0.75	0.00	-	0.18	0.48	0.48
23/10/2021	0.27	0.00	0.00	0.11	0.00	0.22	0.00	0.39
6/11/2021	0.07	0.03	0.00	0.08	0.01	0.16	0.04	0.04
20/11/2021	0.00	0.00	0.33	0.24	0.03	0.00	0.00	0.00
4/12/2021	0.17	0.00	0.14	0.12	0.03	0.35	0.02	-
29/01/2022	3.56	0.30	2.62	0.24	0.57	1.39	1.57	0.07
10/02/2022	0.00	0.09	0.30	0.00	0.04	0.58	0.19	0.00
26/02/2021	1.59	0.09	0.79	0.37	0.66	0.02	0.76	0.27
12/03/2022	0.41	0.24	0.12	0.40	0.53	0.11	0.10	0.00
26/03/2022	0.53	1.22	0.29	0.08	0.33	0.14	0.02	0.01
09/04/2022	0.65	0.45	0.25	0.25	0.03	-1.46	1.01	0.21
23/04/2022	0.21	-0.21	0.02	0.03	0.07	0.13	1.30	0.00
<b>Total</b>	8.60	3.83	6.47	2.45	2.79	2.08	6.00	1.65

Nota. Fuente: Proyecto PIMECLA 2022.

En esta **Tabla 1** se puede ver que para el 14 de agosto no se calcularon datos de erosión, pues esta fecha fue tomada como base para el cálculo de las demás. Se puede ver que para el mes de enero del año 2022 (**Tabla 1**) la erosión en los perfiles 1, 3, 6 y 7 fue aproximadamente de 3.56, 2.62, 1.39 y 1.57  $m^2$  y al analizar la **Figura 11** se evidencia que en los días 19 al 29 de enero del 2022, la altura de ola significativa ( $H_s$ ) alcanzo valores de 1.63m. En concordancia con la altura de ola significativa y la erosión causada en estos días, se infiere que la acción del

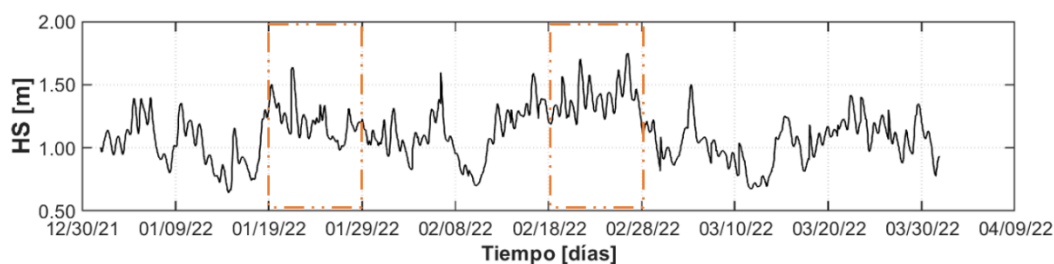
oleaje es un factor que incrementa la erosión en la parte desprotegida los perfiles (pie de los perfiles).

Posteriormente, entre el 10 y 26 de febrero del 2022, el perfil 1 se erosionó  $1.59m^2$ , adicionales a los valores erosionados anteriormente, en efecto, para estas fechas la Hs alcanzo alturas de 1.74m, lo que indica que existe una relación entre la erosión del pie del perfil y la altura de ola significativa.

En efecto para el 10 de febrero, los perfiles indicaron erosiones bajas, como el caso de los perfiles 1, 2, 3 y 4 que indicaron erosión de 0.00, 0.09, 0.3 y 0.00 m<sup>2</sup>; de este modo, el 8 de febrero del 2022 la altura de ola significativa fue aproximadamente de 0.7m, lo que corrobora que si existe relación directa entre la magnitud del oleaje y el incremento o disminución de la erosión en el pie de los perfiles.

### Figura 11.

*Altura de ola significativa (wind waves and swell).*



Nota. Fuente: Datos descargados de Era5 Copernicus 21/04/2022

Los valores de erosión calculados en los perfiles, solo indican la pérdida sedimentos en  $m^2$ , lo que quiere decir, que solo se realizaron cálculos que involucran la altura y longitud del perfil (sección transversal). Por consiguiente, se consideró realizar los cálculos de erosión total en términos de volumen. Para esto, se realizó la resta del modelo de elevación digital correspondientes al mes de agosto del 2021 con el de abril del 2022. A partir de los resultados de la diferencia de los dos modelos, se obtuvo una nube de puntos del talud que indicaba la altura erosionada y/o sedimentada, y esta se multiplicó por el área que representa el tamaño de celda, con el fin de obtener los resultados en metros cúbicos como lo muestra la **Tabla 2**.

**Tabla 2.**

*Variación del volumen de sedimentos en el pie del talud.*

<b>Variación de volumen (<math>m^3</math>) en el pie del talud</b>	
Erosión	Acreción
-451.27	25.54

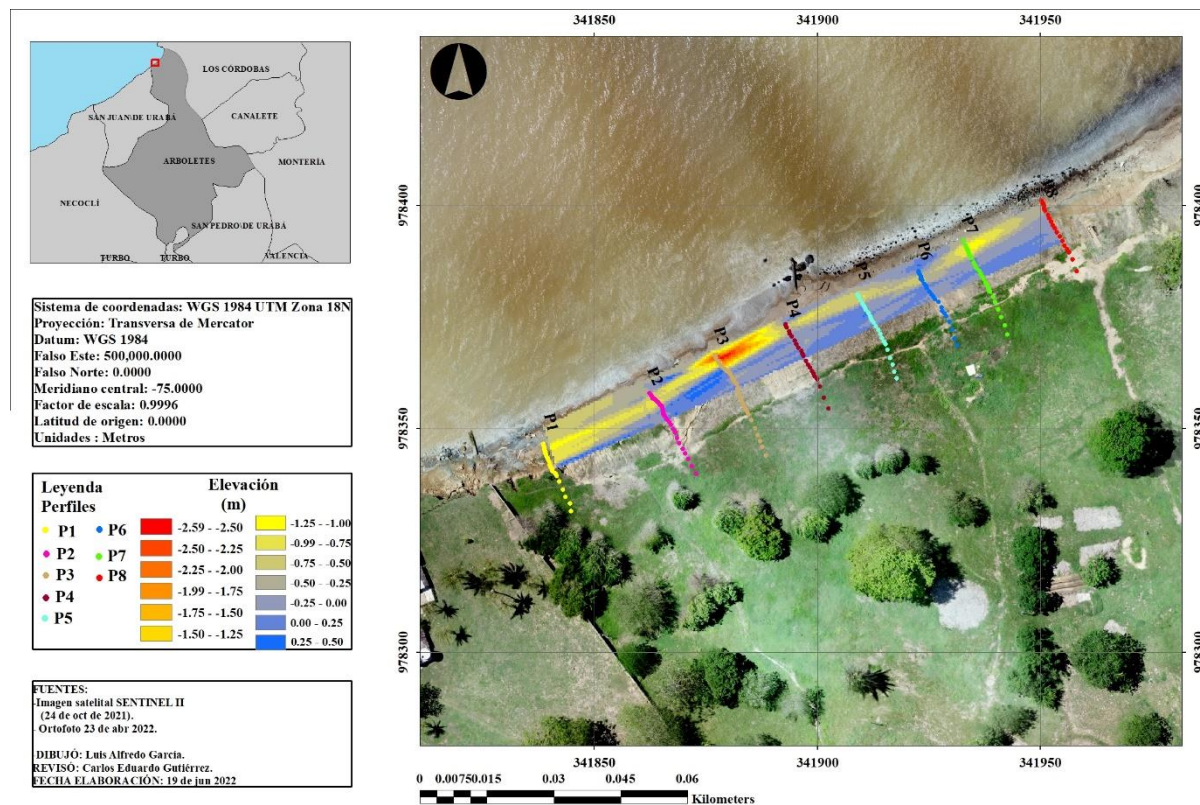
*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2022.

La **Tabla 2** muestra que el volumen erosionado en el pie del talud fue aproximadamente de  $451.27 m^3$ . Este volumen erosionado es una aproximación a grandes rasgos, ya que para el cálculo de este volumen solo se usaron los perfiles de control, lo que hace que el DEM carezca de precisión debido a los pocos perfiles usados. Para tener una mejor estimación del volumen erosionado se necesita realizar mediciones topográficas más representativas del talud.

