



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**MONITOREO DE LÍNEA DE COSTA MEDIANTE  
EL EMPLEO DE UAVs EN EL SECTOR PUNTA  
ROJAS - TURBO DURANTE EL SEGUNDO  
SEMESTRE DEL AÑO 2019**

Autor

Jairo Andrés Rojas Vargas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Turbo – Antioquia

2021



**Monitoreo de Línea de Costa Mediante el Empleo de UAVs en el Sector Punta Rojas  
- Turbo Durante el Segundo Semestre del Año 2019**

Jairo Andrés Rojas Vargas

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Oceanográfico

Asesor:

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Oceanográfica

Turbo – Antioquia

2021

<b>Cita</b>	(Rojas Vargas, 2021)
<b>Referencia</b>	Rojas Vargas, J. A. (2021). <i>Monitoreo de Línea de Costa Mediante el Empleo de UAVs en el Sector Punta Rojas - Turbo Durante el Segundo Semestre del Año 2019 [Trabajo de grado profesional]</i> . Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



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:** Jhon Jairo Arboleda Céspedes.

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

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.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios y a mi Familia por su amor, por siempre creer en mí y brindarme su apoyo incondicionalmente. Las palabras no son suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

Gracias a todos mis profesores por haber dedicado de su tiempo para mi formación. A mi asesor Carlos Gutiérrez por su paciencia y brindarme desinteresadamente sus conocimientos.

A todos mis compañeros los cuales fueron parte de este proceso académico, de los cuales aprendí y me ayudaron a crecer como persona y como profesional.

A aquellas personas que de alguna manera atribuyeron algo para este trabajo, en especial a Juan Diego Rojas, Juan David Ruiz, Stefanía Grisales, Jader Osorio y Cristian Hincapié quienes me apoyaron con labores de campo y siempre estuvieron pendientes al proceso.

## Resumen

En el presente estudio, se hizo uso de UAVs para el monitoreo de la línea de costa en una nueva espiga del sector Punta Yarumal-Turbo. Se llevaron a cabo seis campañas de vuelo sobre el sitio, cubriendo alrededor de 17,91 Ha. Cada vuelo se realizó a diferentes alturas, obteniendo un GSD promedio de 2,55 cm. Para la georreferenciación se ubicaron tres puntos de control, cuyo levantamiento se realizó con un GNSS GPS, logrando errores horizontales y verticales de 0,0115 y 0,0160 metros, respectivamente. La ortoimágenes realizadas en el software Pix4D se usaron para digitalizar la línea de costa en cada una, estas a su vez se ingresaron en la herramienta DSAS para la obtención de los estadísticos LRR (Linear Regression Rate) y NSM (Net Shoreline Movement). La tendencia de la espiga es de crecimiento hacia el Sur, presentando ésta un comportamiento cíclico, asociado a las dos épocas del año (húmeda y seca). Durante la época húmeda los sedimentos son transportados hacía el Norte por la deriva litoral asociada a los vientos del Sur, perdiendo longitud la espiga. Mientras que en época seca, con una deriva litoral en dirección Norte-Sur, la cual es intensificada por los vientos alisios del Norte, se genera un aporte superior a la espiga. Se encontró durante el periodo de estudio (época húmeda) tasas de retroceso de hasta -11,1 metros por mes, en el extremo sur de la espiga y un desplazamiento neto de la línea de costa de -42,7 metros durante el periodo de estudio.

***Palabras claves:*** espiga, línea de costa, deriva litoral, UAVs, ortofoto, fotogrametría.

### Abstract

In the present study, UAVs were used to monitor the coastline in a new spit in the Punta Yarumal-Turbo sector. Six flight campaigns were carried out over the site, covering around 17.91 Ha. Each flight was carried out at different heights, obtaining an average GSD of 2.55 cm. For georeferencing, three control points were located, which were surveyed with a GNSS GPS, achieving horizontal and vertical errors of 0.0115 and 0.0160 meters, respectively. The orthoimages made in the Pix4D software were used to digitize the coastline in each one, these in turn were entered into the DSAS tool to obtain the statistics LRR (Linear Regression Rate) and NSM (Net Shoreline Movement). The tendency of the spit is to grow towards the South, presenting a cyclical behavior, associated with the two seasons of the year (wet and dry). During the wet season the sediments are transported to the north by the coastal drift associated with the south winds, the spit losing length. While in the dry season, with a littoral drift in a North-South direction, which is intensified by the trade winds from the North, a higher contribution to the spit is generated. During the study period (wet season), retreat rates of up to -11,1 meters per month were found at the southern end of the spit and a net displacement of the coastline of -42,7 meters during the study period.

**Keywords:** *spit, coast line, littoral drift, UAVs, orthophoto, photogrammetry.*

## Tabla de Contenido

1	Introducción.....	10
2	Objetivos.....	13
2.1	Objetivo General .....	13
2.2	Objetivos Específicos .....	13
3	Marco Teórico .....	14
4	Metodología.....	20
4.1	Área de Estudio .....	20
4.2	Recopilación de Información Secundaria .....	21
4.2.1	Imágenes Satelitales .....	21
4.2.2	Caracterización del entorno .....	22
4.3	Fase de Campo .....	22
4.3.1	Levantamiento de imágenes .....	22
4.3.2	Ubicación y Levantamiento de Puntos de Control Terrestre.....	23
4.4	Fase de Procesamiento .....	23
4.4.1	Proceso fotogramétrico.....	24
4.4.2	Digitalización de la línea de costa .....	25
4.4.3	Análisis Estadístico.....	25
5	Resultados y Análisis.....	27
5.1	Ortofotos de la espiga “Punta Rojas”.....	27
5.2	Geomorfología de la espiga “Punta Rojas”.....	29
5.3	Evolución de la Línea de Costa.....	31
5.3.1	Aparición de la espiga “Punta Rojas”.....	31

5.3.2	Dinámica de la línea de costa .....	33
5.3.2.1	Época húmeda .....	34
5.3.2.2	Época seca .....	34
5.3.2.3	Eventualidad ENSO .....	36
5.4	Líneas de costa .....	36
6	Conclusiones.....	40
7	Referencias Bibliográficas.....	41
ANEXO 1.	Ortofotos .....	42
ANEXO 2.	Resultados DSAS.....	49

## Tabla de Figuras

<b>Figura 1.</b> Representación de fotogrametría.....	16
<b>Figura 2.</b> A) Esquema de plan de vuelo B) Representación gráfica de traslape.....	17
<b>Figura 3.</b> Representación gráfica de elementos vectoriales usados por DSAS .....	19
<b>Figura 4.</b> Representación estadístico LRR.....	19
<b>Figura 5.</b> Área de estudio.....	20
<b>Figura 6.</b> Plan de vuelo realizado en el programa DroneDeploy.....	22
<b>Figura 7.</b> Punto de control terrestre .....	24
<b>Figura 8.</b> Software Pix4D .....	24
<b>Figura 9.</b> Digitalización de la línea de costa metodo HWL.....	25
<b>Figura 10.</b> Elementos vectoriales de DSAS para el estudio estadístico de Punta Rojas..	26
<b>Figura 11.</b> Mosaico de ortofotos .....	28
<b>Figura 12.</b> Unidades Geomorfológicas de la espiga "Punta Rojas".....	30
<b>Figura 13.</b> Mosaico de imágenes 2010-2016.....	32
<b>Figura 14.</b> Mosaico de retroceso y avance de línea de costa entre 2017 y 2018 .....	35
<b>Figura 15.</b> Líneas de costa digitalizadas .....	37
<b>Figura 16.</b> Elementos vectoriales de DSAS usados en Punta Rojas.....	37
<b>Figura 17.</b> Estadístico LRR.....	38

## Tabla de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Sobrevuelos realizados.....	23
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones ortofotos. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Coordenadas de los puntos de control terrestre .....	29
<b>Tabla 4.</b> Eventos ENSO .....	31
<b>Tabla 5.</b> Factores forzantes en la dinámica de Punta Rojas .....	33

## 1 Introducción

Las zonas costeras se caracterizan por ser ambientes que están sujetos a constantes cambios en su morfología debido al incesante impacto de olas, vientos, corrientes, eventos climáticos, cambios en el nivel medio del mar y efectos antrópicos (King et al, 2017). Estos cambios pueden ser evidenciados a largo plazo, generados regularmente por el aporte de sedimentos de ríos, variaciones relativas del nivel del mar, intercambio de sedimentos entre el perfil activo de la playa y la parte más interna de la plataforma e intercambio de sedimentos con la playa emergida; a medio plazo, siendo el principal agente el oleaje; cambios a corto plazo, experimentados en la zona de rompiente y producidos por el oleaje y vientos; y cambios episódicos, caracterizados por ser generados por agentes dinámicos altamente energéticos, por modificar en gran magnitud la costa y por no tener una escala temporal definida (Sánchez y Jimenez, 1994).

Uno de los principales indicadores de la dinámica en las zonas costeras ha sido la línea de costa, esta se ha usado históricamente para este propósito (Douglas y Crowell, 2000). Estas variaciones morfológicas costeras se han estado midiendo con diferentes metodologías a lo largo de las épocas.

El método convencional ha sido los levantamientos topográficos basados en estaciones totales o GNSS y observaciones terrestres, que pueden llevar mucho tiempo, son costosas y pueden no ser muy específicas en la identificación de agrietamientos o detalles en el terreno a levantar. (King et al, 2017) (Ordaz et al, 2016) (Ortíz et al, 2017).

En los últimos 14 años, los datos de teledetección, en especial los datos satelitales de alta resolución y las fotografías aéreas han sido utilizados en el seguimiento costero para evaluar la evolución morfológica de la línea de costa y para la estimación de cambios del volumen de

sedimentos y terreno costero (Nikolakopoulos et al, 2017) (Ortíz et al, 2017) (Saleem y Awange, 2019) (Marfil, 2020) (Ai et al, 2019) (Cao et al, 2020).

Entre los métodos de obtención de fotografías aéreas y los métodos de levantamiento de línea de costa, los Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) destacan por ser más prácticos que los equipos terrestres en zonas extensas o de difícil acceso, por tener una mejor resolución que otros equipos aéreos como satélites o aeronaves tripuladas y por ser un método de bajo costo (King et al, 2017) (Aguilar et al, 2017) (Nikolakopoulos et al, 2017) (Ozcan, 2019) (Drummond et al, 2015).

El Caribe Colombiano se extiende desde la Península de la Guajira, límite con Venezuela, hasta el Golfo de Urabá, límite con Panamá y cuenta con una línea de costa de aproximadamente 1.600 km de longitud (INVEMAR, 1998). Datos de línea de costa tomados desde la Península de la Guajira hasta la Sierra Nevada de Santa Marta muestran retrocesos de hasta 20-30 metros en el último siglo. Mientras que desde el delta del Río Magdalena hasta el Golfo de Urabá se evidencian tasas de erosión de hasta 40 metros por año (Correa et al, 2005).

Estos grandes cambios han llevado a diversos autores a estudiar este fenómeno con distintos métodos, algunos de ellos son: Restrepo et al, 2007 en el Departamento de Córdoba con GPS; Restrepo et al, 2005 entre Punta Caribanna y Río Sinú y Hoyos et al, 2006 en el Departamento de Córdoba, ambos combinando GPS e imágenes aéreas; Robertson y Martínez, 1999 y Rangel et al, 2015 para todo el Caribe Colombiano con imágenes satelitales; Rangel, 2009 en algunos sectores del Caribe Colombiano y Mazorra, 2004 en el Departamento de Córdoba, mediante imágenes aéreas; Correa, Alcántara, & Gónzales, 2005 para todo el Caribe Colombiano usando imágenes satelitales y aéreas.

Los 145 km de línea de costa comprendidos entre los centros poblados de los municipios de Arboletes y Turbo en la región del Urabá antioqueño han estado sujetos a una erosión generalizada que ha afectado en gran medida la infraestructura física de todos los asentamientos litorales. En el sector de Turbo la erosión ha afectado principalmente a los terrenos de la espiga Punta las Vacas. El frente expuesto de playas de este sector inició a erosionarse desde la década de los años 40 y se fue intensificando hasta el punto de cubrir la totalidad de las playas y generar retrocesos de línea de costa estimados en alrededor de 70 m en algunos lugares (Correa y Vernet, 2004).

En la década de los 50s, la desviación artificial del Río Turbo desde Bahía Turbo hacia el sector costero conocido como Punta Yarumal (4 Km al Norte), generó la subsecuente formación del Delta del Río Turbo y una espiga al Sur de la desembocadura formada por deriva litoral (Correa et al, 2005). Al crecer el delta y con el avance de la desembocadura mar adentro, se inició la formación de una nueva espiga correspondiendo con el evento de La Niña de 2010-12, interrumpiendo el flujo de sedimentos hacia la espiga más al sur y el sector playa Barajas (Alcántara et al, 2019).

