



Análisis de las características fisicoquímicas del sustrato de la vegetación en tres sectores de línea de costa en Bahía Colombia, Turbo Antioquia. Caso de estudio

Tatiana Correa Quiñones

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafa

Directora

Alba Cecilia Bustamante Caro, *Magíster (MSc)* Geomorfología y Suelos

Asesor

Pedro Pablo Vallejo, *Doctor (PhD)* Ciencias del Mar

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Oceanografía

Turbo, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Correa Quiñones, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Correa Quiñones, T. (2024). *Análisis de las características fisicoquímicas del sustrato de la vegetación en tres sectores de línea de costa en Bahía Colombia, Turbo Antioquia. Caso de estudio* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

En memoria del profesor Iván Darío Correa Arango, quien con su sabiduría y guía inspiró este trabajo

Agradecimientos

A mi mamá y hermana, por su amor y apoyo incondicional

A mis amigos, Alejandro Zapata y Víctor Rueda por su amistad y apoyo, a Diomer Tobón y Wilmer David por su apoyo en campo.

A mis asesores, especialmente a la profe Alba Cecilia Bustamante por su invaluable guía académica, por compartir sus conocimientos y experiencias, y por su dedicación para encaminarme en el desarrollo exitoso de esta investigación.

Finalmente, mi gratitud a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido en la culminación de este importante logro académico y personal.

Al proyecto PIMECLA, al DAGRAN y a la Universidad de Antioquia por creer en mí y en este proyecto.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	15
Área de Estudio y Metodología.....	16
Fase de campo	17
Levantamiento de imágenes.....	18
Levantamiento puntos de control.....	18
Obtención de núcleos de sustrato.....	19
Obtención de muestras de sustrato orgánico y arena	20
Fase de procesamiento	20
Procesamiento de imágenes	20
Digitalización de la línea de vegetación	21
Procesamiento núcleos de sedimentos	21
Procesamiento muestra de sustrato superficial (Marirrío).....	24
Análisis estadísticos	24
Análisis del cambio de las líneas de costa vegetadas	24
Análisis granulométrico	25
Resultados	25
Ortofotos Bahía Colombia	25
Evolución de la línea de costa	25
Transecto Marirrío 2009-2023	26

Transecto Leoncito 2009-2023	27
Transecto Leoncito 2021-2023	28
Transecto Desembocadura río Suriquí 2009-2023	29
Granulometría de las muestras de arena.....	31
Descripción de núcleos.....	32
Descripción general de las zonas de muestreo.....	32
Núcleo 1	32
Resultados muestra de sustrato de Marirríó.....	35
Núcleo 2	36
Núcleo 3	39
Núcleo 4.....	42
Núcleo 5	46
Núcleo 6.....	50
Análisis.....	53
Conclusiones	55
Recomendaciones.....	56
Referencias	57

Lista de tablas

Tabla 1: Protocolos de análisis de laboratorio para la muestra de sustrato. Fuente Laboratorio de suelos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín	24
Tabla 2: Fecha, año y longitud de LC para cada transecto	26
Tabla 3: Áreas de erosión y acreción, transecto Marirríó 2009-2023.	27
Tabla 4: Áreas de erosión y acreción, transecto Leoncito 2009-2023.	28
Tabla 5: Áreas de erosión y acreción, transecto Leoncito 2021-2023.	29
Tabla 6: Áreas de erosión y acreción, transecto Desembocadura rio Suriquí 2009-2023.	30
Tabla 7: Resultados análisis muestra del sustrato de suelo de Marirríó.....	35

Lista de figuras

Figura 1: Área de estudio. Localización de Bahía Colombia: Fuente World Imagery 2009.	16
Figura 2: Ubicación los núcleos y transectos de muestreo. Fuente: World Imagery 2009	17
Figura 3: Planes de vuelo: a. transecto Marirrí, b. transecto Leoncito, c-transecto desembocadura río Suriquí. Fuente: DroneDeploy, Diomer Tobón	18
Figura 4: Punto de control (rojo y amarillo). Fuente Cecilia Bustamante	19
Figura 5: Etapa de campo a. LC con especies muertas. b. obtención de núcleo. C. sustrato de la vegetación en la línea de costa. Fuente Cecilia Bustamante	20
Figura 6:: Digitalización línea de vegetación. Fuente PIMECLA 2023.	21
Figura 7: Núcleos.	22
Figura 8: Proceso LOI. a. muestra seca; b. muestra macerada; c. muestras secas y maceradas; d. muestras calcinadas a 550°C; e. muestras calcinadas a 900°C.	23
Figura 9: Ortofotos Bahía Colombia: a. ortofoto Marirrí; b. ortofoto Leoncito; c. ortofoto desembocadura río Suriquí.....	25
Figura 10: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Marirrí 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009	26
Figura 11: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Leoncito 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009.	27
Figura 12: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Leoncito 2021-2023. Fuente: PIMECLA 2021 - 2023, World Imagery 2009.	28
Figura 13: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto desembocadura río Suriquí 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009.....	29
Figura 14: Evolución histórica del delta del Atrato entre 1807 y 1999. Mosaico de imágenes del satélite Spot (escenas 639-333 y 639-334) adquiridas en modo XS el 12 de noviembre de 1989. Georeferenciación en UTM Bogotá observatory (Colombia). Realización: O. Geff.....	30
Figura 15: Clasificación granulométrica triangulo de Folk, núcleo 4 (N4 punto rojo) y núcleo 6 (N6 punto azul).....	31
Figura 16: sitio de muestreo núcleo 1, 10/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	33