A demás, se muestra una acumulación de sedimentos equivalente a  $25.54 m^3$ . Este valor corresponde a piedras depositadas en el pie del talud para protección contra el oleaje, y a material suelto de la parte alta del talud.

**Figura 12.**

*Variación alimétrica del pie del talud.*



*Nota.* Fuente proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 12** muestra en la escala de rojo y amarillo la zona del talud erosionada y los perfiles afectados. Se puede observar que la parte baja de los perfiles (pie del perfil) es la zona afectada por la erosión, además se evidencia que el perfil más erosionado es el 3, el cual se localiza en la zona de transición. El azul claro representa variaciones de aproximadamente 4 cm, las cuales no se consideran que representen sedimentación, ya que este valor puede estar relacionado al error del instrumento y de medición. El azul más oscuro presenta variaciones mayores a 4cm y menores o iguales a 48cm, esto hace referencia a las rocas que se usaron para la protección de algunos perfiles, como es el caso del perfil 6 que muestra una zona de color azul oscuro en la parte baja del perfil; este color también representa desprendimiento del terreno del talud que se acumuló en la parte baja del perfil 2. Es importante resaltar que, si existieran más perfiles de control en el talud, estos resultados serían más precisos y confiables.



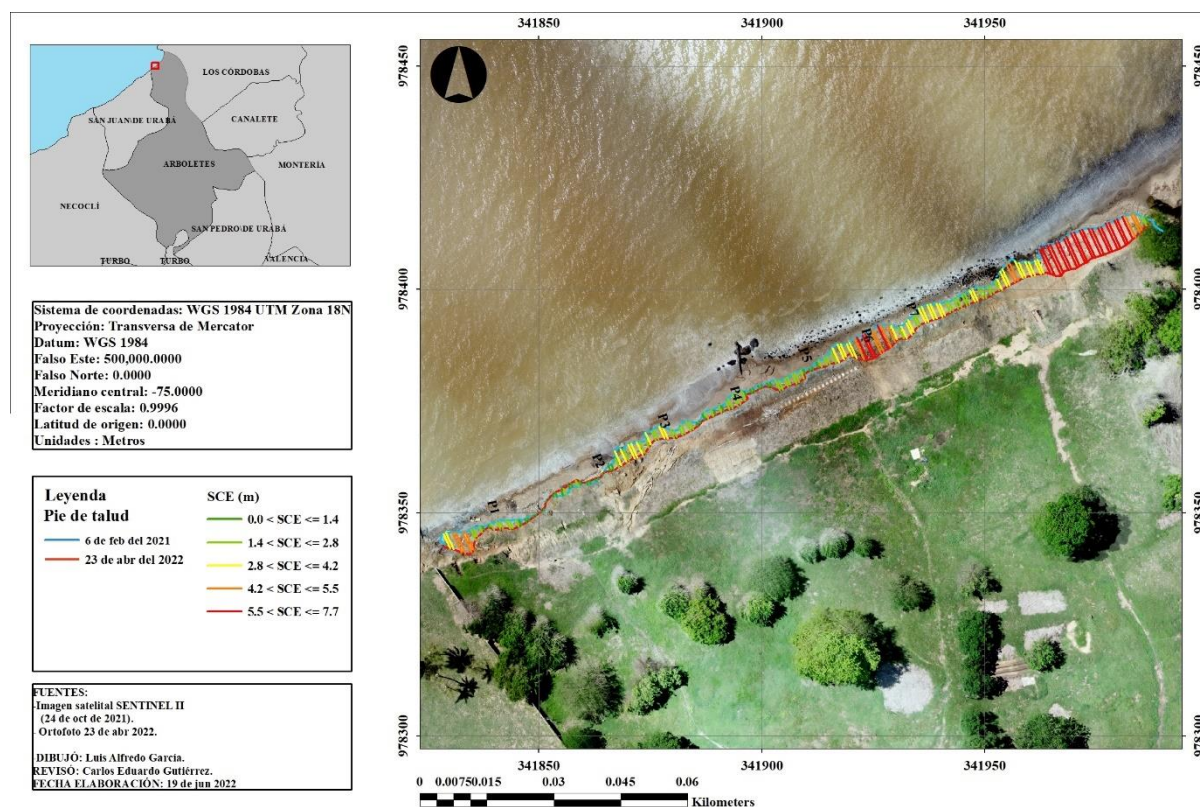
## 6.2. Vuelos de dron

Para hacer seguimiento al comportamiento del talud, se requiere implementar algunos métodos ya establecidos o usados por estudios anteriores enfocados en la misma problemática; como es el caso de (Posada y Buitrago, 2009) que indicaron que los perfiles de playa y análisis de fotografías aéreas e imágenes de satélites son métodos que ayudan al seguimiento de la evolución de estos límites entre continente y océano.

Para la observación de la evolución del talud, se usó el método de “Análisis de fotografías aéreas” empleando un dron, el cual realizó 30 vuelos con el proyecto PIMECLA, sobre el Laboratorio costero de la universidad de Antioquia; con estos vuelos se trazaron por medio de polilíneas el pie del talud y la parte alta del talud y áreas cercanas, obteniendo resultados de retroceso de la parte baja del talud y desprendimiento de material en la parte alta como lo muestran la **Figura 13** a la **Figura 20**.

**Figura 13.**

*Retroceso del pie del talud en el laboratorio desde 6 de febrero 2021 al 23 de abril 2022.*

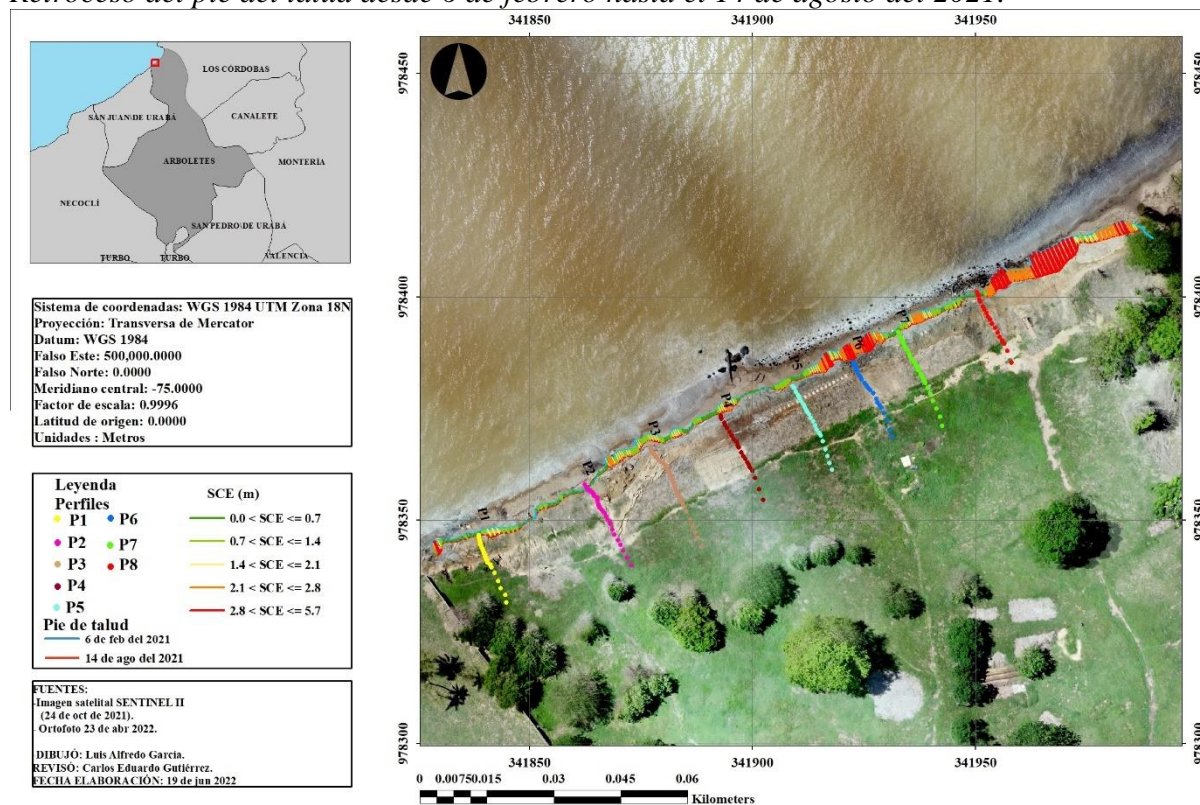


*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 13** muestra el retroceso total que ha tenido el pie desde el 6 de febrero del 2021 (fecha en que se realizó el perfilado) hasta el 23 de abril del 2022; se puede observar que los mayores retrocesos (5.5 hasta 7.7 metros) se dieron cercanos a la desembocadura de la quebrada las Dolencias, zona que inicialmente no habían perfilado.