El propósito de este trabajo es realizar un monitoreo de la línea de costa de esta nueva espiga, que para efectos del mismo será referida como Punta Rojas, realizando levantamiento de imágenes aéreas con UAVs, para su posterior procesamiento fotogramétrico en el software Pix4D, con el fin delimitar la línea de costa en el sistema de información geográfica ArcGis, en una serie multitemporal de ortoimágenes y finalmente realizar un análisis estadístico del retroceso o avance de la misma en el software DSAS.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Monitorear la evolución de la línea de costa del sector Punta Rojas - Turbo usando UAVs durante el segundo semestre del año 2019.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Procesar imágenes obtenidas mediante UAVs usando el software Pix4D.
- Identificar la geomorfología de la zona de estudio mediante ortofotos.
- Generar mapas de líneas de costa de la espiga Punta Rojas empleando el software ArcGis.
- Calcular estadísticas de tasa de cambio de las líneas de costa con la herramienta DSAS, para el monitoreo de la evolución de la línea de costa.

### 3 Marco Teórico

La **erosión costera** es un proceso natural que provoca la reducción de playas, dunas y acantilados. Esto es debido a factores naturales como la acción de las olas, corrientes y el viento, además de los factores antropogénicos como los dragados, extracción de áridos marinos, entre otros. En costas rocosas se evidencia la erosión por la excavación de los acantilados y en costas de sedimento blando, se evidencia por el retroceso de la orilla, es decir, escasez de sedimentos (ANCORIM, 2017).

Uno de los procesos asociados a la erosión costera es la **deriva litoral**, esta es producida por olas que llegan a una costa rectilínea a un ángulo menor a 10 grados, lo que produce una corriente que es paralela a la costa, entre la zona de rompiente y la orilla. Esta corriente es inducida por el oleaje, por lo que su velocidad es mínima fuera de la zona de rompiente y depende de la altura de la rompiente, periodo y ángulo de incidencia de las olas, pendiente y rugosidad de la playa. El transporte de sedimentos producido por esta corriente describe trayectorias en zigzag, generando rasgos geomorfológicos como barras en las desembocaduras de los ríos, formación de espigas, entre otras (Ortiz, 2015).

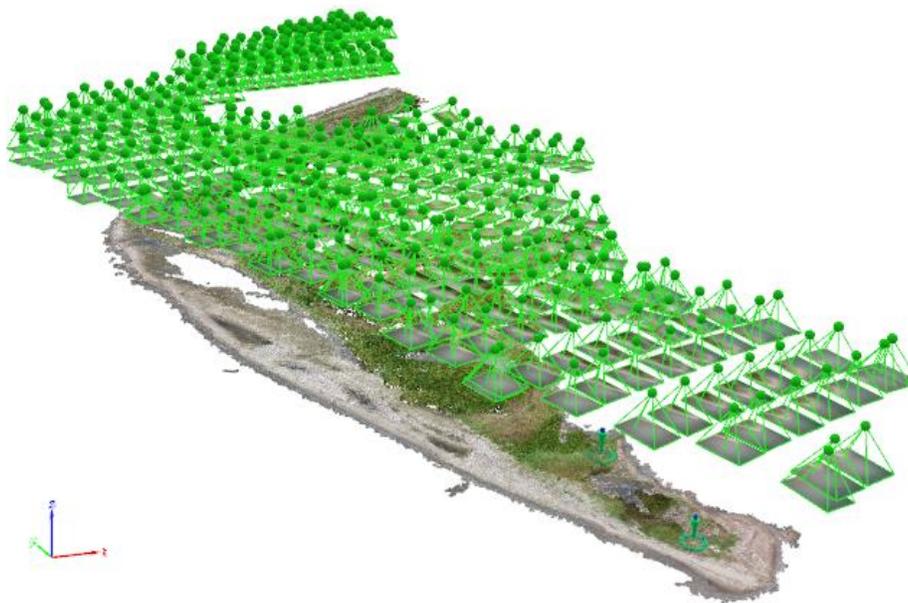
El principal indicador de la dinámica costera es la **línea de costa** (Douglas y Crowell, 2000), esta es concebida como la zona de convergencia entre el mar y la tierra seca (arena). Se caracteriza por representar la interacción de la rompiente de las olas, el aumento o descenso de las mareas, la descarga de sedimentos de los ríos, las corrientes lejanas y cercanas, procesos biológicos, el lento cambio del nivel del mar, el ascenso o descenso de los continentes y la actividad del ser humano (Guzman et al, 2008).

La ubicación de la línea costera a lo largo de las costas oceánicas, varía ampliamente en un espectro de escalas temporales como consecuencia de la erosión de las costas (retroceso) o

acreción (avance), cambios en el nivel del agua y levantamientos o subsidencia del terreno. La posición de la línea de costa refleja el balance de sedimentos en la costa, y sus variaciones pueden indicar efectos naturales o inducidos por el hombre a lo largo de la costa o en las cuencas fluviales cercanas. La evolución del litoral costero está dada por la interacción de las formaciones rocosas o sedimentarias que lo conforman, las estructuras que lo afectan, los agentes hidrodinámicos y los factores antrópicos (Posada y Henao, 2008).

Existen varios métodos para la digitalización de la línea de costa, desde métodos convencionales como levantamientos topográficos hasta más actuales mediante imágenes aéreas (King et al, 2017). Para este trabajo se utilizará la **fotogrametría**, esta es una técnica o proceso de medición de coordenadas 2D y 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición. La fotogrametría puede ser terrestre o aérea, siendo la aérea la más empleada por medio de UAVs, aviones tripulados con sistemas LIDAR, entre otros. Usando los softwares correspondientes para su procesamiento, se obtienen nubes de puntos para la generación de un modelo digital del terreno (DTM), obteniendo como productos digitales: ortofotos, ortomosaicos, entre otros. (Puerta, 2015).

Los procesos fotogramétricos se ejecutan mediante softwares, uno de estos es **Pix4D**, este programa fue desarrollado en 2011 para la ejecución del procesamiento de imágenes digitales obtenidas por UAVs para la generación de modelos y mapas digitales en 2D y 3D georreferenciados de alta resolución para su uso en sistemas de información geográfica (Pix4D, 2018).



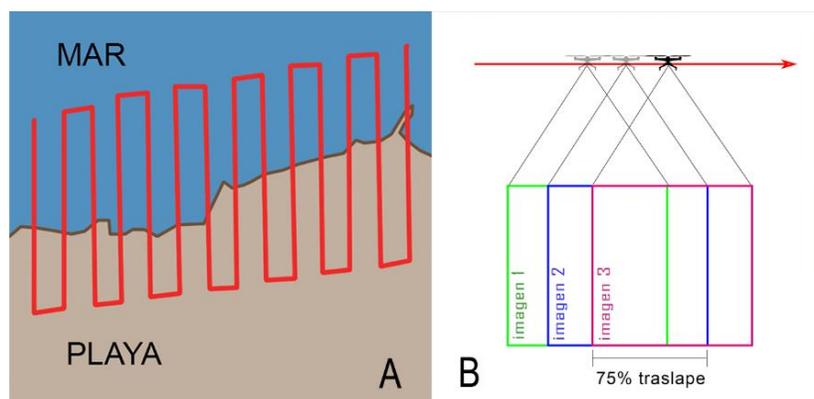
**Figura 1.** Representación de fotogrametría. Cada círculo verde simboliza la ubicación de una imagen tomada con UAV y en la parte inferior un modelo 3D obtenido después del proceso fotogramétrico. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los **UAVs** (Unmanned Aerial Vehicle) son vehículos aéreos no tripulados, también llamados drones, estos dispositivos permiten hacer vuelos sin tripulantes guiados a control remoto desde tierra, usados para actividades como fotografía, fotogrametría, topografía, meteorología, entre otros y actualmente son usados para seguimientos topográficos de zonas costeras. Estos vehículos son muy útiles gracias a que se pueden utilizar en áreas de alto riesgo o de difícil acceso y porque no requiere de pilotos. De acuerdo a su misión principal, pueden clasificarse como blancos (usados en sistemas de defensa), de reconocimiento (para información militar), de combate (para misiones), de logística (para llevar carga), de investigación y desarrollo (para sistemas de desarrollo) y los comerciales y civiles (para propósitos civiles, entretenimiento, entre otros). Estos últimos son los más comunes y usados, debido a su gran aplicabilidad, por ejemplo, en agricultura, para recolección de datos sobre el estado de salud de los cultivos; en medios audiovisuales, para hacer tomas aéreas; en el sector de seguridad, para

actividades de vigilancia; en el sector académico para estudios topográficos, entre muchas otras (Puerta, 2015).

Para la obtenciones de la imágenes a usar en el proceso fotogramétrico, se deben generar **planes de vuelo**, *Figura 2*. A) Esquema de plan de vuelo, la línea roja indica la trayectoria del UAV. B) Representación gráfica de tres imágenes (cuadros) con un traslape de 75%. , estos son rutas o recorridos que se crean en la etapa de planificación del proyecto, por el cual el UAVs deberá transitar bajo unas condiciones entregadas por el usuario (altura, velocidad de vuelo, traslape de imágenes, entre otras). El plan de vuelo puede ser generado en distintos softwares, para este caso específico se hará uso del programa DroneDeploy (perteneciente a la empresa con el mismo nombre).

El **traslape de imágenes** es uno de los parámetros para la generación del plan de vuelo, *Figura 2*. A) Esquema de plan de vuelo, la línea roja indica la trayectoria del UAV. B) Representación gráfica de tres imágenes (cuadros) con un traslape de 75%. este nos indica, porcentualmente, que tanta información o área comparte una imagen respecto a las adyacentes. En el caso de los planes de vuelo, indicará al UAVs cada cuánto deberá disparar la cámara.



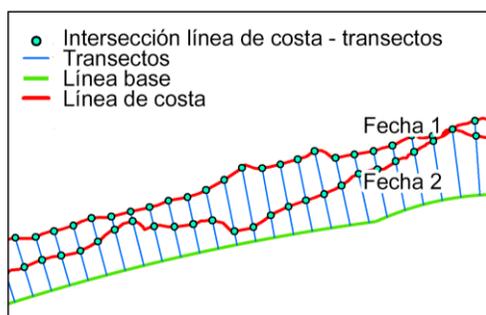
**Figura 2.** A) Esquema de plan de vuelo, la línea roja indica la trayectoria del UAV. B) Representación gráfica de tres imágenes (cuadros) con un traslape de 75%. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Con el fin de obtener un resultado fotogramétrico preciso, en términos de georreferenciación, se hace uso de los **puntos de control terrestre** (GCP, por sus siglas en inglés), los cuales son puntos fijos georreferenciados, ubicados en el área de estudio de forma no colineal. Normalmente están posicionados a la altura del suelo, pero también se pueden usar estructuras elevadas. Deben ser de colores y tamaños tales que sean de fácil visualización en las imágenes obtenidas. El papel de estos puntos de control en la fotogrametría es proporcionar una referencia para la geocorrección de las ortofotos, dado que los UAVs tienen GPS con altos errores (entre 3 y 5 metros). Con el fin de obtener errores bajos, estos puntos son levantados con GNSS, el cual se utiliza para compensar algunos errores en la posición del GPS independiente, ya sea natural o deliberadamente inducida (Lapucha y Maynard, 1992).

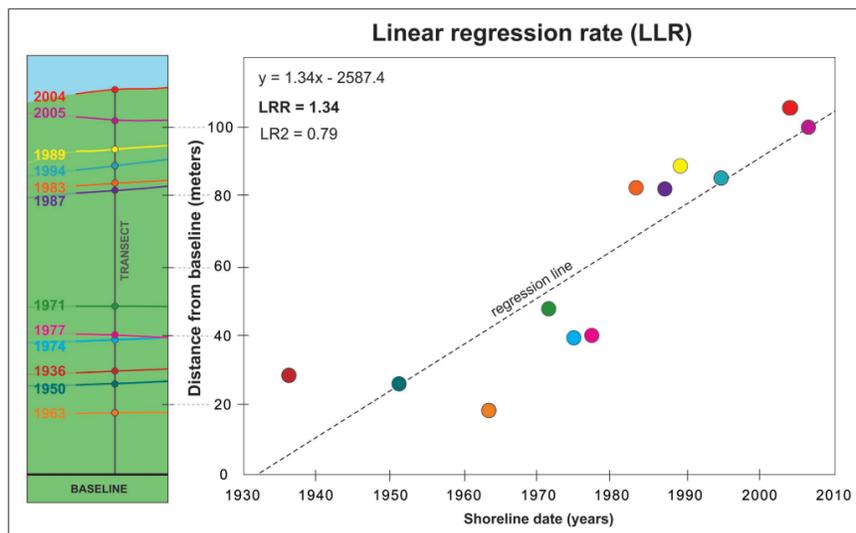
Los productos cartográficos obtenidos en el proceso fotogramétricos son trabajados en **ArcGis**. Este software cuenta con un conjunto de herramientas que posibilita la observación y manejo de información geográfica. ArcMap es la aplicación central de ArcGis que permite realizar las tareas comunes y avanzadas, así como presentar los productos por medio de mapas impresos o digitales (Olaya, 2011).