Figura 17: Columna estratigráfica núcleo 1 Marirrío.....	34
Figura 18: sitio de muestreo núcleo 2, 10/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	36
Figura 19: Columna estratigráfica núcleo 2.	37
Figura 20: sitio de muestreo núcleo 3, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	39
Figura 21: Columna estratigráfica núcleo 3.	40
Figura 22: sitio de muestreo núcleo 4, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	42
Figura 23: Columna estratigráfica núcleo 4	43
Figura 24: sitio de muestreo núcleo 5, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	46
Figura 25: Columna estratigráfica núcleo 5.	47
Figura 26: sitio de muestreo núcleo 6, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante	51
Figura 27: Columna estratigráfica núcleo 6.	51
Figura 28: Transectos con el núcleo correspondiente y vegetación sobre ese sustrato.....	54

Siglas, acrónimos y abreviaturas

BC	Bahía Colombia
Da	Densidad aparente
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
Fibras	Partes de los tejidos vegetales en los materiales orgánicos de suelo (excluyendo a las raíces vivas)
LC	Línea de costa
LOI	Loss on ignition: pérdida por ignición: método analítico para determinar composición de minerales o de suelos
Materiales fíbricos	Material menos descompuesto con $\frac{3}{4}$ partes o más de fibras
Materiales hémicos	Material con contenido de fibras y grado de descomposición intermedio
Materiales sápricos	Material con el mayor grado de descomposición y menor contenido de fibras
UdeA	Universidad de Antioquia
MO	Materia orgánica
NSM	Net Shore Movement: Movimiento neto de línea de costa
PIMECLA	Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño

Resumen

Bahía Colombia ubicada al suroeste del Golfo de Urabá, alberga una rica biodiversidad de ecosistemas intermareales con predominio de bosques de manglar (*Rhizophora Mangle*), panganales (*Raphia taedigera*), arracachales (*Montrichardia arborescens*) y ranconchales compuestos por helecho de manglar o matatigre (*Acrostichum aureum*), (Urrego *et al.*, 2016) que brindan gran diversidad de servicios ecosistémicos como protección costera, hábitat de diversas especies, regulación del clima, fuente de recursos para las comunidades locales etc. Sin embargo, el cambio de las características del sustrato de los ecosistemas en la línea de costa está afectando las condiciones necesarias para el desarrollo de la vegetación favoreciendo al proceso de erosión costera, un proceso natural intensificado por la actividad antrópica que amenaza la conservación de estos ecosistemas. En este trabajo se abordó la evolución de la línea de costa de tres transectos (Marirrío, Leoncito y Desembocadura Río Suriquí) entre el año 2009 y 2023 mediante análisis fotogramétrico y se evaluaron las características fisicoquímicas del sustrato de la vegetación de la línea de costa con procesos de erosión costera mediante análisis fisicoquímicos (pH, MO, CO, Al, Ca, Mg, K, CICE, P, Fe, Mn, Cu, Z, B, Carbonatos, densidad aparente y granulometría) y estratigráficos de los núcleos y muestras colectadas. El estudio reveló tasas de erosión de 2.14 m/a, 2.35 m/a y 4.9 m/a para los transectos de Marirrío, Leoncito y Desembocadura Río Suriquí, evidenciando una relación entre el retroceso (migración) tierra adentro de los ecosistemas naturales del litoral en Bahía Colombia y el retroceso (migración) de la línea de costa, mediada por cambios en las características del sustrato, donde el contenido de materia orgánica (turba de madera y raíces de herbáceas), carbonatos y densidad aparente del sustrato son diferentes entre los sitios con vegetación conservada (menor retroceso de LC) y los sitios con degradación o muerte de la vegetación (mayor retroceso de LC).