**Figura 14.**

*Retroceso del pie del talud desde 6 de febrero hasta el 14 de agosto del 2021.*



*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 14** muestra el retroceso en metros que ha tenido el talud desde el 6 de febrero del 2021 hasta el 14 de agosto del mismo año, fecha en la cual se iniciaron los monitoreos de los perfiles. En esta se puede observar que el retroceso está clasificado de la siguiente manera:

- Los desplazamientos mayores que 0.0 m y menores o iguales a 0.7 m son mostrados en color verde oscuro.
- Los desplazamientos mayores a 0.7 m y menores o iguales a 1.4 m son mostrados en color verde claro.
- Los desplazamientos mayores a 1.4 m y menores o iguales a 2.1 m son mostrados en color amarillo.

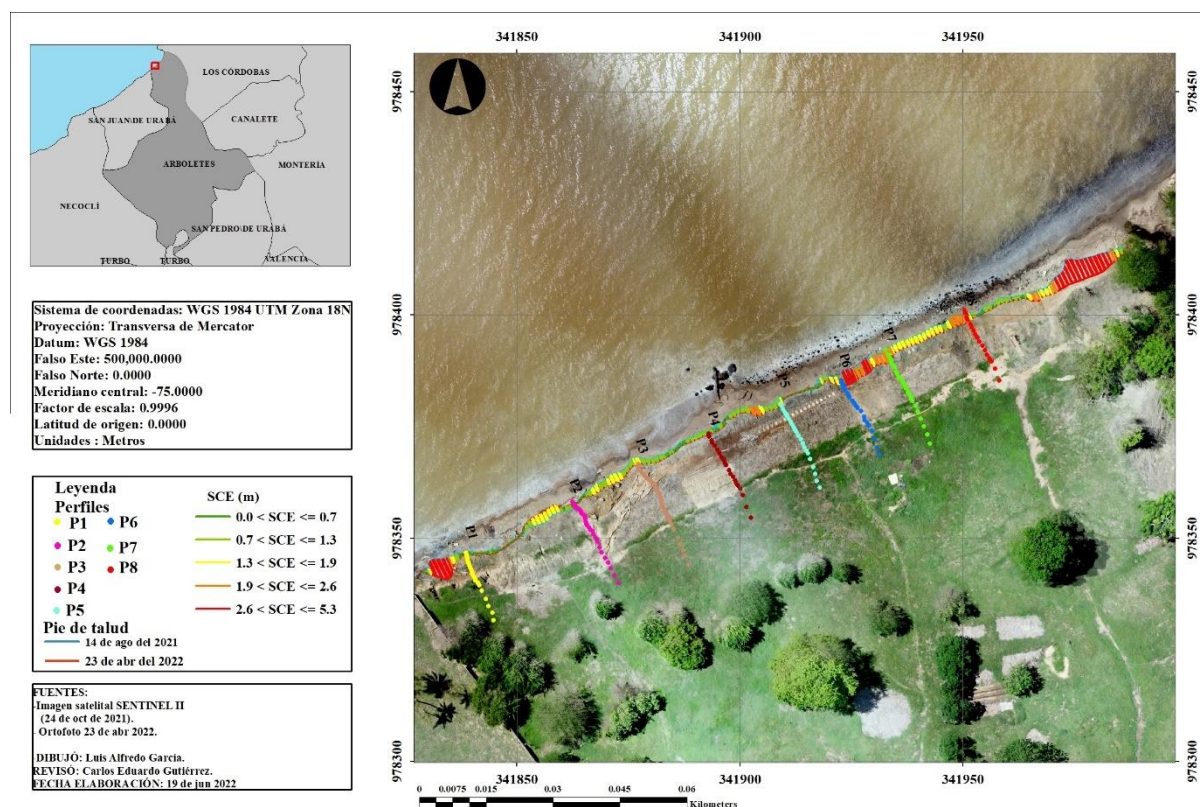


- Los desplazamientos mayores a 2.1 m y menores o iguales a 2.8 metros son mostrados en color naranja.
- Los desplazamientos mayores a 2.8m y menores o iguales 5.7 son mostrados en color rojo.

De acuerdo con esta clasificación se puede observar que el pie del talud había retrocedido entre 0.0m y 5.7 m al momento de iniciar el monitoreo con perfiles. Debido a esto se realizó un nuevo análisis teniendo en cuenta el momento en que inicio y terminó el monitoreo (ver **Figura 15**).

**Figura 15.**

*Desplazamiento del pie del talud desde el 14 de agosto del 2021 al 23 de abril del 2022.*



*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 15** muestra los desplazamientos que ha tenido el talud durante la fecha de monitoreo de los perfiles 1 al 8, en donde se puede observar lo siguiente:

- En el perfil 1, el pie del talud ha retrocedido aproximadamente 0.7m, esto se evidencia en la **Figura 7**, en donde se muestra que el pie del perfil 1 retrocedió la misma magnitud.
- En el perfil 2 se puede observar que el pie del talud avanzó aproximadamente 0.7 metros, debido al deslizamiento del terreno, esto se ve en la **Figura 7**, en donde el perfil 2 almacena en la parte baja el sedimento erosionado en la parte alta.
- En el perfil 3 se observa que el pie del talud retrocedió aproximadamente 1.9m, y en la **Figura 8** muestra que el retroceso del pie del perfil es aproximadamente de 2.2 m.
- En el perfil 4 se observa un retroceso en el pie del talud de aproximadamente 1.3 metros, y en la **Figura 8** se observa que el retroceso del pie de este perfil es aproximadamente de 1.5 m.
- En el perfil 5 se observa que el retroceso del pie del talud es aproximadamente de 1.9 m, y en la **Figura 9** se observa que este perfil retrocedió aproximadamente 3m.
- En el perfil 6 se observa un retroceso en el pie del talud de aproximadamente 2.6m, y en la **Figura 9** se observa que el pie de este perfil retrocedió aproximadamente 2.5m.
- En los perfiles 7 y 8 se observa un retroceso aproximado de 2.6 m, y en la **Figura 10** se observa de forma clara el retroceso del pie del talud, pues estos perfiles se erosionaron de forma constante en la parte baja del perfil.

Debido al retroceso medido en el pie del talud, se consideró importante medir el retroceso o erosión de la parte alta del talud, con el fin de verificar que esta zona se encontrara sin signos de erosión y comparar con otros sectores cercanos a este que no han sido perfilados.

**Figura 16.**

*Retroceso del borde superior del talud.*



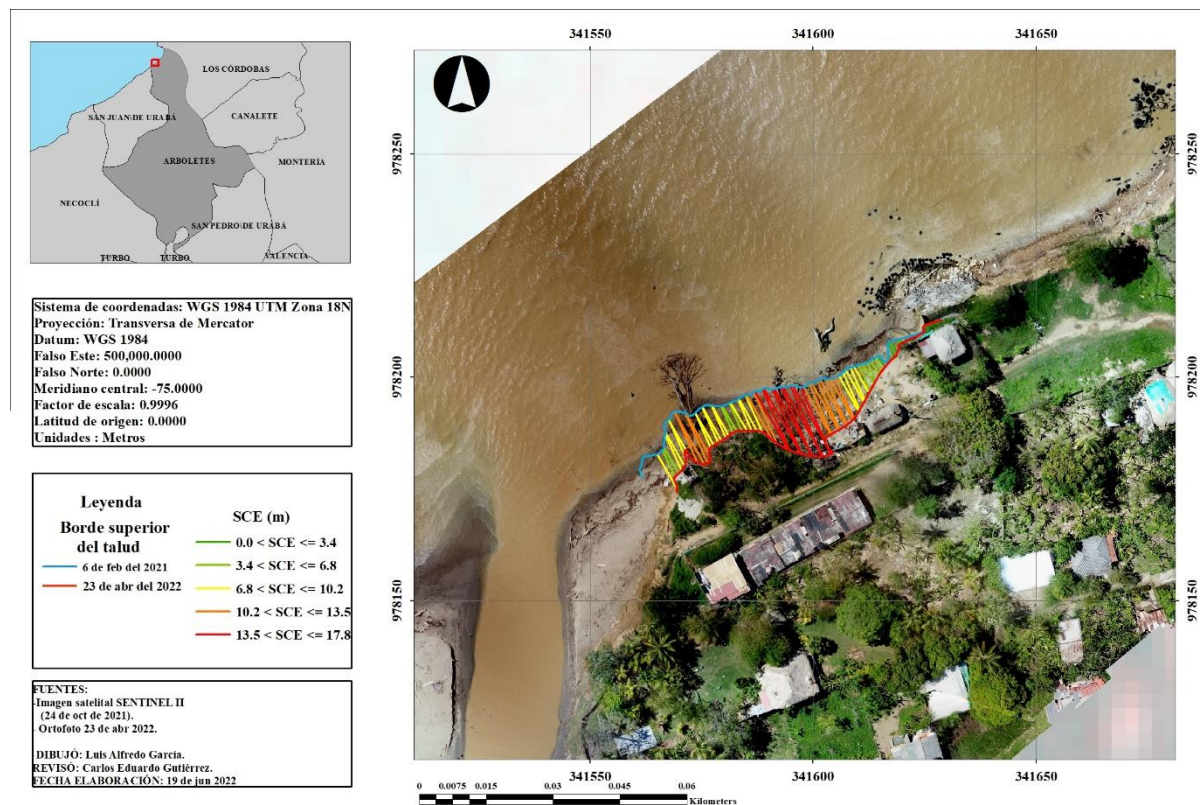
*Nota.* Fuente proyecto Pimecla 2022.