**DSAS** (Digital Shoreline Analysis System) es un software que funciona dentro del software ArcGIS (Esri Geographic Information System). DSAS calcula estadísticas de tasa de cambio para una serie temporal de datos vectoriales de la línea de costa. Para llevar a cabo el análisis de las tasas de cambio, se requieren cuatro elementos básicos que son: la *Geodatabase* donde se almacenan los datos espaciales y no espaciales, las *líneas de costa* que deben estar es una única clase de entidad dentro de la geodatabase personal, la *línea base* que sirve como punto de partida para todos los transectos emitidos por la aplicación DSAS y los *transectos* que son creados automáticamente por el programa bajo parámetros ingresados (Himmelstoss et al, 2018).

DSAS permite generar diferentes parámetros estadísticos, entre los cuales se tiene el **LRR** (Lineal Regression Rate), el cual expresa la tasa de regresión lineal mediante el ajuste de una línea de regresión de mínimos cuadrados a todos los puntos del litoral de un transecto, donde su pendiente representa la tasa de regresión lineal y **NSM** (Net Shoreline Movement), es la distancia entre la línea de costa más antigua y la más joven para cada transecto, entre otros parámetros (Himmelstoss et al, 2018). Estos valores son calculados para cada uno de los transectos, a partir de la información obtenida en cada uno de los puntos de intersección.



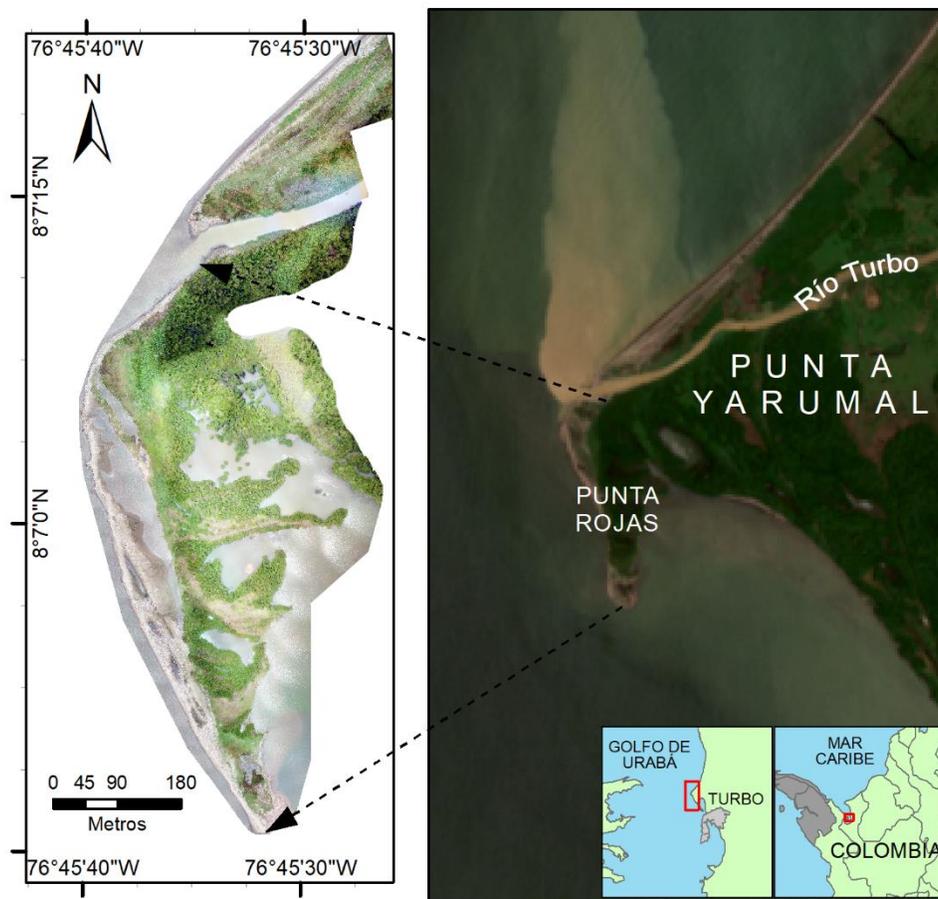
**Figura 3.** Representación gráfica de elementos vectoriales usados por el software DSAS para el análisis de línea de costa. Fuente: Elaboración propia, 2021.



**Figura 4.** Representación estadístico LRR. Conjunto de datos de línea de costa (línea base [negro], transecto [gris], costas e intersección [multicolor]) para describir la relación entre los datos de tiempo y espacio en el mapa. La tasa de regresión lineal (LRR) se determinó hallando la ecuación de regresión lineal de la línea que se ajusta a los puntos. La pendiente de la ecuación es la tasa. Fuente: Himmelstoss et al, 2018.

## 4 Metodología

### 4.1 Área de Estudio



**Figura 5.** Área de estudio. Ubicación geográfica del sector Punta Rojas, Turbo Antioquia. Fuente: Elaboración propia, 2021.

El área de estudio es una espiga que se encuentra ubicada en Punta Yarumal (para efectos de este trabajo será referida como Punta Rojas), al sur de la desembocadura del Río Turbo en el Distrito de Turbo, del departamento de Antioquia. Punta Rojas cuenta con una extensión de 13,52 Ha y la línea de costa a estudiar tiene una longitud de 1.100 metros.

El Golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado, con aproximadamente 80 Km de largo, 25 Km de ancho, profundidades medias de 25 m y profundidades máximas de 60 m. Está ubicado en la parte meridional del Mar Caribe cerca de la frontera con Panamá, entre  $7^{\circ} 55'$  y  $8^{\circ}$

40' de latitud norte y 76° 3 y 77° 23' de longitud W, que limita al Norte con el Mar Caribe, al Sur con el Valle Medio del Río Atrato, al Este con la serranía de Abibe y al oeste con la frontera de Panamá. Cuenta con un borde litoral de aproximadamente 543 Km, que comprende el territorio desde Cabo Tiburón hasta punta Arboletes (García-Valencia, 2007).

La región de Urabá presenta dos épocas climáticas bien marcadas a lo largo del año, una entre diciembre y marzo conocida como época seca, caracterizada por el predominio de los vientos alisios del Norte y Noreste, con velocidades medias de 4 m/s y máximas de 9.4 m/s en febrero; y otra entre abril y noviembre que sería la época húmeda. Tiene una temperatura media de 27°C, con valores máximos de 40°C y mínimos de 19°C. Presenta precipitación anual de 2500 mm aproximadamente, pero en la época húmeda significativa entre agosto y noviembre alcanza un promedio multianual de 3000 mm en el sector de Turbo, con vientos predominantes del Sur, y en los meses de junio y julio se presenta una etapa de transición. El golfo presenta un régimen micromareal con amplitudes máximas de 0.4m (Molina Flórez et al, 2014).

## **4.2 Recopilación de Información Secundaria**

Para complementar y dar una explicación la información recolectada en este trabajo, se recurrió a bases de datos bibliográficas y en la web, obteniendo principalmente información del área de estudio la cual ayuda a explicar la dinámica de la costa e imágenes satelitales que sirvieron para conocer el proceso de formación de la espiga.

### **4.2.1 Imágenes Satelitales**

Las imágenes satelitales se obtuvieron de la web, disponibles en el servidor United States Geological Survey (USGS) mediante los satélites Landsat 7 y Landsat 8, con un tamaño de pixel de 30 metros, y Sentinel 2, con un pixel de 10 metros.

### 4.2.2 Caracterización del entorno

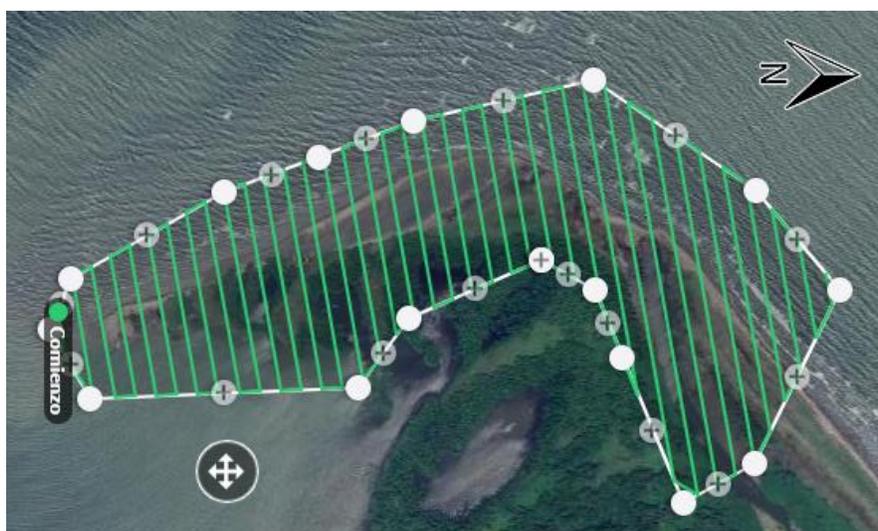
Para la caracterización del área e identificar los agentes o factores forzantes, se acudió a información secundaria de la climatología y condiciones oceanográficas de la zona, para comprender el comportamiento desarrollado en el área de estudio.

### 4.3 Fase de Campo

Se realizaron siete campañas de campo, una inicial para reconocimiento del terreno y seis para levantamiento fotogramétrico, el desplazamiento al área de estudio se realizó en lancha, embarcando en la parte Sur de Bahía el Uno y en la punta Sur de la espiga.

#### 4.3.1 Levantamiento de imágenes

Para la toma de las imágenes se utilizó un drone Mavic Pro Platinum con un sensor de 1/2", 12,35M píxeles efectivos, resolución 4K y un drone Phantom 4 Pro con un sensor de 1", 20M píxeles, resolución 4K. Los planes de vuelo se ejecutaron en el programa DroneDeploy, estos se ilustran en la *Figura 6* y se realizaron en marea baja, iniciando media hora antes de las horas estipuladas en las cartillas de pronósticos del IDEAM, 2019. Los parámetros para el plan



**Figura 6.** Plan de vuelo realizado en el programa DroneDeploy. Fuente: Elaboración Propia, 2019.

de vuelo fueron los siguientes: alturas ilustradas en la *Tabla 1*. Sobrevuelos realizados. las cuales variaron dependencia de las condiciones climáticas al momento del despegue, tiempo de vuelo disponible (baterías) y UAV utilizado; el traslape de imágenes de un 75%, tanto vertical como horizontalmente; la dirección de vuelo se realizó de forma perpendicular a la línea de costa; y una velocidad de vuelo de 5 m/s.

**Tabla 1.** *Sobrevuelos realizados. Fuente: Elaboración propia, 2021.*

<b>Fecha</b>	<b>UAV</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>N° de Imágenes</b>
26/09/2019	Mavic Pro	90	471
06/10/2019	Phantom 4 Pro	100	198
20/10/2019	Phantom 4 Pro	80	197
03/11/2019	Mavic Pro	120	246
14/12/2019	Mavic Pro	45	701
12/01/2020	Mavic Pro	60	709

#### **4.3.2 Ubicación y Levantamiento de Puntos de Control Terrestre**

Para la geocorrección de las ortofotos se ubicaron 3 mojones en cemento, intentando que estos quedaran ubicados en forma de zigzag sobre el área de estudio. Encima de estos puntos se ubicaron unas dianas grandes y de colores para que fuese visible en las ortofotos, *Figura 7*, estos serán los puntos de control terrestre. Las posiciones de estos puntos fueron obtenidas con un GNSS GPS de alta precisión en modo RTK. El levantamiento de estos puntos se realizó en un día con baja nubosidad con el fin de obtener una buena cobertura satelital.

#### **4.4 Fase de Procesamiento**

Para la fase de procesamiento se utilizó una Workstation HP Z6, en esta se realizó el procesamiento de las imágenes obtenidas para todas las campañas de campo en el Software Pix4D y digitalización y análisis en el software ArcGis ambos con licencia institucional.