Palabras clave: erosión, sustrato, línea de costa

Abstract

Bahía Colombia located to the SW of the Gulf of Urabá, harbors a rich biodiversity of intertidal ecosystems dominated by mangrove forests (*Rhizophora Mangle*), panganales (*Raphia taedigera*), arracachales (*Montrichardia arborescens*) and ranconchales composed of mangrove fern or matatigre (*Acrostichum aureum*), (Urrego *et al.*, 2016) that provide a great diversity of ecosystem services such as coastal protection, habitat for diverse species, climate regulation, source of resources for local communities, etc. However, the change in the characteristics of the substrate of the ecosystems along the coastline is affecting the conditions necessary for the development of vegetation, favoring the process of coastal erosion, a natural process intensified by anthropic activity that threatens the conservation of these ecosystems. This study assessed the coastline evolution of three transects (Marirrió, Leoncito and Desembocadura Río Suriquí) between 2009 and 2023 using photogrammetric analysis and the physicochemical characteristics of the substrate of the vegetation of the coastline with coastal erosion processes were evaluated through physicochemical analysis (pH, MO, CO, Ca, Mg, K, CICE, P, Fe, Mn, Cu, Z, B, carbonates, bulk density and grain size) and stratigraphic analyses of cores and samples collected. The study revealed erosion rates of 2.14 m/a, 2.35 m/a and 4.9 m/a for the Marirrió, Leoncito and Desembocadura Río Suriquí transects respectively, evidencing a relationship between the landward retreat (migration) of the natural coastal ecosystems in Bahía Colombia and the retreat (migration) of the coastline, mediated by changes in substrate characteristics, where the content of organic matter (wood peat and herbaceous roots), carbonates and bulk density of the substrate differ between sites with conserved vegetation (lower LC retreat) and sites with vegetation degradation or death (higher LC retreat).

Keywords: erosion, substrate, shoreline

Introducción

La erosión costera es un proceso de ámbito global reflejado en el retroceso o pérdida de línea de costa (LC), esta se desplaza gradual o abruptamente hacia tierra adentro por factores hidrodinámicos como vientos, tormentas, olas, mareas, corrientes litorales, aumento del nivel del mar y presión antrópica, provocando a largo plazo pérdida de sedimentos, rocas y vegetación en la línea litoral (Guzmán *et al.*, 2008).

La LC es el límite dinámico entre la tierra y el mar, determinado por la acción de las olas y las mareas, sin embargo, la definición de LC es un criterio que establece el investigador (Boak & Turner, 2005) y según su morfología pueden distinguirse:

- costas bajas: predominan procesos acumulativos, agrupa geoformas como playas, planicies intermareales y zonas de inundación, la LC se define por la media de la marea alta, el nivel medio del mar o por la línea de vegetación en costas vegetadas.
- costas elevadas: predominan procesos erosivos, agrupa geoformas como terrazas marinas, plataformas de abrasión elevada, colinas, serranías o paisaje montañoso, en estos relieves la LC está definida por la base del acantilado o del relieve.

La definición anterior fue usada por Prüssmann (2012) para clasificar las costas del golfo de Urabá, estas costas, particularmente en Bahía Colombia son planicies intermareales con vegetación de bosques de manglar (*Rhizophora Mangle*), panganales (*Raphia taedigera*), arracachales (*Montrichardia arborescens*) y ranconchales compuestos por helecho de manglar o matatigre (*Acrostichum aureum*), (Urrego *et al.*, 2016).

Los panganales y arracachales son frecuentes en el extremo suroeste de bahía Colombia, pero también están asociados a los manglares, estas especies colonizan sitios con inundación permanente: bordes de ríos, ciénagas, caños y estuarios con baja dinámica del oleaje; en estos sitios, sobre el suelo fangoso se acumula el material proveniente de la vegetación cuya tasa de acumulación es mayor a la tasa de descomposición, creando un sustrato blando, lodoso, muy poroso, con baja oxigenación y moderadamente a extremadamente ácido, conocido como turbera, dando lugar a la formación de suelos hídricos o de humedales (USDA & NRCS, 2018; Moreno, *et al.*, 2004; Rao, 1987).

La erosión costera entendida como una pérdida de línea de costa, también es una amenaza para estos ecosistemas de vegetación hidrófila, específicamente Bahía Colombia a pesar de estar protegida dentro del golfo de Urabá y sin centros poblados, presenta procesos erosivos evidenciados en retroceso de la LC y migración de la 8 vegetación hacia terreno consolidado (PIMECLA, 2021-2023), estos cambios en la LC pueden estar asociados al ascenso del nivel del mar y al gran aporte de sedimentos que influyen en la variación de las características del sustrato donde se establece el manglar.