En la **Figura 16** se observa que la parte superior del talud (zona perfilada) se ha conservado desde el 6 de febrero del 2021 hasta el 23 de abril del 2022, lo que indica que al realizar el perfilamiento, se ha evitado que el material ubicado en la parte alta del talud sea desprendido por factores climáticos como son vientos, lluvias, entre otros. Esto no se observa en la **Figura 17** y **Figura 19**, las cuales son zonas vecinas que no se les ha cambiado la inclinación del escarpe.



**Figura 17.**

*Retroceso de la parte superior del escarpe (rio Hobo).*



*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

En la **Figura 17** se puede observar el escarpe cercano al rio hobo, sector vecino del Laboratorio costero; esta zona entre el 6 de febrero del 2021 hasta el 23 de abril del 2022 presentó retrocesos que varía que desde los 3.4 metros hasta los 17.8 metros; es importante resalta que en la zona erosionada había construcciones (viviendas) las cuales se perdieron debido al desprendimiento del escarpe.

**Figura 18.**

*Retroceso de la parte baja del escarpe (rio Hobo).*

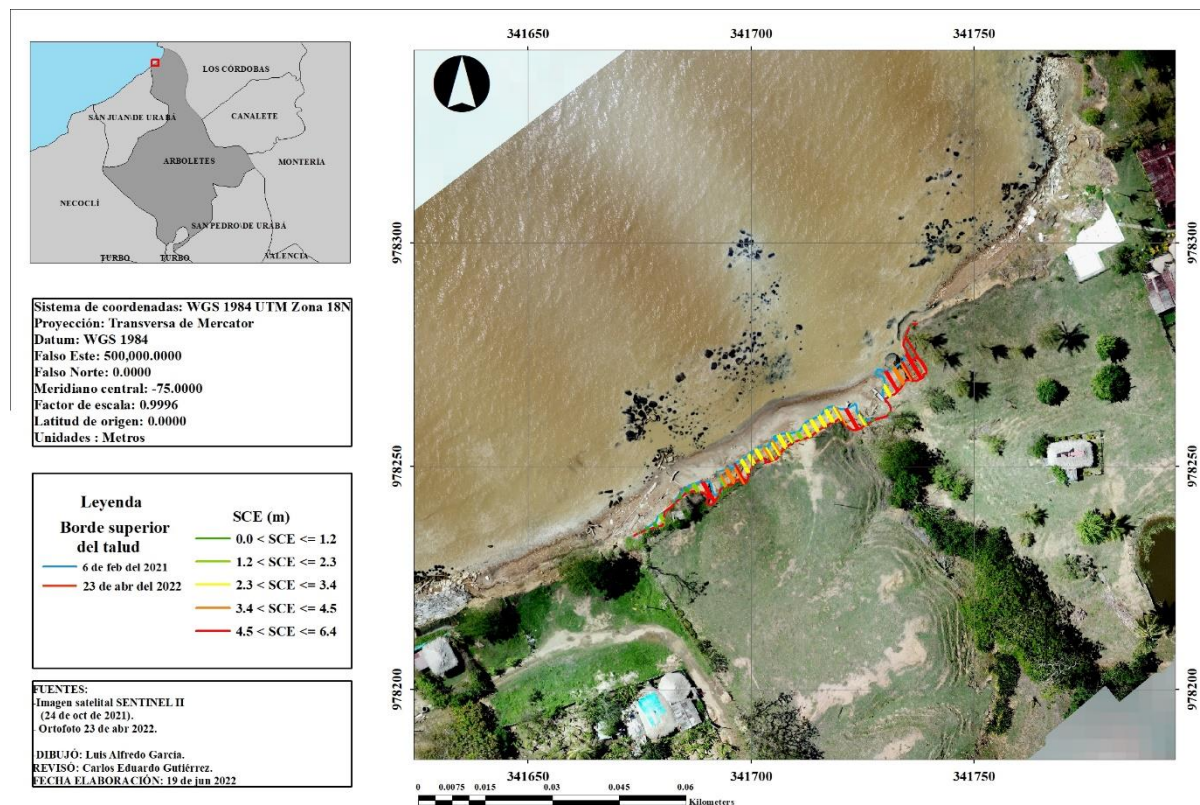


*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 18** muestra que, desde el 6 de febrero del 2021 hasta el 23 de abril del 2022, la parte baja del escarpe ha tenido un retroceso sectorizado (no homogéneo) desde los 1.5m hasta 12.5m. Si comparamos estos retrocesos con los mostrados en la **Figura 13**, se evidencia que el pite del talud del laboratorio ha tenido un comportamiento similar durante estas mismas fechas con valores de retroceso que varían desde los 1.4m hasta 7.7m; esto indica que el talud del laboratorio no está presentando estabilidad en la parte baja (Pie del talud).

**Figura 19.**

*Retroceso de la parte superior del escarpe intermedio entre rio Hobo y el laboratorio.*



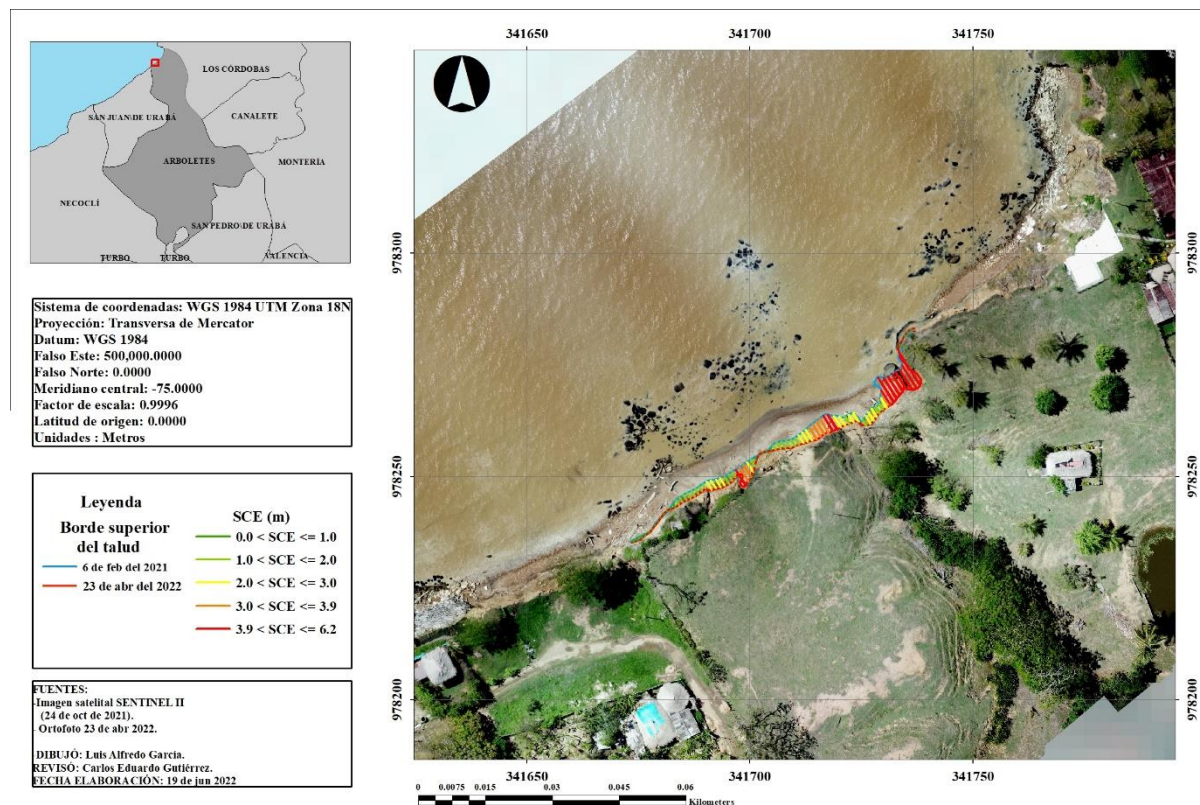
*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 19** muestra que, desde el 6 de febrero del 2021 hasta el 23 de abril del 2022, el escape ubicado en medio de rio Hobo y el laboratorio, presentó en la parte alta retrocesos que varían desde los 1.2 m hasta 6.4 m.