**Figura 7.** Punto de control terrestre. Diana ubicada sobre mojón en concreto. Fuente: Fotografía propia, 2019.

#### 4.4.1 Proceso fotogramétrico

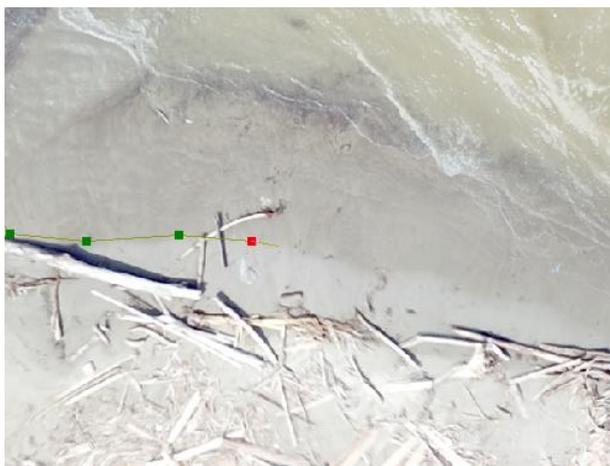
El proceso fotogramétrico se realizó en el programa Pix4D, aquí se procesaron las imágenes obtenidas para cada plan de vuelo y se trabajó en el sistema de coordenadas WGS 84 / UTM Zone 18N. Este software cuenta con un flujo de trabajo dividido en tres pasos: un procesamiento inicial y de matchin; densificación de la nube de puntos y asignación de puntos de control; y la generación de los diferentes productos fotogramétricos (DSM, ortofoto, entre otros).



**Figura 8.** Software Pix4D. En la parte inferior izquierda se puede ver el flujo de trabajo del programa y la ubicación de las imágenes tomadas (Puntos rojos), en el centro de la imagen se muestra una malla 3D resultado del proceso fotogramétrico con la distribución de los GCP y en la parte superior derecha la visualización de los GCP al momento de identificarlos. Fuente: Elaboración propia, 2021.

#### 4.4.2 Digitalización de la línea de costa

En el programa ArcMap se delimitó la línea de costa correspondiente a cada ortofoto procesada y se almacenó en un “Feature Class” contenido en un “Personal Geodatabase”. Se tuvo como criterio la última marca húmeda de la marea sobre la playa (*Figura 9*), criterio que permite disminuir el error por cambios de marea. Este método también es conocido como la línea de agua alta (HWL, por sus siglas en inglés) y fue utilizado por Appeaning, 2018.



**Figura 9.** Digitalización de la línea de costa. Método HWL (Línea de agua alta) utilizado por Appeaning, 2018. Fuente: Elaboración propia, 2021.

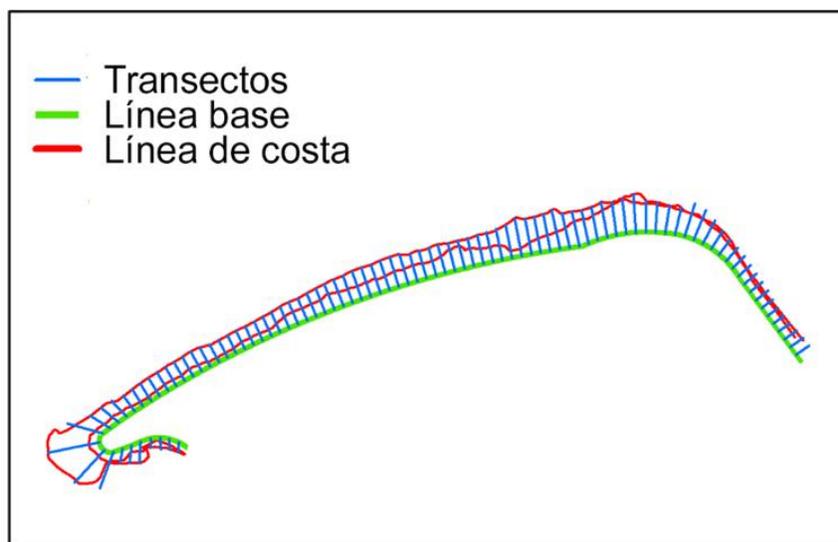
#### 4.4.3 Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de las líneas de costa se usó el software Sistema de Análisis de Costas Digitales (DSAS) en su versión 5.0, desarrollado por THIELER, E.R. et al. (2017), el cual es una herramienta de descarga libre que funciona dentro del software ArcMap. En este se analizaron las tendencias cambiantes de la línea de costa a lo largo de transectos ubicados de manera perpendicular y se tuvieron en cuenta de esta forma los elementos necesarios para su ejecución:

- Todas las **líneas de costa** se ubicaron en un mismo “Feature class” el cual constaba de ciertos atributos imprescindibles para el cálculo, como lo exige Himmelstoss et al, 2018 en

el manual de usuario de DSAS. Estos eran DATE, fecha en formato mm/dd/aaaa y UNCERTAINTY, ante el cual se ubicaron valores (1) iguales para todas las líneas de costa.

- La **línea base** fue creada manualmente y ubicada on-shore, tratando de que los transectos quedasen lo más perpendicular posible a todas las líneas de costa.
- Los **transectos** se crearon de manera automática y parten de la línea base, se ubican logrando la mayor perpendicularidad posible respecto a las líneas de costa. Estos se distribuyeron cada 10 metros a lo largo de la costa obteniendo un total de 90 transectos con una longitud máxima de 80 metros siendo esta suficiente para intersecar todas las líneas de costa.
- Finalmente, se aplicaron los **estadísticos LRR** y **NSM** a las líneas de costa trazadas en las ortofotos del periodo septiembre (2019) a enero (2020). Teniendo presente que DSAS entrega estadísticas anuales, el estadístico LRR atribuye el comportamiento al ciclo anual completo, por este motivo y teniendo en cuenta que el software trabaja bajo ecuaciones lineales, se hace una conversión de los datos obtenidos (anuales) a valores mensuales.



**Figura 10.** Elementos vectoriales de DSAS para el estudio estadístico de Punta Rojas. Todas las líneas de costa se presentan en los resultados. Fuente: Elaboración propia, 2021.

## 5 Resultados y Análisis

### 5.1 Ortofotos de la espiga “Punta Rojas”.

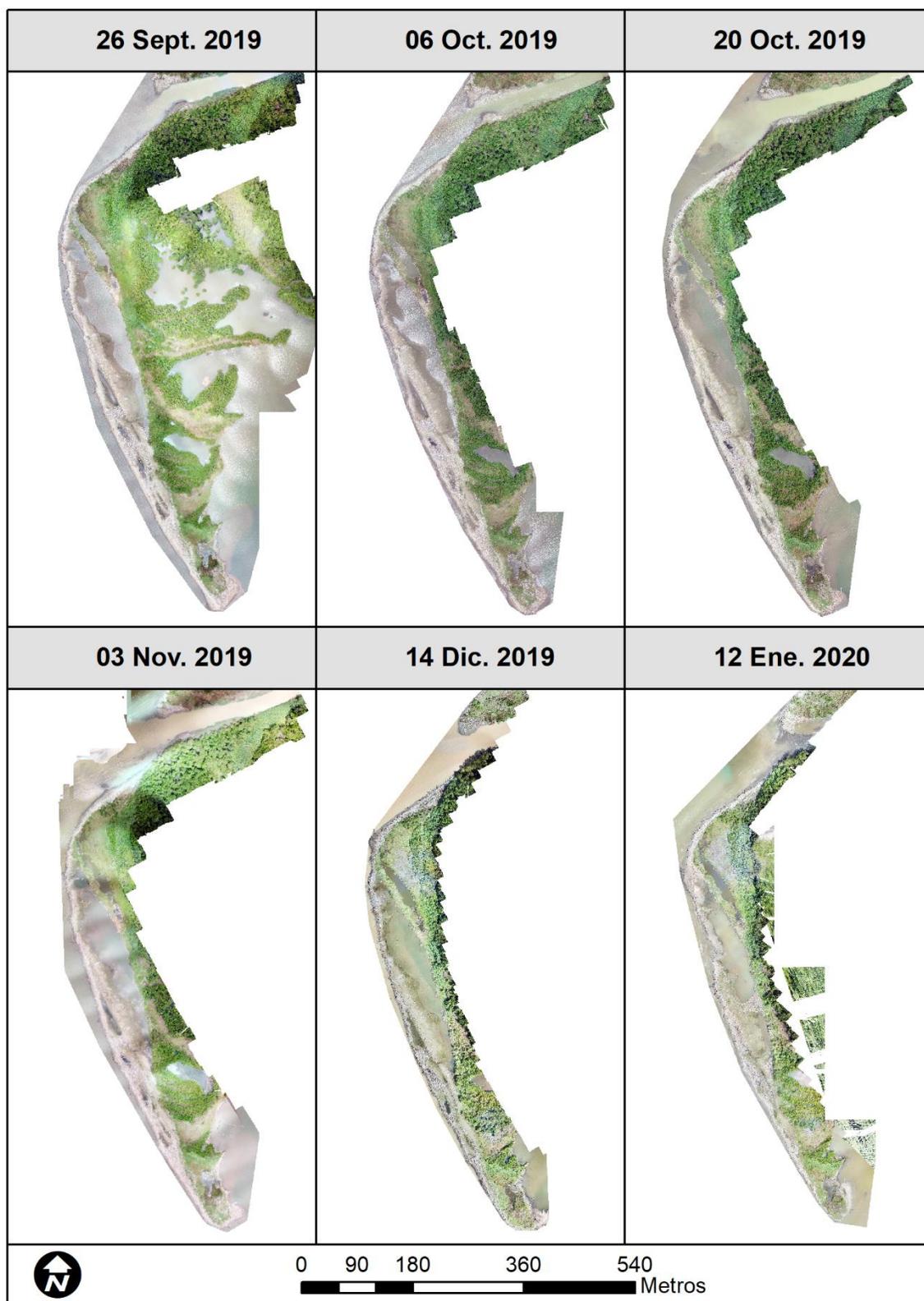
Se obtuvieron seis ortofotos de la espiga “Punta Rojas” en un lapso de tiempo de 5 meses, iniciando el 26 de septiembre de 2019 y finalizando el 12 de enero de 2020, estas reposan en el ANEXO 1 y se resumen en un mosaico en la *Figura 11*. En este mosaico se presentan las ortofotos en una escala de 1:10.000 y sus especificaciones en la *Tabla 2*.

La altura de vuelo varió entre 45 y 120 metros sobre el nivel del suelo dependiendo varios factores, tales como: las condiciones climáticas al momento del despegue, tiempo de vuelo disponible (baterías) y UAV utilizado.

La cantidad promedio de imágenes tomadas por vuelo es de 420, cubriendo asimismo un área promedio de 17,91 hectáreas. De esta cantidad de imágenes, el 88,8% lograba ser calibrada por el software Pix4D, esto se debe a que el software no encuentra puntos de unión confiable en las imágenes sobre el mar, debido al movimiento producido por el oleaje.

Para estas ortofotos se consiguió un GSD (distancia de muestra de suelo) promedio de 2,55 centímetros, valor que se puede concebir como el tamaño de pixel. Este varió principalmente en dependencia de la altura de vuelo y la calidad de las fotografías, puesto que para el proceso fotogramétrico todo se realizó bajo los mismos parámetros.

Respecto a la evaluación de la precisión en la triangulación fotogramétrica, aunque sólo se usaron 3 GCP (puntos de control terrestre) distribuidos uniformemente en el bloque fotogramétrico (Consulte la *Figura 8*, arriba), el software PIX4D proporcionó un ajuste de alta precisión con un promedio de 0.0018 metros para las ortofotos, asociados a los errores horizontal y vertical de los puntos de control, como se presenta en la *Tabla 3*.



**Figura 11.** Mosaico de ortofotos. Se presentan las 6 ortofotos obtenidas con el proceso fotogramétrico a una escala de 1:10.000. Fuente: Elaboración propia, 2021.