El fenómeno de la erosión es generalizado en el litoral caribe (Gobernación de Antioquia [Gob.ANT], Universidad de Antioquia [UdeA], Universidad Nacional [UNAL], Universidad del Norte [UNINORTE], 2021; Posada & Henao, 2008; Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, PIMECLA, 2021-2023; Thomas *et al.*, 2007), se tienen reportes para la LC del caribe colombiano de 48,3% de litoral en retroceso, 18,4% con acreción y 33,2% con condiciones estables para el período comprendido entre los años 1980 – 2014 (Rangel *et al.*, 2015).

La pregunta central de este trabajo es saber cómo influye el cambio en las características del sustrato en la conservación de los ecosistemas naturales de Bahía Colombia.

Objetivos

Objetivo general

Relacionar la migración tierra adentro de los ecosistemas naturales del litoral en Bahía Colombia con la migración (retroceso) de la línea de costa.

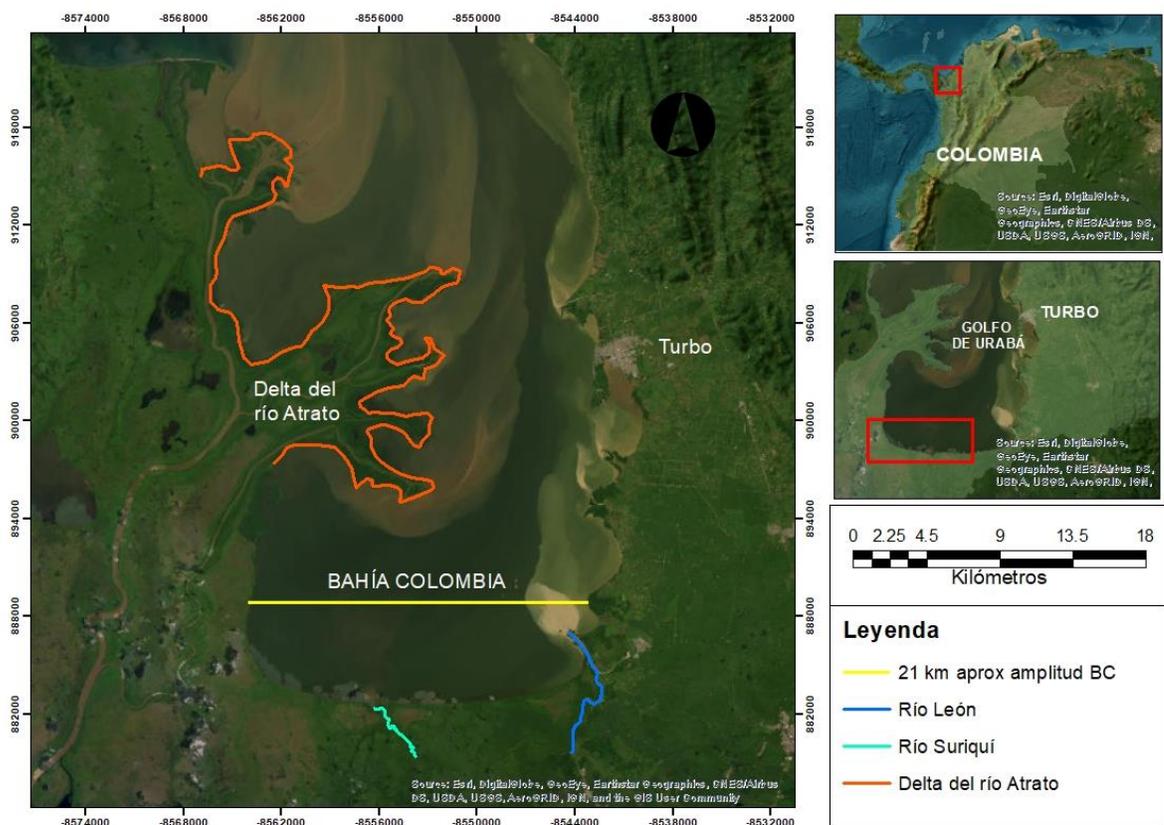
Objetivos específicos

- Analizar el contenido de materia orgánica, carbonatos y densidad aparente del sustrato en sitios con vegetación conservada y sitios con degradación de la vegetación
- Identificar las condiciones necesarias del sustrato para el establecimiento de los ecosistemas naturales en la línea de costa.
- Relacionar el deterioro de los ecosistemas analizados con el cambio del sustrato
- Determinar el movimiento neto de la línea de costa entre los años 2009 y 2023 en los transectos muestreados