**Figura 20.**

*Retroceso del pie del escarpe intermedio entre rio Hobo y el laboratorio.*



*Nota.* Fuente: Proyecto Pimecla 2022.

La **Figura 20** muestra que, desde el 6 de febrero del 2021 hasta el 23 de abril del 2022, el escape ubicado en medio de rio Hobo y el laboratorio, presentó en el pie del escarpe retrocesos que varían desde los 1.0 m hasta 6.2 m. Al comparar estos resultados con los encontrados en el talud del laboratorio (ver **Figura 14**) se concluye que la parte baja del talud del laboratorio se está retrocediendo al igual que las zonas no perfiladas.

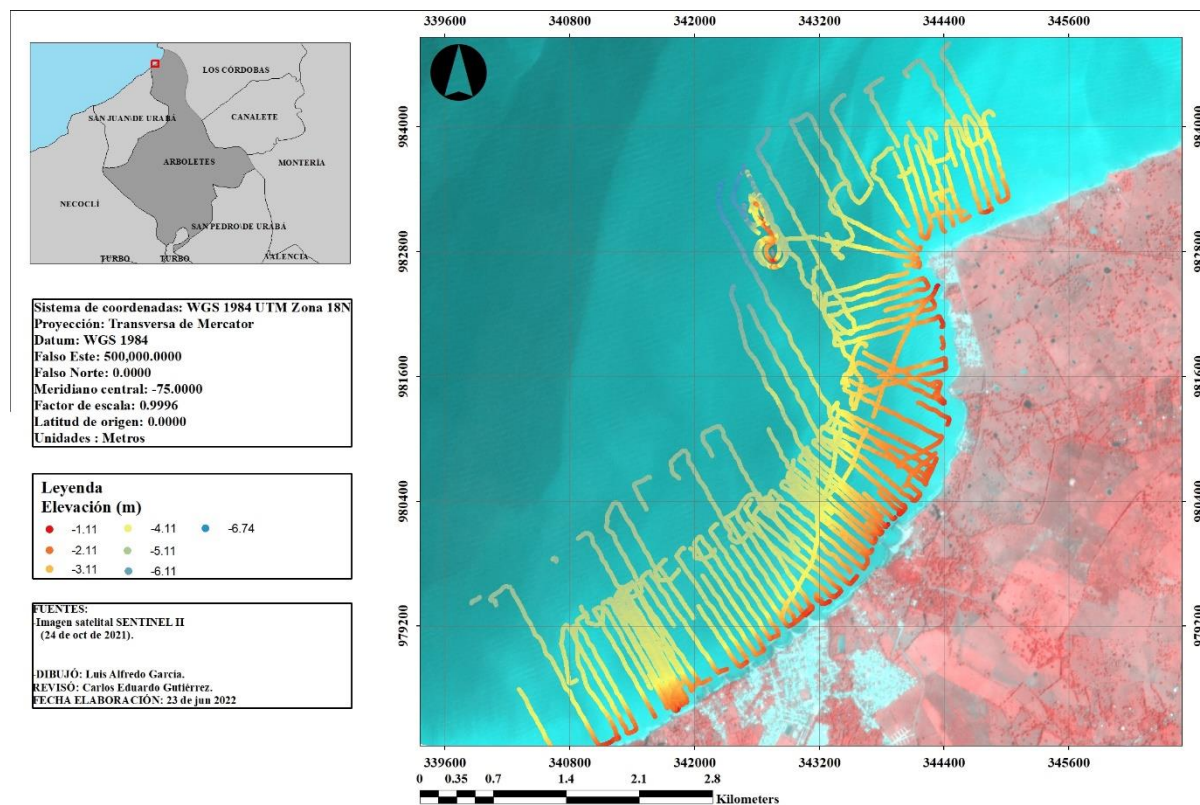
### 6.3. Batimetría

La calidad de los datos batimétricos depende de los dispositivos empleados para los levantamientos. En el proyecto Pimecla, se utilizó un ecosonda monohaz con doble frecuencia (210 y 33 Hz) para la toma de datos batimétricos desde rio Hobo hasta Punta de Rey en Arboletes Antioquia (**Figura 21**); en la cual se midieron 129 líneas hidrográficas separadas cada una a 20m al frente del laboratorio, 50m al frente de los espolones ubicados al lado del

laboratorio, 100m de separación después de los espolones del laboratorio y 200 metros de separación en las líneas ubicadas por río Hobo.

**Figura 21.**

*Levantamiento batimétrico Arboletes (Antioquia).*



*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.

Para la medición batimétrica (**Figura 21**), se calcularon 4 modelos de elevación digital (**Tabla 3**), en donde, el modelo “Natural neighbor” con tamaño de malla de 20m, fue clasificado como el que mejor representó los datos medidos en campo (**Figura 22**).



**Tabla 3.**

*Modelos de elevación digital.*

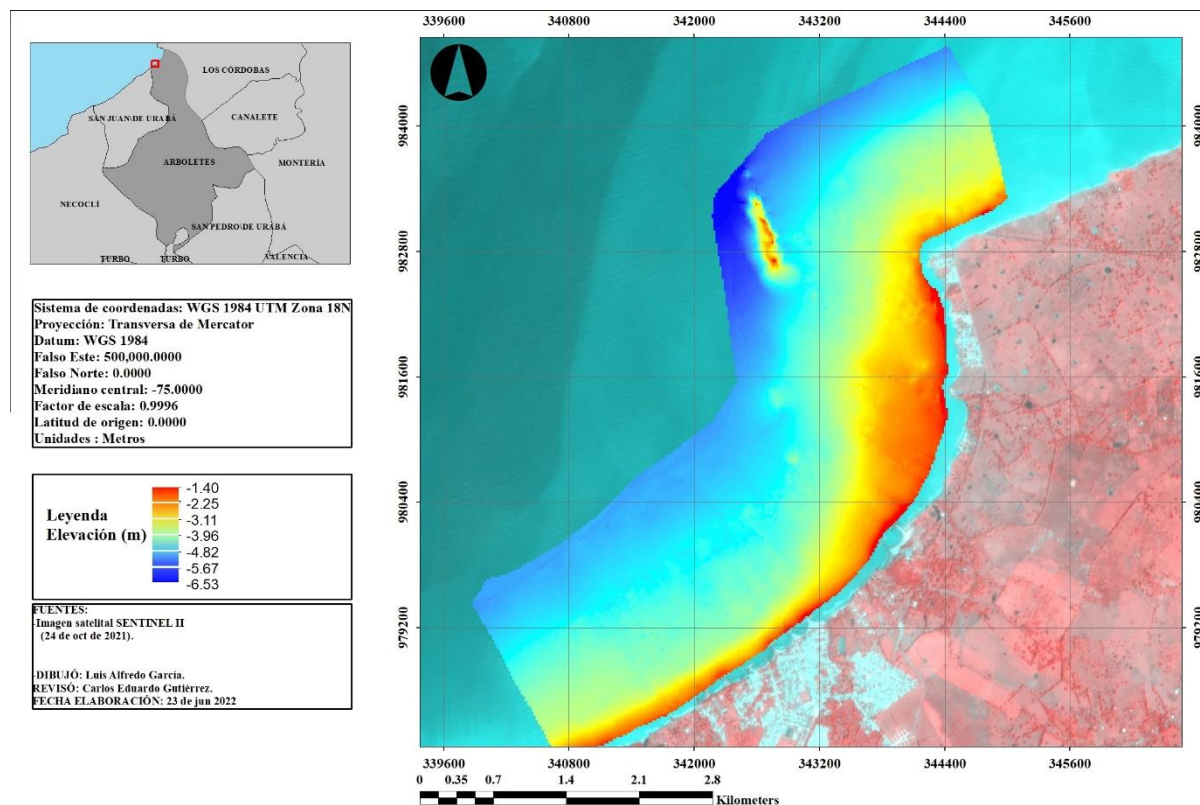
Modelo	Desviación estándar (cm)	Tamaño de celda (m)
Kriging	10.42	20
Natural neighbor	10.20	20
Nearest neighbor	11.57	20
TIN	11.36	20

*Nota. Fuente: Proyecto PIMECLA 2021*

La **Tabla 3** muestra el tamaño de celda usado en los modelos digitales batimétricos y su respectiva desviación estándar.