**Tabla 2.** Especificaciones ortofotos.

Fecha	UAV	Altura Vuelo (m)	Imágenes Calibradas	Área Levantada (Ha)	GSD (cm)	Error Georreferenciación (m)
26 sept. 2019	Mavic Pro	90	405/471	27,53	3,27	0,006
06 oct. 2019	Phantom 4 Pro	100	190/198	16,15	2,71	0,001
20 oct. 2019	Phantom 4 Pro	80	188/197	16,81	2,78	0,002
03 nov. 2019	Mavic Pro	120	234/246	17,93	3,28	0,001
14 dic. 2019	Mavic Pro	45	536/701	9,53	1,63	0,001
12 ene. 2020	Mavic Pro	60	593/709	19,53	1,64	0
<b>Promedios</b>		82,5	88,8%	17,91	2,55	0,0018

**Tabla 3.** Coordenadas de los puntos de control terrestre. Datum WGS 84 / UTM Zone 18N

GCP	LONGITUD	LATITUD	Z	ERROR H	ERROR V
1	897853.3291	306017.3508	1.328	0.0118	0.0173
2	897307.9212	306197.0631	1.344	0.0113	0.0155
3	897221.1561	306202.7150	1.322	0.0113	0.0153

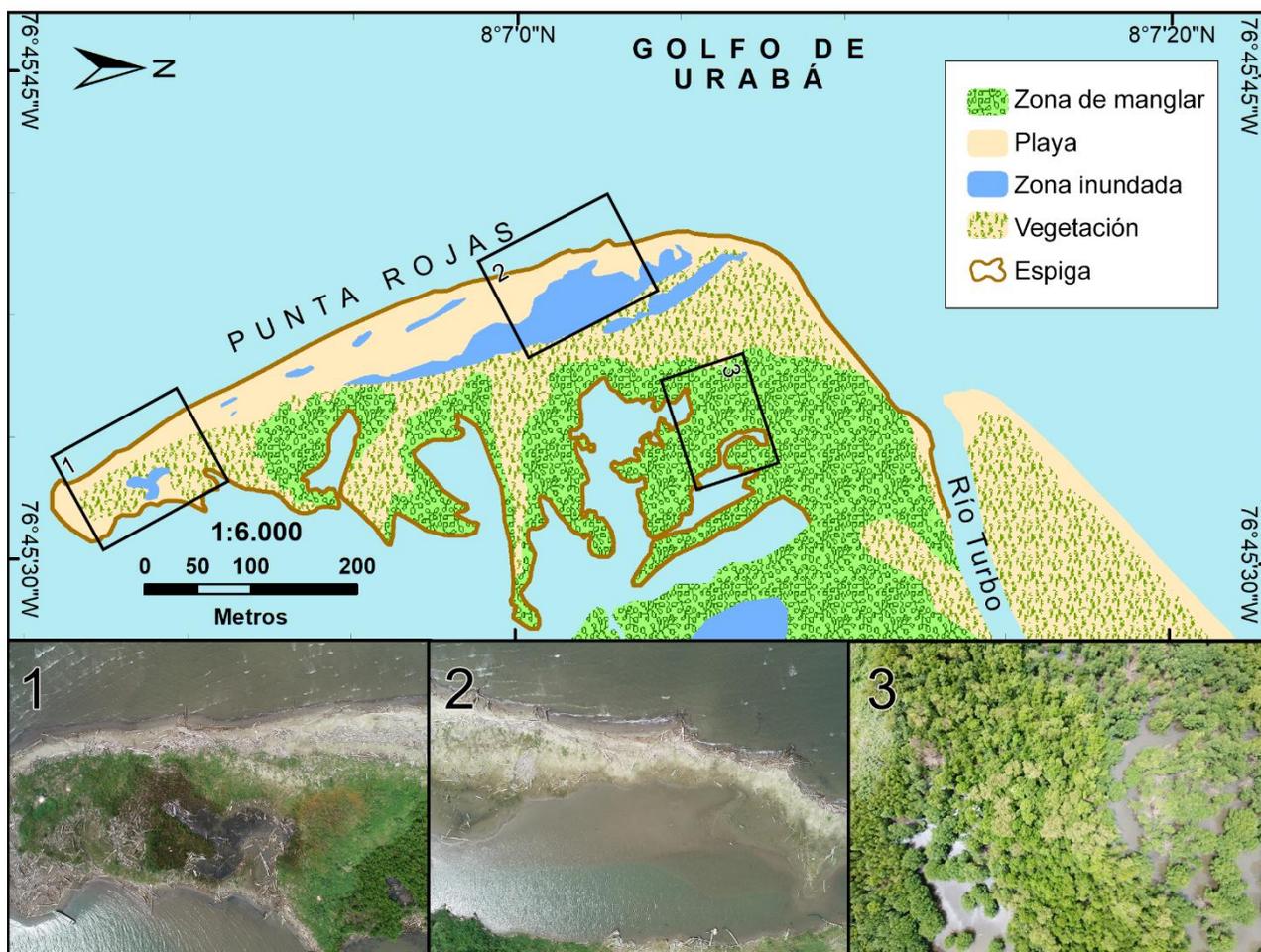
## 5.2 Geomorfología de la espiga “Punta Rojas”

El área de estudio (unidad geomorfológica denominada espiga) es un cuerpo arenoso y alargado, elongado en dirección Norte-Sur, uno de sus extremos se encuentra fijo a la desembocadura del Río Turbo y el otro prograda costa afuera en forma curvada. Se identificaron otras unidades geomorfológicas como playas y lagunas costera y cuenta con vegetación permanente en el costado interno.

La espiga Punta Rojas cuenta con un área aproximada de 13,52 Ha, de las cuales 8,66 Ha corresponden a zona de manglar; 3,21 Ha a zona de playa, con tamaño de grano medio que varía de arena media a limo muy grueso (Alcántara et al, 2019); cuenta con áreas inundadas (1,13 Ha)

someras que no superan los 30 cm de profundidad; y 3,72 Ha de área de vegetación. La clasificación y dimensiones descritas, se realizaron teniendo en cuenta la ortofoto del 26 de septiembre de 2019, *Figura 12*, y la clasificación usada por DIMAR y CIOH, 2013.

Al norte de la espiga, se encuentra la desembocadura del Río Turbo, el cual tiene una tasa de aporte de sedimentos de 2.264 m<sup>3</sup>/mes (Restrepo y Kjerfve, 2000). Este aporte es un valor medio, ya que, en época seca, cuando la precipitación disminuye, el caudal pierde energía al punto de que se forma una barra en la boca del río. La dinámica de este proceso y su afectación a los intereses de este trabajo se explicará con mayor detalle en resultados posteriores.



**Figura 12.** Unidades Geomorfológicas de la espiga "Punta Rojas". Clasificación obtenida del Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano. Fuente: Elaboración propia, 2021.

### 5.3 Evolución de la Línea de Costa

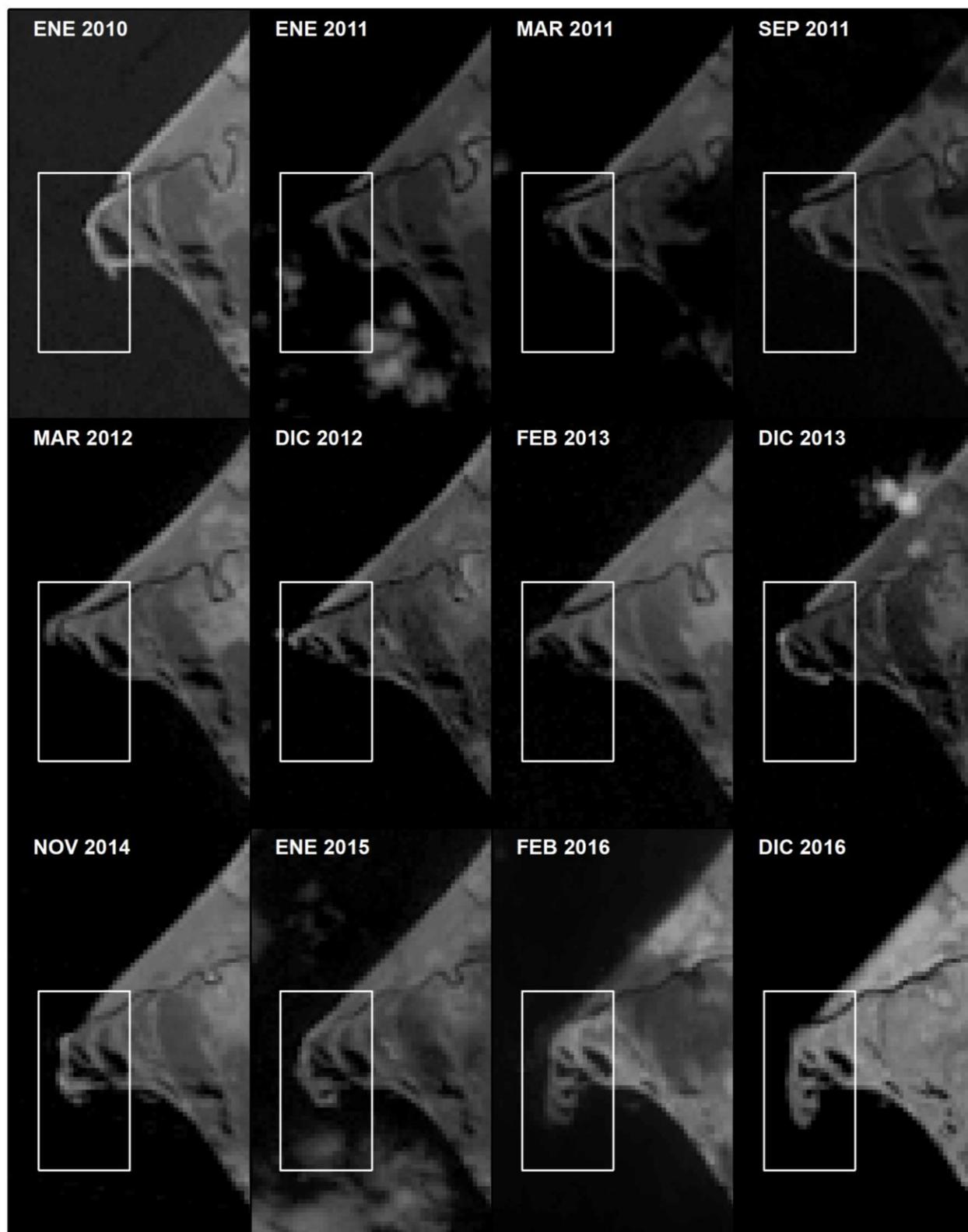
#### 5.3.1 Aparición de la espiga “Punta Rojas”

Para analizar y evidenciar los cambios en la geomorfología que ha venido experimentado el sector Punta Yarumal, se debe revisar en la línea de tiempo cuáles han sido los cambios y los factores que los han provocado, para entender la evolución de la misma. Por tanto, se creó un mosaico con imágenes satelitales obtenidas de la USGS (United State Geological Survey) del área adyacente al Río Turbo, en diferentes meses desde el año 2010 hasta el 2016 (*Figura 13*).

El Río Turbo fue desviado artificialmente en los años cincuenta, y debido a este acontecimiento se formó la espiga Punta Yarumal por la acumulación de los sedimentos transportados (Correa et al , 2005). Entre el año 2010 y 2011 se puede apreciar que la espiga ha tenido un cambio significativo en su forma, específicamente justo hacia el lado sur de la desembocadura del Río Turbo, en donde se puede observar los primeros indicios de la aparición de Punta Rojas. Alcántara et al, 2016 atribuyen esta aparición a la baja erosión por efecto del oleaje en los eventos del Niño 2009-10 y la alta entrada fluvial de sedimentos provenientes del Río Turbo por el evento de la Niña 2010-12.

**Tabla 4.** *Eventos ENSO. Cambios en área (metros cuadrados) de la nueva espiga (Punta Rojas) en Punta Yarumal. Tomada y modificada de Alcántara et al, 2019.*

Periodo	Evento ENSO	Área (m <sup>2</sup> )
2009-10	Niño	-38.602,3
2010-11	Niña	26.0063,1
2011-12	Niña	58.121,8
2012-13	-	11.031,9
2013-14	-	41.545,1
2014-15	-	20.393,2
2015-16	Niño	-4.069,4



**Figura 13.** Mosaico de imágenes 2010-2016. Las imágenes fueron recolectadas de los satélites Landsat 7 y Landsat 8 y se presentan a una escala de 1:40.000. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Entre mediados de diciembre de 2012 y febrero de 2013, Punta Yarumal alcanzó una extensión máxima hacía el Oeste, siendo el causal probable de este límite la batimetría de la zona. Posteriormente continuó creciendo ahora en dirección Sur y Sureste y un segundo evento del Niño en 2015-16 favoreció la estabilización de esta nueva espiga.

### 5.3.2 Dinámica de la línea de costa

Para analizar la dinámica de la línea de costa de Punta Rojas, se usaron ocho imágenes satelitales entre los años 2017 y 2018 en diferentes meses, con el fin de revisar el comportamiento de la espiga en años anteriores al estudio en dos ciclos completos de 12 meses. Para esto se trazaron las líneas de costa para cada una de estas imágenes satelitales y luego se analizó de a pares consecutivos, resaltando los valores máximos y mínimos (en metros) de retroceso y avance de la línea de costa, como se ve en la *Figura 14*.