Área de Estudio y Metodología

Bahía Colombia en el sur del Golfo de Urabá (Turbo, Antioquia) es un accidente geográfico relativamente amplio (figura 1), con una amplitud aproximada de 21 km en dirección Este a Oeste, profundidad máxima de 25 m (Thomas *et al.*, 2007) y con predominancia de ciénagas y ecosistema de manglar (*Rizophora mangle*) en el extremo noroeste y ecosistemas de arracachal (*M. arborescens*), panganal (*R. taedigera*) y ranconchales (*A. aureum*) (Urrego *et al.*, 2016) hacia el suroeste; el delta del río Atrato ha separado la bahía del resto del golfo dejando una franja estrecha entre el delta del río y la línea de costa opuesta al delta (Bernal *et al.*, 2005), este estrechamiento conduce a unas características marino costeras ligeramente diferentes en la bahía a las del resto del golfo (salinidad, oleaje, corrientes, sedimentación, temperatura del agua, etc.). Con un clima tropical húmedo y bajo la influencia de la ZCIT presenta una época de lluvias entre mayo y noviembre y una época seca desde diciembre hasta mediados de abril con predominio de los alisios (Chevillot *et al.*, 1993).

Figura 1: Área de estudio. Localización de Bahía Colombia: Fuente World Imagery 2009.

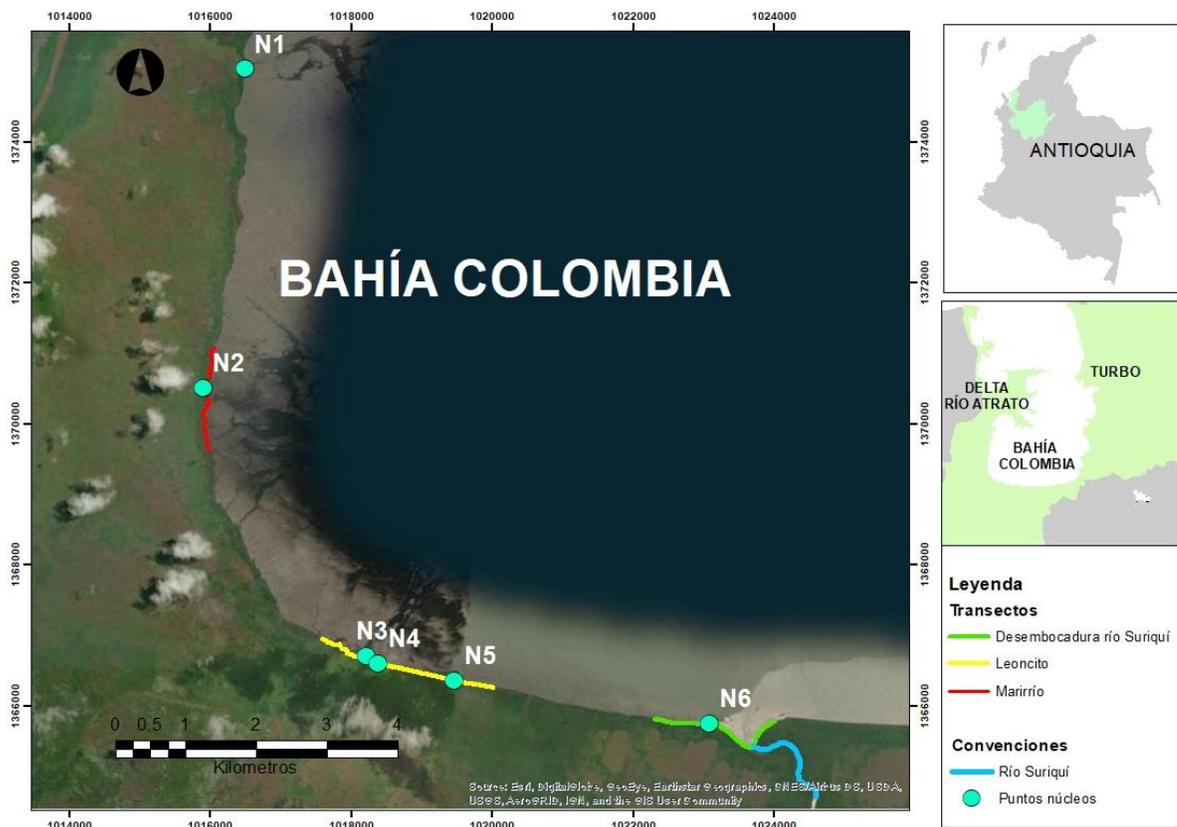


En la bahía desembocan directamente los ríos Suriquí y León, este último aporta una carga promedio de sedimentos de 2,18 kton/día (Montoya & Montoya, 2005), magnitud atribuida principalmente a factores antrópicos como minería, deforestación y aumento de pastizales y monocultivos (Blanco, 2009; Blanco, 2016; Arroyave *et al.*, 2012).