**Figura 22.**

*DEM modelo Natural Neighbor con tamaño de malla de 20cm.*



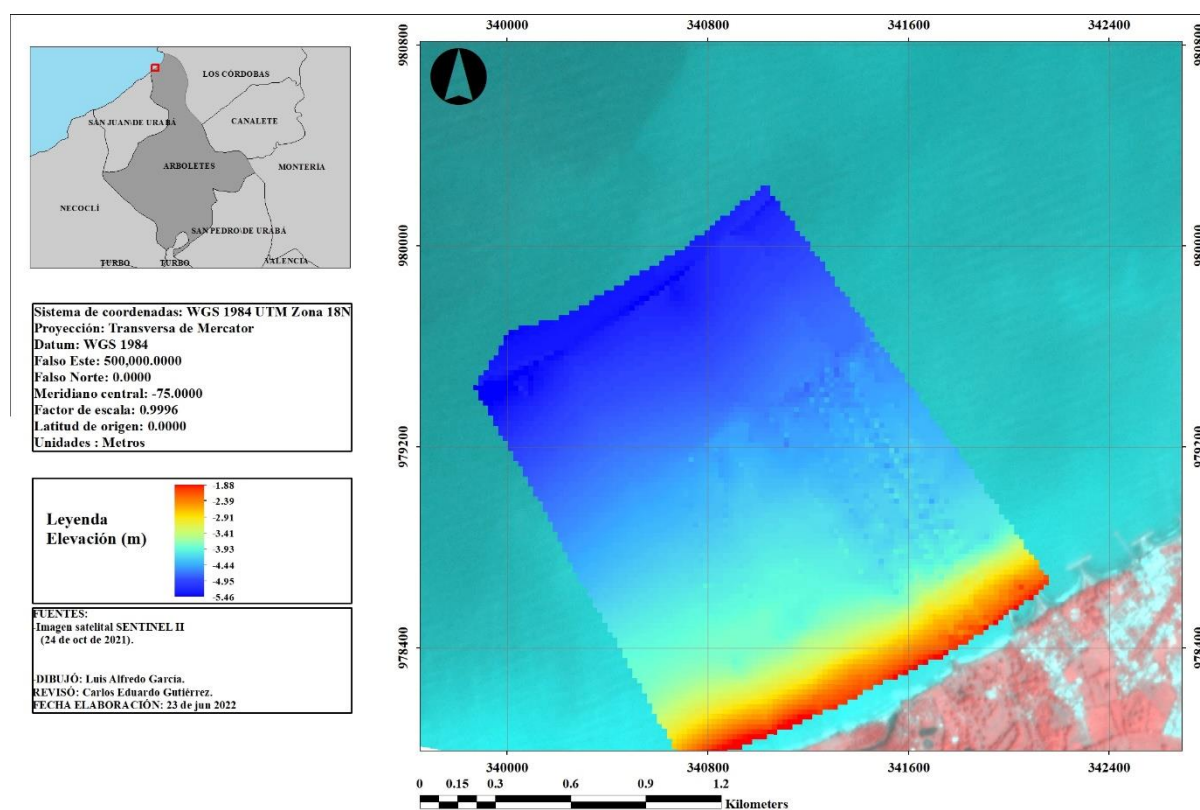
*Nota. Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.*

La **Figura 22** muestra el modelo de elevación digital de agosto del 2021 (Natural Neighbor) con menor desviación estándar y mejor representación gráfica de la realidad; en este se puede observar en colores rojos y amarillos las zonas de menor elevación, y en colores azules los lugares con mayores profundidades.

A este modelo (**Figura 22**) se le recortó el área correspondiente al Laboratorio costero (**Figura 23**), con el propósito de comparar con la batimetría tomada en febrero del 2021 (**Figura 24**) y agosto del mismo año, con el fin de verificar si durante ese tiempo se perdieron o acumularon sedimentos.

**Figura 23.**

*Recorte del modelo Natural neighbor para el área del laboratorio.*



*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.

La **Figura 23** muestra el recorte batimétrico correspondiente al área sumergida del Laboratorio costero, en esta se puede observar en color rojo profundidades que van desde los 1.88m hasta 2.39; en amarillos las profundidades mayores que 2.39m hasta 3.41m, y la escala de azules muestra profundidades mayores a 3.41m hasta 5.46m.

Esta área (**Figura 23**) ya se le había realizado unas mediciones batimétricas en febrero del 2021, a la cual se le calcularon 4 modelos de elevación digital con tamaño de malla de 4m, con las desviaciones estándar mostradas en la **Tabla 4**

**Tabla 4.**

*Modelos de Elevación digital para la batimetría del 14 de febrero del 2021*

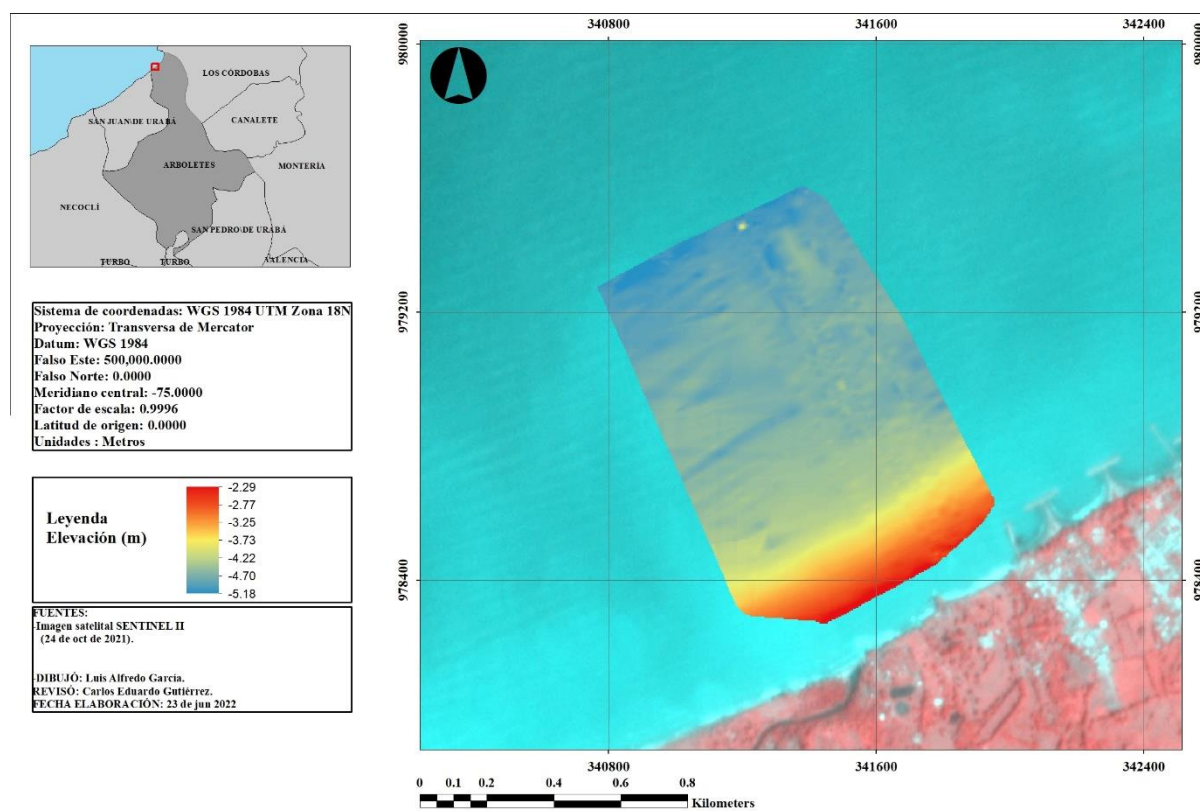
<b>Modelo</b>	<b>Desviación estándar (cm)</b>	<b>Tamaño de celda (m)</b>
Kriging	10.77	4
Natural neighbor	15.87	4
Nearest neighbor	10.63	4
TIN	15.90	4

*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.