Se encontró que la espiga está fuertemente influenciada por las dos épocas climáticas, en las cuales la época húmeda es una época de retroceso longitudinal de la parte Sur de la espiga, caso contrario de la época seca. Los factores forzantes influenciadores para los lapsos de tiempo de la *Figura 14* se presentan en la *Tabla 5*.

**Tabla 5.** Factores forzantes en la dinámica de Punta Rojas. Los datos de altura de oleaje, precipitación y dirección del viento fueron obtenidos de Molina et al, 2014. La eventualidad del ENSO se obtuvo de NOAA, s.f.

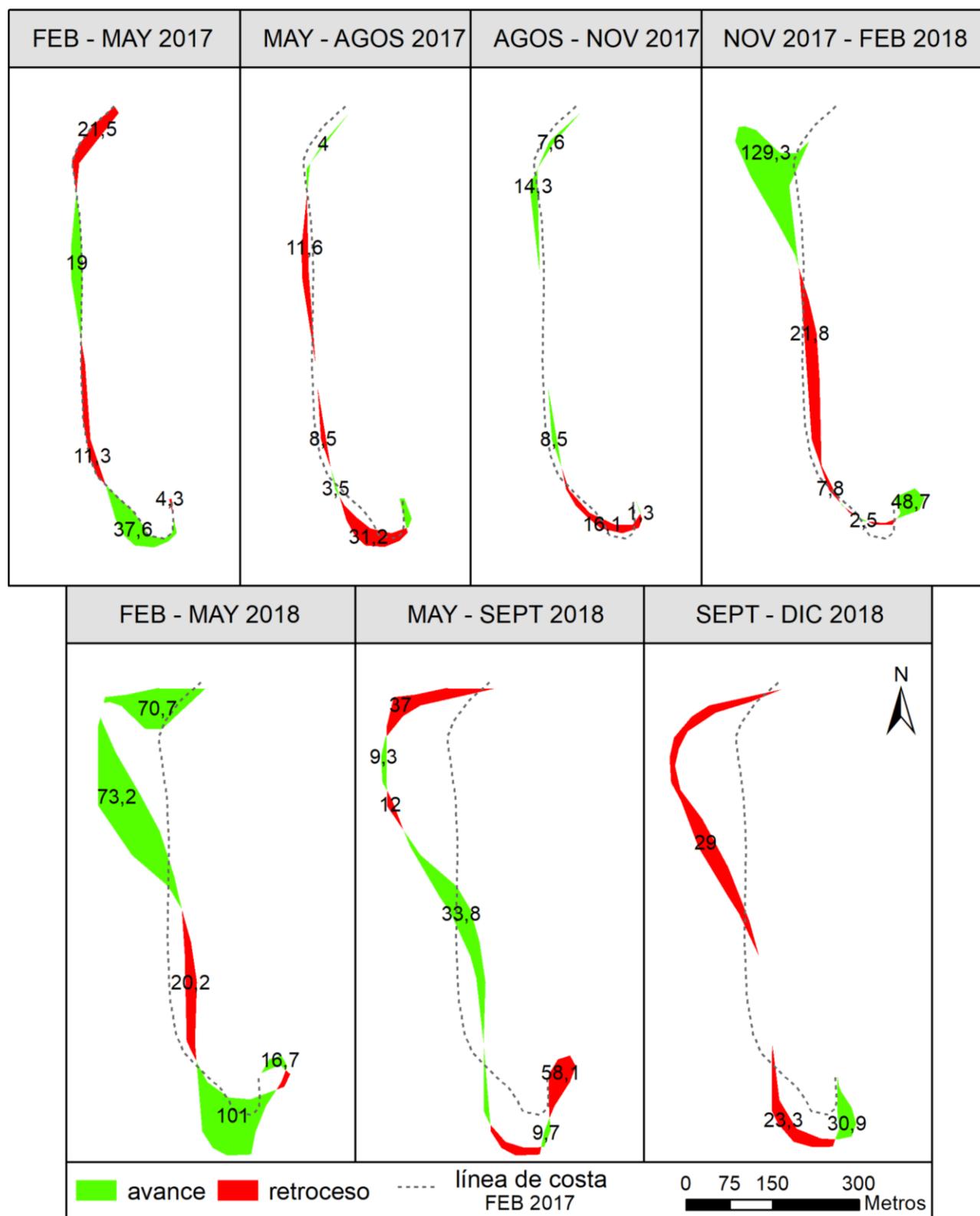
Fecha	Época	Dir. de viento	Oleaje, Hs (m)	Evento ENSO
FEB-MAY 2017	Seca y de transición	Norte	0,8 – 0,5	-
MAY-AGOS 2017	De transición y húmeda	Sur	0,5 – 0,6	-
AGOS-NOV 2017	Húmeda y de transición	Sur	0,5 – 0,25	Niña
NOV 2017-FEB 2018	De transición y seca	Norte	0,4 – 0,8	Niña
FEB-MAY 2018	Seca y de transición	Norte	0,8 – 0,5	Niña
MAY-SEPT 2018	Húmeda	Sur	0,5 – 0,3	-
SEPT-DIC 2018	Húmeda y se transición	Sur	0,3 – 0,6	Niño

**5.3.2.1 Época húmeda.** Durante la época húmeda, a pesar de ser la temporada con mayor aporte de sedimentos fluviales provenientes del Río Turbo, toda la pluma sedimentaria se ve desplazada en dirección Sur-Norte por los factores forzantes para este periodo.

La época húmeda revela una deriva litoral en dirección Sur-Norte, influenciada por vientos débiles provenientes del Sur y las alturas de oleaje significativas más bajas, respecto a las de la época seca. Esto hace que se produzca un retroceso longitudinal del extremo sur de la espiga, transportando sedimentos hacia el norte del Río Turbo. Para la época húmeda del año 2017 se calculó un retroceso en la punta de la espiga de aproximadamente de 49,8 metros y para el año 2018 de aproximadamente 38,3 metros (*Figura 14*).

**5.3.2.2 Época seca.** Mientras que la época húmeda se caracteriza por el gran aporte de sedimentos fluviales, la época seca por su parte es un periodo de reorganización sedimentaria. Los factores forzantes para esta época son intensificados, a excepción del caudal del Río Turbo (principal fuente de sedimentos).

La deriva litoral para esta época se da en dirección Norte-Sur, influenciada por vientos fuertes provenientes del Norte y magnitudes de oleaje mayores, lo cual está asociados a una fuerte ruptura de la ola en la zona de rompiente, generando un sistema de alta energía el cual provoca una alta resuspensión de sedimentos haciendo que queden expuestos a la deriva litoral (Mosso Aranda, 2004). Esta intensidad de condiciones, combinado con el bajo caudal del Río Turbo, hacen que se forme una barra en los primeros meses de la época seca, la cual cierra la boca del río permitiendo el libre flujo de sedimentos por deriva litoral, desde zonas al Norte del Río Turbo hacia la parte Sur de la espiga. Las condiciones mencionadas contribuyen a una ganancia longitudinal de la punta de la espiga en el extremo Sur, con un avance promedio para el año de 2017 de 37,6 metros y para el año de 2018 de 101 metros (*Figura 14*).



**Figura 14.** Mosaico de retroceso y avance de línea de costa entre 2017 y 2018. Los valores indican el retroceso o avance máximo en metros para cada segmento. Fuente: Elaboración propia, 2021.

**5.3.2.3 Eventualidad ENSO.** De manera general se puede concebir al El Niño como la época que produce periodos secos fuertes y prolongados, por otro lado, en su fase La Niña, se amplifican las lluvias y los caudales máximos de los ríos (Poveda y Mesa, 1996).

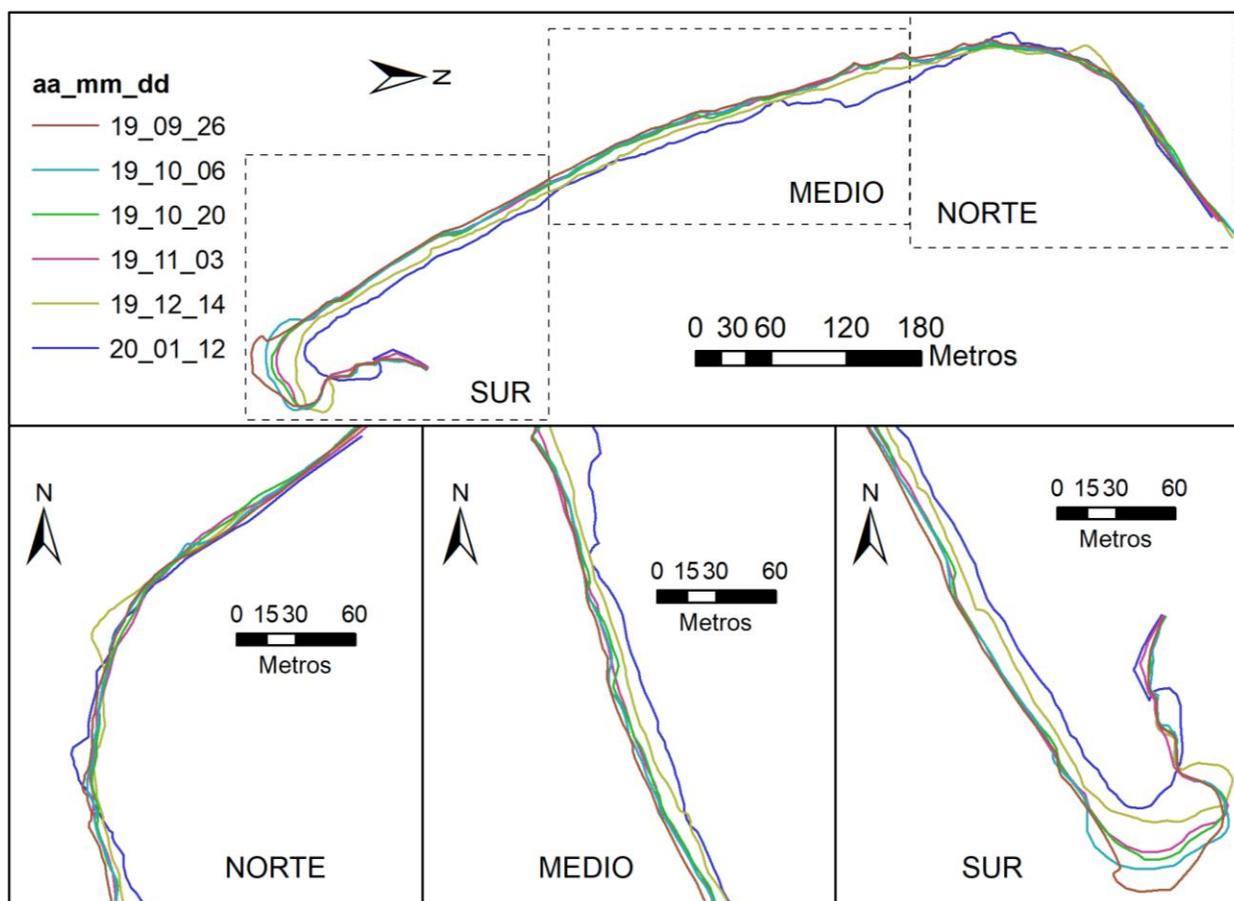
Estas eventualidades influyen los efectos de la época en la dinámica, como se puede evidenciar en la *Figura 14* en los meses de noviembre de 2017 a mayo de 2018. Durante esta época seca ocurrió un evento La Niña, el cual no permitió la formación de la barra que cierra la boca del río, por el aumento del caudal del mismo. La deriva litoral acarreado sedimentos de la parte Norte del río, sumado con el aporte sedimentario del río por este evento de La Niña, provocó que tanto la parte de Norte, como la punta de la espiga, crecieran de forma considerable, respecto a la misma época del año anterior (Sin evento ENSO).

Para el lapso comprendido entre septiembre y diciembre del año 2018, el cual comprende los finales de la época húmeda y la transición e inicio de la época seca, se presentó un evento de El Niño. El bajo aporte sedimentario del Río Turbo por la poca precipitación intensificó la pérdida de sedimentos en la espiga como se ve en la *Figura 14*.