Fase de campo

Se hizo en dos campañas entre el 10 y el 11 de noviembre del 2023 (época de lluvias). El sitio de estudio se seleccionó a partir de las observaciones del retroceso de costa registrado en el monitoreo del litoral del proyecto PIMECLA (2021). Los transectos y los puntos de muestreo seleccionados se ilustran en la figura 2, en color verde se representa el transecto correspondiente a la LC cercana al río Suriquí, en amarillo el transecto del Leoncito, en rojo el transecto de Marirrí, en azul los sitios de obtención de los núcleos.

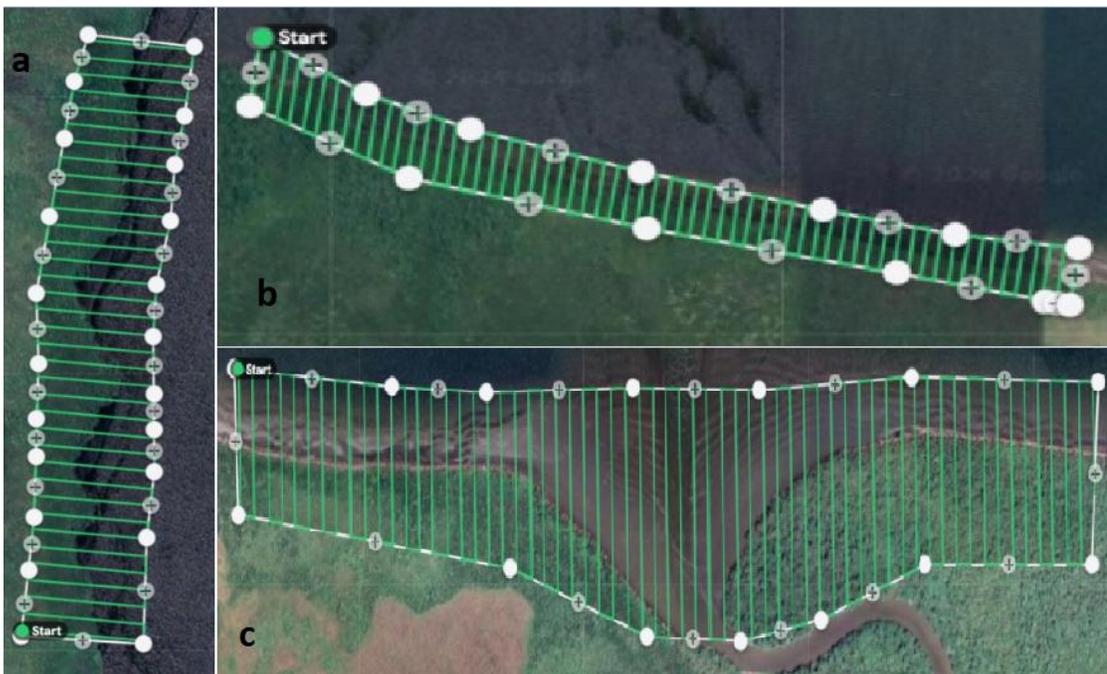
Figura 2: Ubicación los núcleos y transectos de muestreo. Fuente: World Imagery 2009



Levantamiento de imágenes

Las imágenes para medir los cambios en la línea de costa se obtuvieron a partir de múltiples vuelos de un vehículo no tripulado (dron) DJI Mavic pro platinum con sensor de 1/2.3", 12.35 M pixeles efectivos y resolución 4K, especificaciones que proporcionan imágenes de alta calidad y suficiente resolución para obtener una digitalización más precisa de la LC. Los diseños de los planes de vuelo, altura, velocidad y porcentaje de traslape se realizaron con el programa DroneDeploy (figura 3).

Figura 3: Planes de vuelo: a. transecto Marirrío, b. transecto Leoncito, c-transecto desembocadura río Suriquí. Fuente: DroneDeploy, Diomer Tobón



Levantamiento puntos de control

Para lograr una geolocalización centimétrica se ubicaron 4 puntos de control o dianas por transecto (figura 4) en zonas accesibles y con buena visibilidad del cielo. La georreferenciación de los puntos de control se hizo mediante un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS).

Figura 4: Punto de control (rojo y amarillo). Fuente Cecilia Bustamante



Obtención de núcleos de sustrato

Se hizo una descripción general del área de estudio, se incluyeron variables físicas como temperatura, condiciones de inundación del terreno, geomorfología, entre otras.

Se sacaron núcleos del sustrato en 6 sitios ubicados en los tres transectos de la LC, excepto por el núcleo 1 que quedó fuera de los transectos dada la dificultad de ubicar la base del DGPS (figura 2). Los puntos de muestreo se seleccionaron de manera aleatoria según las diferentes características encontradas, bajo la modalidad de mapeo libre o a criterio (Jaramillo, 2002c). La ubicación de los núcleos fue tomada con la aplicación para celular SW Maps (Figura 2)

Para la extracción de los núcleos se usaron tubos de PVC de 1 metro de longitud y 5 cm de diámetro. Los núcleos se rotularon con la fecha y ubicación, se trasladaron en posición vertical hasta su posterior almacenamiento en un congelador a -4°C para su análisis.