De acuerdo a los datos de la **Tabla 4**, el modelo que mejor interpreta los datos medidos en campo fue Kriging (**Figura 24**).

**Figura 24.**

*Batimetría del 14 de febrero 2021.*



*Nota.* Fuente: proyecto PIMECLA 2021.

La **Figura 24** muestra el modelo de elevación digital generado mediante el método de interpolación Kriging, en la cual se observa en escala de rojos los valores de profundidad comprendidos entre 2.29m hasta 3.25m, en escala de amarillo los valores mayores a 3.25m y menores que 4.22m, y la escala de azules los valores mayores a 4.22m hasta 5.18m.

Considerando que los modelos tenían diferentes tamaños de malla (**Tabla 3** y **Tabla 4**), se realizó nuevamente la edición de la batimetría de agosto del 2021, solamente a las líneas correspondientes a la zona del laboratorio, generando 4 modelos de elevación digital con tamaño de malla de 4 m (**Tabla 5**).

**Tabla 5.**

*Modelos de elevación digital para la batimetría de agosto del 2021.*

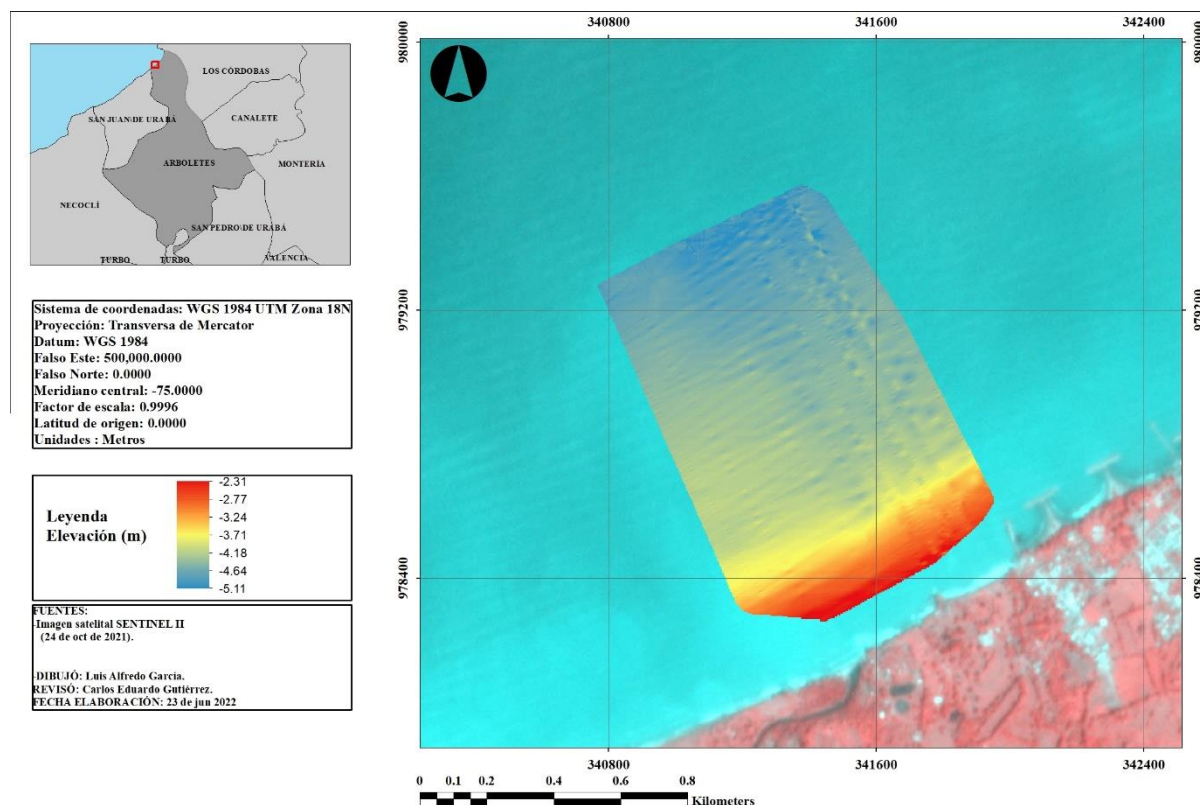
<b>Modelo</b>	<b>Desviación estándar (cm)</b>	<b>Tamaño de celda (m)</b>
Kriging	4.16	4
Natural neighbor	5.13	4
Nearest neighbor	5.52	4
TIN	4.69	4

*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.

Nuevamente, el modelo que mejor interpreta los datos medidos es Kriging y, además, es el que mejor representa la naturalidad del terreno (**Figura 25**).

**Figura 25.**

*Batimetría de agosto del 2021 (malla 4m).*



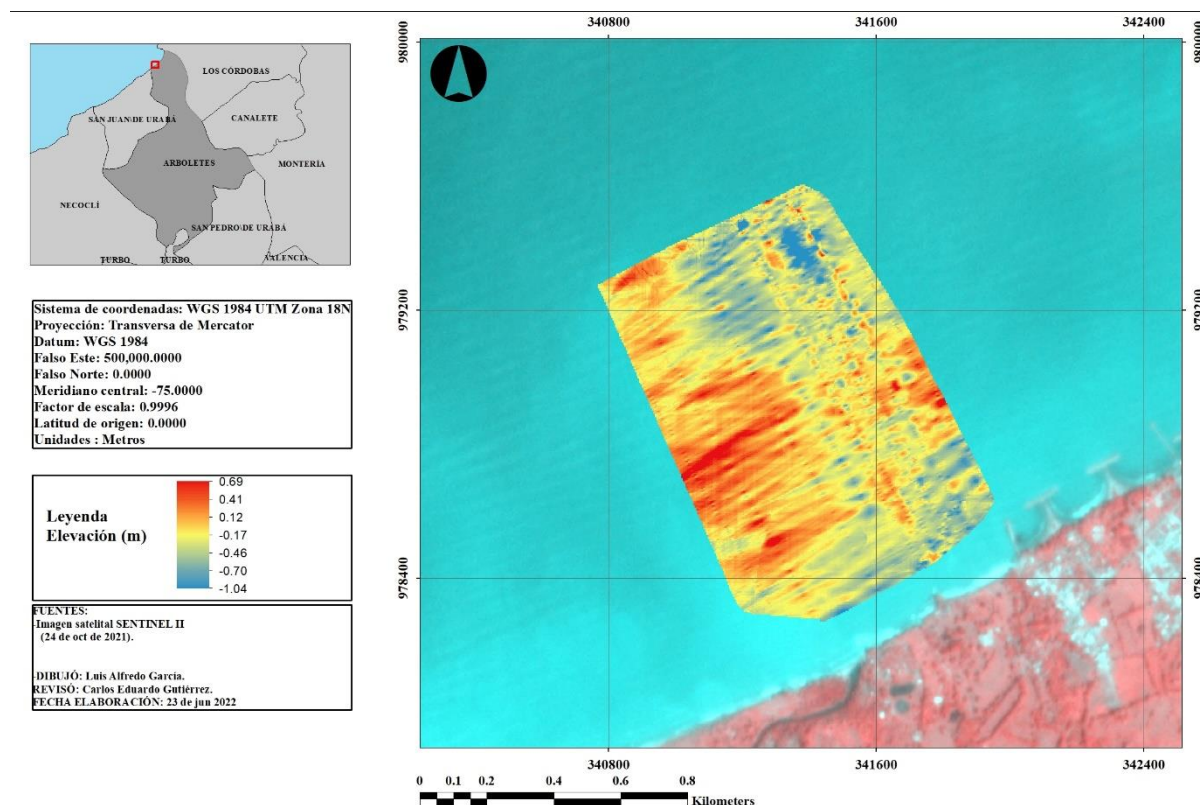
*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.