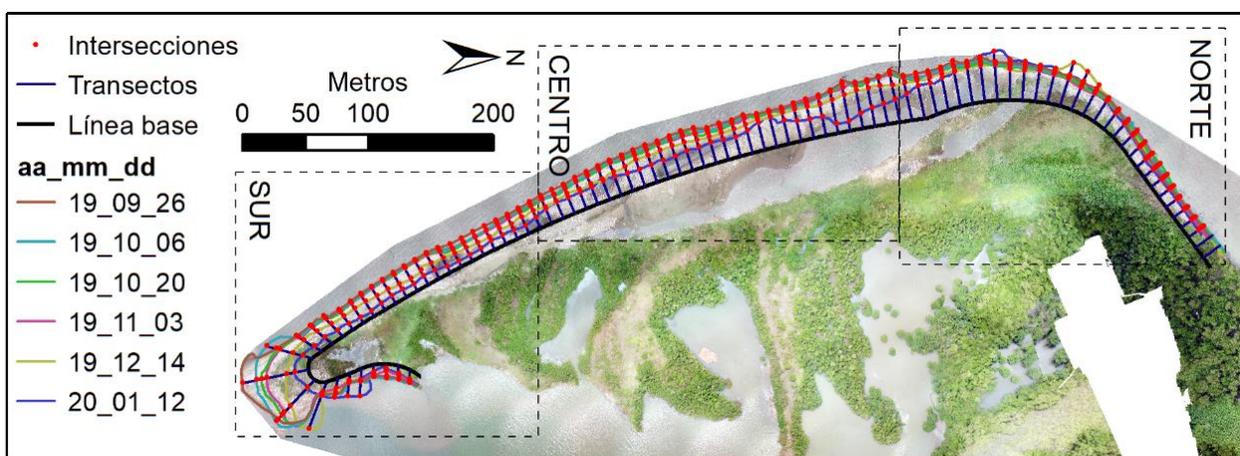
#### **5.4 Líneas de costa**

Las líneas de costa fueron extraídas de las ortofotos presentadas en la *Figura 11*, con el método HWL, usado por Appeaning, 2018 y se presentan en la *Figura 15*. Para el análisis de estas, se dividirá la espiga en tres zonas: Norte, centro y Sur.

Posteriormente se realizó el ingreso de estas líneas de costa a la herramienta DSAS (*Figura 16*) donde se obtuvieron 90 transectos espaciados cada 10 metros a lo largo de la línea base. Cada transecto arrojó seis puntos de intersección correspondientes a las seis líneas de costas introducidas, entregando un total de 540 puntos de intersección, a partir de los cuales el software realiza los cálculos.



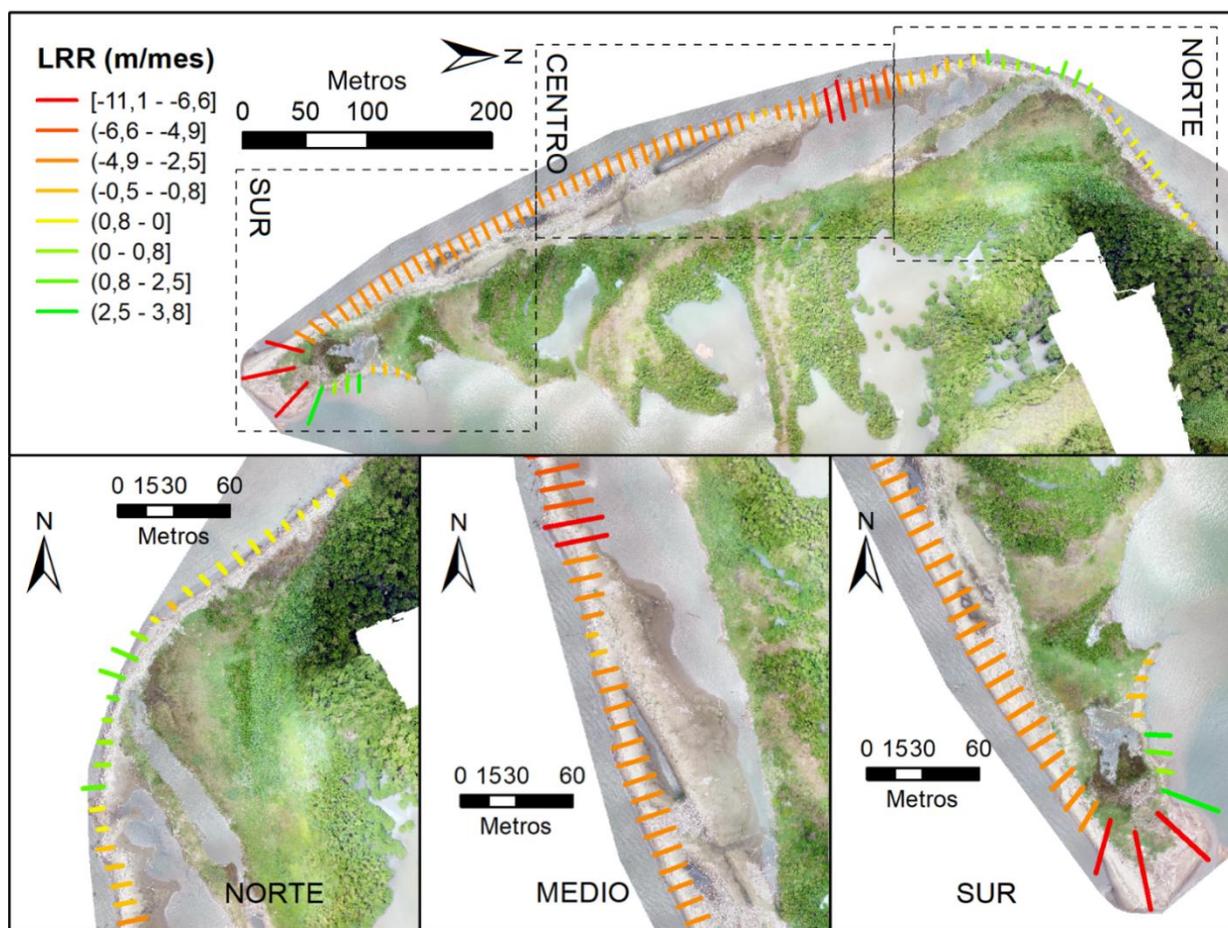
**Figura 15.** Líneas de costa digitalizadas. En la parte superior a una escala de 1:6000 y en la parte inferior con escala de 1:4000. Fuente: Elaboración propia, 2021.



**Figura 16.** Elementos vectoriales de DSAS usados en Punta Rojas. Fuente: Elaboración propia, 2021.

La zona Norte de la espiga fue la que presentó menos cambios durante el periodo de estudio, teniendo una tasa de regresión lineal (LRR) promedio de 0,41 m/mes, con zonas de avance de línea de costa con entre 0,07 y 1,88 m/mes y retrocesos entre -0,14 y -2,30 metro/mes. El factor NSM indicó un desplazamiento neto promedio de la línea de costa para la parte Norte de -2,10 m, con máximos de 8,14 y -10,41 m de avance y retroceso, respectivamente.

El área central tuvo una tendencia de retroceso en toda su extensión de línea de costa, con una tasa de regresión lineal promedio de -3,90 m/mes y un valor máximo de -7,87 m/mes. El desplazamiento neto promedio de la línea de costa en este sector fue de -15,22 metros y tuvo un máximo de -31,36 metros.



**Figura 17.** Estadístico LRR. Las tasas se presentan en metros por mes. Fuente: Elaboración propia, 2021.

El Sur de la espiga es la zona del área de estudio más cambiante y a su vez es la zona de mayor interés para este trabajo, pues es allí donde se evidencia de mejor manera las tendencias cambiantes del área de estudio en general. Se encontró un LRR promedio de  $-3,17$  m/mes, con tasas máximas de retroceso de  $-11,1$  m/mes en el extremo de la espiga y tasas máximas de avance de  $3,77$  m/mes en el costado Este, el cual podría ser asociado a reubicación de sedimentos en este extremo de la espiga. El factor NSM indicó un desplazamiento neto promedio de la línea de costa para la parte Sur de  $-11,7$  m, con máximos de  $12,25$  y  $-42,70$  m de avance y retroceso, respectivamente.

De manera general, como se vio en la sección anterior, la dinámica sedimentaria de la espiga está influenciada por las dos épocas climáticas del año, teniendo pérdida sedimentaria y retrocesos en la línea de costa durante la época húmeda y ganancia sedimentaria y avances de línea de costa en época seca. Este estudio se realizó durante la época húmeda, hasta la época de transición.

## 6 Conclusiones

El procesamiento fotogramétrico de imágenes obtenidas con vehículos aéreos no tripulados se mostró práctico y eficiente para el monitoreo de línea de costa, logrando obtener imágenes aéreas de alta resolución y una excelente precisión geoespacial conseguida con el adecuado uso de los puntos de control terrestre.

Además de ser eficiente para el levantamiento de línea de costa, las imágenes aéreas obtenidas con UAVs permitieron identificar el entorno geomorfológico del área de estudio, pudiendo vincular las condiciones geomorfológicas al monitoreo.

La alta resolución obtenida con el procesamiento fotogramétrico, permitió una fácil y detallada digitalización de la línea de costa, esto debido al tamaño de pixel de 2,55 cm (promedio) obtenido en este trabajo, posibilitando un gran zoom y calidad de imagen que permite identificar claramente la línea de costa, alcanzando valores estadísticos más precisos y específicos.

De manera general, la tendencia de la espiga Punta Rojas es de crecimiento, el cual se presenta como un comportamiento cíclico de retroceso y avance, asociado a las épocas húmeda y seca, respectivamente. Durante el periodo de estudio, llevado a cabo durante la época húmeda, se encontraron tasas de retrocesos medias de -2,66 m/mes (LRR) y un desplazamiento neto promedio de -10,40 m (NSM).

## 7 Referencias Bibliográficas

- Aguilar, F. J., Fernández, I., Casanova, J. A., Ramos, F. J., Aguilar, M. A., Blanco, J. L., & Moreno, J. C. (2017). 3D Coastal Monitoring from very dense UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. *Springer International Publishing AG*.
- Ai, B., Zhang, H., Ma, C., & Gu, F. (2019). Dynamic process and artificial mechanism of coastline change in the Pearl River Estuary. *Regional Studies in Marine Science*.
- Alcántara, J., Caicedo, A., Hernández, J. C., Jaramillo, A., & Manzolli, R. (2019). Sediment Bypassing from the New Human-Induced Lobe to the Ancient Lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea). *Journal of Coastal Research*.
- ANCORIM. (2017). *Soluciones alternativas para la protección de las costas*. Galicia (España): BRGM (Francia).
- Appeaning, K. (2018). Assessing ocean wave dynamics, potential sediment transport, and coastal erosion along Accra coast in Ghana. *Tropical Coastal and Estuarine Dynamics. Journal of Coastal Research*.
- Cao, W., Zhou, Y., Li, R., & Li, X. (2020). Mapping changes in coastlines and tidal flats in developing islands using the full time series of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*.
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.*
- Correa, I. D., Alcántara, J., & Gónzales, D. A. (2005). Historical and recent shore erosion along the colombian Caribbean coast. *Journal of Coastal Research*.

- Douglas, B. C., & Crowell, M. (2000). Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*.
- Drummond, C. D., Harley, M. D., Turner, I. L., A. Matheen, A. N., & Glamore, W. C. (2015). UAV Applications to Coastal Engineering. *Australasian Coasts & Ports Conference*.
- García-Valencia, C. (2007). *Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó*. Santa Marta, Colombia: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N°12.
- Guzman, W., Posada, B., Guzman, G., & Morales, D. (2008). Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia – PNIEC – Plan de Acción 2009 – 2019.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report*.
- Hoyos, N., Acosta, S., & Correa, I. D. (2006). Sistema de información geográfica para el estudio de la erosión litoral en el Departamentode Córdoba, Colombia: Herramientas de diseño, implementación y uso. *Gestión y Ambiente*.
- INVEMAR. (1998). Informe del estado de los ambientes marinos y costeros. *Programa SINAM*.
- King, S., Leon, J., Mulcahy, M., Jackson, L. A., & Corbett, B. (2017). Condition survey of coastal structures using UAV and photogrammetry.
- Lapucha, D., & Maynard, K. L. (1992). Investigation of the real-time accuracy of the DGPS method. *U.S. Army Topographic Engineering Center, Engineer Research and Development Center (U.S.)*.