En las imágenes de la figura 5 se aprecia una visión general del sitio de trabajo y el proceso de la toma de los núcleos.

Figura 5: Etapa de campo a. LC con especies muertas. b. obtención de núcleo. C. sustrato de la vegetación en la línea de costa. Fuente Cecilia Bustamante



Obtención de muestras de sustrato orgánico y arena

Se obtuvo una muestra superficial simple (no compuesta) representativa del sustrato del manglar mejor conservado, coincidiendo con el sitio de extracción N1 (Figura 2). Se usó un palín para extraer 1 kg de sustrato a 10 cm de profundidad, se rotuló debidamente y se almacenó en una cava hasta su traslado al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín para su análisis. Se obtuvieron dos muestras superficiales simples (no compuestas) de arena, coincidiendo con los sitios de extracción del N4 y N6 (Figura 2), se usó el palín para extraer 1kg de arena a 10 cm de profundidad, se rotuló debidamente y se almacenó en una cava hasta su traslado al laboratorio para el análisis granulométrico.

Fase de procesamiento

Procesamiento de imágenes

Las imágenes obtenidas en campo se procesaron con el programa Pix4Dmapper, con el sistema de coordenadas WGS84 / Magna Colombia Oeste, con tres pasos de procesamiento:

- Procesamiento inicial: verificación de calidad de las imágenes, generación de nube de puntos e ingreso de puntos de control
- Nube de puntos y malla: densificación de nube de puntos, ortorectificación, y mejoramiento del modelo digital del terreno.
- DSM y ortomosaico: obtención del DSM (modelo digital de superficie), del DTM (modelo digital del terreno, del ortomosaico y de las curvas de nivel.

Digitalización de la línea de vegetación

La LC marcada por la vegetación (figura 6) se digitalizó con ArcMap 5.0 de ArcGIS, en formato “shapefile”, para cada una de las ortofotos obtenidas en campo (2023) y para la ortofoto suministrada por Jhoanna Prüssmann (2009).

Figura 6:: Digitalización línea de vegetación. Fuente PIMECLA 2023.



Procesamiento núcleos de sedimentos

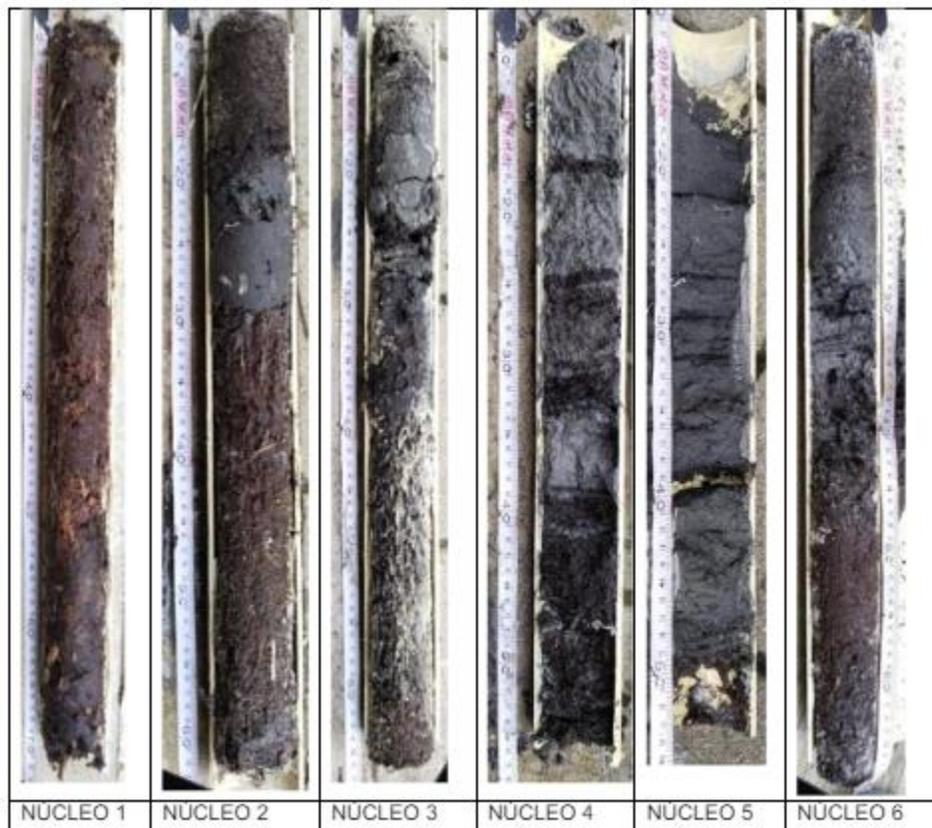
El procesamiento de los núcleos se dividió en dos etapas: estratigrafía y fraccionamiento.