Al tener dos modelos con iguales tamaños de malla y mismas áreas de interpolación, se realizó la resta de los DEM mediante la calculadora ráster, obteniendo los resultados de acumulación y pérdida de sedimentos en el área de interpolación de las dos batimetrías (**Figura 26**).

**Figura 26.**

*Resultado de la diferencia entre la batimetría de agosto y febrero del 2021.*



*Nota.* Fuente: Proyecto PIMECLA 2021.

Estos dos modelos generaron un resultado con rangos de elevación positivos y negativos, en donde los positivos están en un rango de 0.12 y 0.69 m, y los negativos entre -0.17 y -1.04m; en efecto, para estos rangos encontrados, se puede inferir que los valores positivos hacen referencia a la acumulación de sedimentos y los negativos a la pérdida de estos.

**Tabla 6.**

*Volumen erosionado y sedimentado.*

<b>Modelo</b>	<b>Tamaño de celda (m)</b>	<b>Volumen erosionado (<math>m^3</math>)</b>	<b>Volumen acumulado (<math>m^3</math>)</b>
Kriging	4.00	-2502.68	191064.97

La **Tabla 6** muestra una aproximación del volumen de sedimentos erosionado y sedimentados entre la batimetría de febrero y agosto del 2021, es importante resaltar que estos volúmenes se calcularon con sumas de Riemann. En la **Figura 26** se muestra entre azul las zonas erosionadas y en la (**Tabla 6**) esto corresponde a un volumen de  $2502.68 m^3$  erosionados; mientras que los colores rojo y amarillo corresponden a la acumulación de sedimentos con un volumen de  $191064.97 m^3$ . Al analizar estas diferencias entre magnitudes de erosión y sedimentación, se puede inferir que esta zona presentó mayor sedimentación que erosión entre febrero y agosto del 2021.

## 7. Conclusiones

De acuerdo con el análisis de los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) La cantidad de perfiles topográficos no ayudó a determinar con precisión todo el comportamiento del talud.
- 2) Según las mediciones de los perfiles se concluye que la parte baja de los perfiles fue la zona afectada debido a que no tiene protección contra la incidencia del oleaje.
- 3) El escarpe debe estar totalmente perfilado ya que los perfiles que se encuentran en las zonas de transición presentaron mayor desprendimiento de bloques de material en comparación a los ubicados en zonas perfiladas y no perfiladas.
- 4) Se concluye que la creación del talud ha funcionado para la mitigación del desprendimiento progresivo de la parte alta del escarpe, ya que al comparar las zonas sin perfilamiento se calcularon deslizamientos de la parte alta con magnitudes de hasta 17.8 metros, mientras que en la zona perfilada la parte alta del talud permaneció estable.
- 5) La conformación del talud no ha funcionado para la mitigación del retroceso de la línea de costa (pie del talud), puesto que esta tiene comportamientos iguales en las zonas no perfiladas.
- 6) Teniendo en cuenta que el talud se creó con fin de controlar el retroceso de la línea de costa y el desprendimiento de la parte alta del escarpe, se concluye que esta obra no está funcionando, ya que en el retroceso del pie del talud se desprenden bloques de limos y arcillas que generan inestabilidad, puesto que se produce socavación y se pierden las pendientes realizadas.



## 8. Recomendaciones

De acuerdo con las conclusiones mencionadas se hacen las siguientes recomendaciones:

- 1) Reconstruir la pendiente de 15° con materiales ecológicos ya sea madera, arena y gravas con el fin de proteger los limos y arcillas de la incidencia directa del oleaje.
- 2) Adaptar la pendiente de 15° para la siembra de mangle rojo en época húmeda y crear una trampa de sedimentos que sostenga el terreno para estabilización de las raíces del mangle.
- 3) Colocar los bolsacretos o rocas en el pie del talud para mitigar la energía incidente del oleaje.
- 4) Incrementar la cantidad de perfiles de control en el talud para mejorar el análisis de los datos.
- 5) Diseñar y monitorear algunos perfiles en la zona de río hobo y del lote contiguo al laboratorio que sirvan de control para evidenciar de una mejor manera como se está comportando de forma integral el talud del laboratorio.
- 6) Continuar con el monitoreo con el fin de tener datos representativos de varias épocas y poder tener conclusiones más certeras.
- 7) Realizar trampas de sedimentos en el pie del talud, para comparar los datos in situ con los calculados a partir de los DEM.
- 8) Realizar vuelos específicos para el talud, con el fin de identificar con mayor resolución el pie del talud.

## 9. Bibliografía

- Belmonte Serrato, F., & Ibarra Marinas, A. D. (2017). *Comprendiendo el litoral*. Editum. Ediciones de la Universidad de Muria. <https://doi.org/10.6018/editum.2618>.
- Boak, E.H. y I.L. Turner. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>.
- Caro, H. D. (1984). Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú-San Jacinto en el noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico*, 27(2), 2-29. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol27.2.1984.153>.
- Collazos, O., & Aldiber, J. (2012). *Aplicación de obras de defensa blandas para la protección de la costa catalana*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Catalunya]. Dipòsit de la Recerca de Catalunya.
- 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-INVEMAR*, 33(1), 07-28.
- Dolan, R., Hayden, B.P., May, P., & May, S.K. (1980): The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), pp. 22-29.
- Felicísimo, A. (s.f). *El modelo digital de elevaciones*. A.M. Felicísimo Recuperado de: [https://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema\\_2.pdf](https://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_2.pdf).
- Fonseca, A. (2009). *Beach profiling instructions*. Department of Sustainable Development. Recuperado de <http://www.oas.org/dsd/WHMSI/English/Workshops/WWF2009/WWF.htm>
- Gobernación de Antioquia (DAGRAN) y Universidad de Antioquia. (2022a). Componente de Topografía (Informe final). *Programa integral para el monitoreo y mitigación de la erosión costera en el litoral antioqueño*.
- Hattersley, R.T., Foster D.N. (1968). Problems of beach erosion and some solutions. *Australian Civil Engineering*. 9.
- Hilario Tacca, Q. (2015). *Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNA-PUNO.
- Hinrichsen, D. (1999). *Coastal waters of the world: trends, threats, and strategies*. Island Press.
- Jaramillo-Morilla, A. (2008). *tema 2 arcillas y limos plásticos* (p.13).
- Masselink, G. y Hughes, M. G. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Routledge, 354 pp. <https://doi.org/10.4324/9780203785461>.
- Medina, R., Losada, I. J., Losada, M. Á., & Vidal, C. (1995). *Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica*. *Ingeniería del agua*, 2(1\_Extraordinario), 133-142. <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2668>.

- Merlotto, A., & Bértola, G. R. (2007). Consecuencias socio-económicas asociadas a la erosión costera en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, (43),143-160. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.08>.
- Perez-Alberti, A., Pirés A., Freitas, L., Chamine, H. (2013). Shoreline change mapping along the coast of Galicia, Spain. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* 166 (3): 125-144.
- Posada, B. O., & Buitrago, N. R. (2009). Metodología para el levantamiento de perfiles de playa: En Alcántara Carrió J., Correa Arango I.D., Isla de Medy F.I., Alvarado Ortega M., Klein A.H.F., Cabrera Hernández A. y Sandoval Barlow R. (Eds.). *Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral*. (pp.55-63) Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Rangel Buitrago, N., Anfuso, G., & Correa, I. (2012). 2.56. *Obras de defensa costeras en el caribe colombiano ¿solución o problema?* I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales.
- Schneider, W., Fuenzalida, R., & Garcés, J. (2004). Corrientes marinas y masas de agua. En C. Werliger (Ed.), *Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y Proceso*.
- Serta, J., Aguilar Herrando, J., Esteban, V., & Medina, J. R. (1994). La cuantificación del error de las batimetrías en el seguimiento de playas. *Ingeniería del agua*. 1(3), 7-18. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2640>.
- Torres Córdoba, J. G. (2021). *Análisis comparativo de métodos de medición de perfiles de playas en función de criterios técnicos, operativos y económicos*. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia.
- Vargas-T, V. H., Uribe-P, E., Ríos-R, C. A., & Castellanos-A, O. M. (2016). Geformas costeras causadas por depositación y erosión a lo largo de la línea costera entre Punta Brava y Punta Betin, Santa Marta, Caribe Colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*,40(157), 664-683.
- Villareal Moncayo, J. V. (2015). *Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Loja]. Repositorio institucional UTPL.