- Marfil, A. (2020). Detección de la línea de costa gaditana mediante datos de imágenes satélite SAR y LiDAR. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla*.
- Mazorra, J. J. (2004). Geomorfología y dinámica de la franja costera entre Punta Arboletes y Cristo Rey, Departamento de Córdoba.
- Molina Flórez, L. G., Osorio Arias, A. F., & Otero Díaz, L. J. (2014). Capacidad de transporte potencial longitudinal de sedimentos a escala intra-anual en Punta Yarumal, delta del río Turbo, golfo de Urabá, a partir de la simulación de un clima marítimo. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*.
- Mosso Aranda, C. (2004). Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa. *Tesis Doctorales en Xarxa*.
- Nikolakopoulos, K., Koazrski, D., & Kogkas, S. (2017). Coastal areas mapping using UAV photogrammetry. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing*.
- NOAA. (s.f.). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Ordaz, A., Hernández, J. R., Estévez, E., Díaz, C., & Méndez, A. P. (2016). Morfodinámica costera en la playa Bailén, costa sur del occidente de Cuba, entre los años 2003-2013. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*.
- Ortiz Royero, J. C. (2015). Introducción a la oceanografía física.
- Ortíz, M. A., Hernández, J., & Figueroa, J. (2017). Cambios de la línea costera en el delta del río Balsas, Pacífico mexicano, entre los años 1943-2009. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México*.

- Ozcan, O. (2019). Multitemporal analysis of coastal dynamics by high-resolution reconstruction of topography using UAVs. *Fresenius Environmental Bulletin*.
- Posada, B., & Henao, W. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. *Invemar. Serie Publicaciones Especiales No. 13*.
- Poveda, G., & Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *ResearchGate*.
- Puerta, C. A. (2015). Tecnología drone en levantamientos topográficos.
- Rangel, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe colombiana. *Gestión y Ambiente*.
- Rangel, N. G., Anfuso, G., & Thomas, A. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*.
- Restrepo, A., Agudelo, P., Tejada, C., Morales, 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*.
- Restrepo, I., Ojeda, G., & Correa, I. D. (2007). Geomorfología de la plataforma somera del departamento de Córdoba, costa Caribe colombiana. *Boletín de Ciencias de la Tierra*.
- Robertson, K., & Martínez, N. (1999). Cambios del nivel del mar durante el holoceno en el litoral Caribe colombiano. *Cuadernos de Geografía*.
- Saleem, A., & Awange, J. L. (2019). Coastline shift analysis in data deficient regions: Exploiting the high spatio-temporal resolution Sentinel-2 products. *Catena*.

Sánchez, A., & Jimenez, J. A. (1994). Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera.

*Ingeniería del Agua.*

# **ANEXO 1**

Mapa con las ortofotos obtenidas con UAVs.





76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

8°7'20"N

8°7'10"N

8°7'0"N

8°6'50"N

8°7'20"N

8°7'10"N

8°7'0"N

8°6'50"N



Proyecto:  
**Trabajo de Grado**  
**Ortofoto Punta Rojas**  
**20 oct. 2019**

Departamento: Antioquia  
 Municipio: Turbo  
 Sector: Punta Yarumal

Escala: 1:4.500

**Autor: Rojas, J. A.**



**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**  
 1803



Source: EDS, USDA, CESS, AERONAV, INM, and the GIS User Community

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

8°7'20"N

8°7'20"N

8°7'10"N

8°7'10"N

8°7'0"N

8°7'0"N

8°6'50"N

8°6'50"N



Proyecto:  
**Trabajo de Grado**  
**Ortofoto Punta Rojas**  
**03 nov. 2019**

Departamento: Antioquia  
 Municipio: Turbo  
 Sector: Punta Yarumal

Escala: 1:4.500

**Autor: Rojas, J. A.**



**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**  
 1803



Source: EDS, USDA, CBOS, AERIALS, 1971, and the GIS User Community

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

8°7'20"N

8°7'20"N

8°7'10"N

8°7'10"N

8°7'0"N

8°7'0"N

8°6'50"N

8°6'50"N



Proyecto:  
**Trabajo de Grado**  
**Ortofoto Punta Rojas**  
**14 dic. 2019**

Departamento: Antioquia  
Municipio: Turbo  
Sector: Punta Yarumal

Escala: 1:4.500

Autor: Rojas, J. A.



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**  
1803

**GOLFO DE  
URABÁ**



TURBO

TURBO

**MAR CARIBE**

**PANAMÁ**

**COLOMBIA**



Bolivar

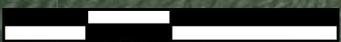
Sucre

Cordoba

Choco

Antioquia

0 50 100 200



**Metros**

Source: E  
DS, USDA, ESRI, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

8°7'20"N

8°7'20"N

8°7'10"N

8°7'10"N

8°7'0"N

8°7'0"N

8°6'50"N

8°6'50"N



Proyecto:  
**Trabajo de Grado**  
**Ortofoto Punta Rojas**  
**12 ene. 2020**

Departamento: Antioquia  
 Municipio: Turbo  
 Sector: Punta Yarumal

Escala: 1:4.500

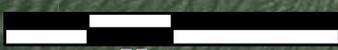
**Autor: Rojas, J. A.**



**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**  
 1803



0 50 100 200



Metros

Source: EDS, USDA, CESS, AGRICOLA, ISM, and the GIS User Community

76°45'40"W

76°45'30"W

76°45'20"W

# **ANEXO 2**

Datos obtenidos en la herramienta DSAS

**DATOS OBTENIDOS DE DSAS PARA LA ZONA NORTA DE PUNTA ROJAS**

<b>ID</b>	<b>Transecto ID</b>	<b>Intersecciones</b>	<b>NSM</b>	<b>LRR/Año</b>	<b>LRR/Mes</b>
1	3	6	-4,047909677	-13,61206813	-1,118800121
2	4	6	-3,383656044	-9,914304528	-0,814874345
3	5	6	-2,719404758	-6,414993014	-0,5272597
4	6	6	-2,05515335	-6,062390316	-0,498278656
5	7	6	-1,668598792	-5,187126012	-0,426339124
6	8	6	-1,833701951	-8,996939889	-0,739474511
7	9	6	-2,783302403	-9,518581416	-0,782349157
8	10	6	-2,184651574	-7,12776019	-0,585843303
9	11	6	-1,041270889	-4,368321122	-0,359040092
10	12	6	-0,772352731	-6,138987977	-0,504574354
11	13	6	-1,521483024	-8,915843553	-0,732809059
12	14	6	-3,955776956	-10,05433246	-0,82638349
13	15	6	-2,902511485	-5,836693133	-0,479728203
14	16	6	-3,321501074	0,891064445	0,073238174
15	17	6	0,849675656	18,20111884	1,495982371
16	18	6	0,036404172	17,1537965	1,409901082
17	19	6	2,439804676	10,81244449	0,888694068
18	20	6	1,026708862	3,355163138	0,275766833
19	21	6	1,995468581	3,453789569	0,283873115
20	22	6	2,659129687	4,044640447	0,332436201
21	23	6	<b>8,138062025</b>	<b>22,8197556</b>	<b>1,875596351</b>
22	24	6	0,005044638	-1,652636469	-0,135833134
23	25	6	-2,68670629	-7,573690881	-0,622495141
24	26	6	-8,521306784	-25,31174097	-2,080417066
25	27	6	-8,326724741	-25,25984249	-2,076151437
26	28	6	-9,718398844	<b>-27,93135861</b>	<b>-2,295728105</b>
27	29	6	<b>-10,41481369</b>	-26,73470876	-2,197373322
<b>PROMEDIOS</b>		<b>6</b>	<b>-2,100330621</b>	<b>-5,032612848</b>	<b>-0,413639412</b>

**DATOS OBTENIDOS DE DSAS PARA LA ZONA CENTRO DE PUNTA ROJAS**

<b>ID</b>	<b>Transecto ID</b>	<b>Intersecciones</b>	<b>NSM</b>	<b>LRR/Año</b>	<b>LRR/Mes</b>
28	30	6	-14,84780952	-44,86941243	-3,687896912
29	31	6	-22,81837619	-75,75430355	-6,226381114
30	32	6	-22,07691213	-68,17965298	-5,603807095
31	33	6	-22,56543695	-67,9722453	-5,586759887
32	34	6	-25,11755435	-72,54449956	-5,962561608
33	35	6	<b>-31,36431845</b>	<b>-95,79046951</b>	<b>-7,873189275</b>
34	36	6	-27,32844658	-81,85828882	-6,728078533

35	37	6	-16,22593114	-50,7264592	-4,169298017
36	38	6	-14,47916634	-43,03217254	-3,536890894
37	39	6	-13,78322392	-39,17279875	-3,219682089
38	40	6	-10,22644715	-30,4068191	-2,499190611
39	41	6	-5,093272013	-19,50009375	-1,602747431
40	42	6	-7,040003444	-24,38664843	-2,004382063
41	43	6	-12,65420141	-42,2471424	-3,472367868
42	44	6	-13,67332389	-42,23199472	-3,471122854
43	45	6	-13,39802315	-39,08742104	-3,212664743
44	46	6	-12,27768971	-36,74073328	-3,019786297
45	47	6	-15,90572321	-50,99444465	-4,191324218
46	48	6	-16,29650224	-53,26478176	-4,377927268
47	49	6	-16,90121488	-50,43943069	-4,145706632
48	50	6	-15,82580819	-50,43780068	-4,145572658
49	51	6	-16,75548972	-50,35047717	-4,138395384
50	52	6	-16,19469996	-48,41834025	-3,979589609
51	53	6	-14,86398304	-48,28650195	-3,968753585
52	54	6	-13,75829704	-47,30050436	-3,887712687
53	55	6	-10,95810497	-42,32229343	-3,478544666
54	56	6	-13,000637	-43,58521102	-3,582346111
55	57	6	-12,30651255	-40,07106566	-3,293512246
56	58	6	-11,05369396	-33,44872477	-2,749210255
57	59	6	-10,58579537	-32,54223622	-2,674704347
58	60	6	-11,36392169	-37,60606397	-3,090909367
59	61	6	-13,05246672	-41,47809797	-3,409158737
60	62	6	-14,71316925	-44,96514573	-3,695765402
61	63	6	-13,18168187	-43,95808416	-3,612993219
62	64	6	-12,8832465	-39,54677612	-3,250419955
63	65	6	-12,82185381	-40,49472596	-3,32833364
64	66	6	-14,54434134	-43,84667453	-3,603836262
65	67	6	-14,85832445	-42,58225466	-3,499911342
66	68	6	-15,1656041	-43,77850796	-3,598233531
67	69	6	-16,80726801	-53,08828039	-4,363420306
<b>PROMEDIOS</b>		<b>6</b>	<b>-15,21921191</b>	<b>-47,43268949</b>	<b>-3,898577218</b>

**DATOS OBTENIDOS DE DSAS PARA LA ZONA SUR DE PUNTA ROJAS**

<b>ID</b>	<b>Transecto ID</b>	<b>Intersecciones</b>	<b>NSM</b>	<b>LRR/Año</b>	<b>LRR/Mes</b>
68	70	6	-15,7434095	-54,04834017	-4,442329329
69	71	6	-14,47407995	-51,92394705	-4,267721675
70	72	6	-16,14537123	-56,95477352	-4,681214262

71	73	6	-15,40984949	-52,65062791	-4,327448869
72	74	6	-14,79575571	-50,1038425	-4,118124041
73	75	6	-15,35792778	-50,81616886	-4,176671413
74	76	6	-16,09052135	-50,43124325	-4,145033692
75	77	6	-14,86470751	-46,0960714	-3,788718197
76	78	6	-13,12900626	-41,5039971	-3,411287433
77	79	6	-13,90421657	-48,68098943	-4,001177214
78	80	6	-15,10641386	-46,75320338	-3,842729045
79	81	6	-16,71731017	-51,06557343	-4,197170419
80	82	6	-21,6519641	-86,12568393	-7,078823337
81	83	6	<b>-42,69570937</b>	<b>-135,0483404</b>	<b>-11,0998636</b>
82	84	6	-34,32305011	-111,21566	-9,141013153
83	85	6	0,92281258	<b>45,92120909</b>	<b>3,774345952</b>
84	86	6	3,195804024	8,018525241	0,659056869
85	87	6	11,14960511	26,75027869	2,198653043
86	88	6	<b>12,25317164</b>	31,52873162	2,591402599
87	89	6	-3,980430067	-13,42727642	-1,10361176
88	90	6	-6,362222592	-26,06121682	-2,142017821
89	91	6	-4,209051725	-16,47501364	-1,35411071
90	92	6	-2,638094533	-10,01451315	-0,82311067
<b>PROMEDIOS</b>		<b>6</b>	<b>-11,74250863</b>	<b>-38,57294512</b>	<b>-3,170379051</b>

<b>DATOS GENERALES DE LA ESPIGA PUNTA ROJAS</b>			
<b>ESTADISTICO</b>	<b>PROMEDIO</b>	<b>MAX RETROCESO</b>	<b>MAX AVANCE</b>
LRR ( <i>m/mes</i> )	-2,66700079	-11,0998636	3,774345952
NSM ( <i>m</i> )	-10,3950567	-42,69570937	12,25317164