Con una pulidora se realizaron dos cortes longitudinales al tubo de PVC con el fin de acceder al interior del núcleo (figura 7), la mitad del núcleo se guardó como testigo y el otro se usó para el fraccionamiento. La estratigrafía y descripción de cada núcleo se realizó siguiendo las definiciones y criterios según Jaramillo (2002a) y Nichols (2009), posteriormente se graficó en el programa Strater V5. (Golden Software 2018), donde se incluyeron:

- Longitud total del núcleo y de cada capa y/o lámina desde la superficie hasta la base de cada una.

- Color: en húmedo con la carta de colores Munsell color (2009)
- Textura: se determinó por método del tacto, siguiendo los criterios descritos por Yolcubal *et al.*, (2004).
- Granulometría: por tamizaje en seco (Angers & Larney, 2008) y los estadísticos asociados se obtuvieron del “Gradistat versión 9.12” (Blott & Pye, 2001).
- Bioestructura de agregados orgánicos: mediante la observación en el estereoscopio.
- Raíces y estructuras vegetales: por observación directa
- Morfología y Mineralogía de sedimentos: observación directa con estereoscopio y microscopio óptico.

Figura 7: Núcleos.

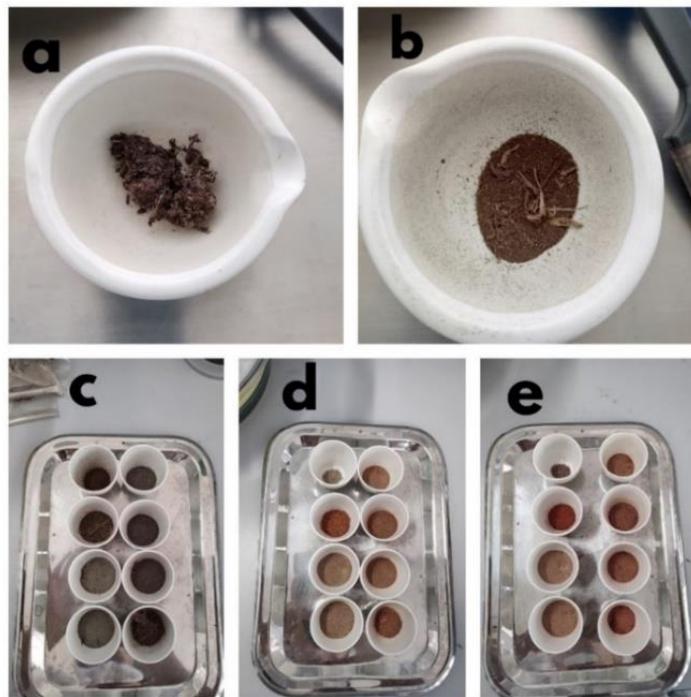


Para obtener las variaciones en profundidad de materia orgánica, carbonatos y densidad aparente, cada núcleo se fraccionó en 10 secciones de 1 cm, considerando las transiciones de capas, color, textura y cambios en la composición. El fraccionamiento se realizó con una lanceta # 20 y las muestras se colocaron en placas de Petri (lavadas y secadas previamente al horno por 1 h a 105°C), las muestras en las placas se sometieron a un proceso de secado en el horno a 105°C por

24 horas, con la finalidad de extraer la humedad y obtener un peso constante. Posterior al secado se maceraron en un mortero de porcelana, se dispusieron en crisoles y se calcinaron en la mufla eléctrica LEF-1 xxS TYPE.

El contenido de materia orgánica y carbonatos se determinó por el método de pérdida por ignición (LOI: loss on ignition) (Heiri *et al.*, 2001), que consiste en calcinar o muflar la muestra a 550°C por 4 horas para destruir la MO por calentamiento ocasionando la oxidación de las formas condensadas de humus y residuos orgánicos apenas alterados, después de calcinarse se deja enfriar la muestra en un desecador y se registra su peso en una balanza electrónica. Para determinar carbonatos, la muestra se lleva nuevamente a la mufla a 900°C por 2 horas, se deja enfriar en desecador y se pesa en la balanza electrónica (figura 8).

Figura 8: Proceso LOI. a. muestra seca; b. muestra macerada; c. muestras secas y maceradas; d. muestras calcinadas a 550°C; e. muestras calcinadas a 900°C.



La densidad aparente se determinó por el cociente entre el peso de la muestra seca (105°C) y el volumen del cilindro (Jaramillo, 2002b)

Procesamiento muestra de sustrato superficial (Marirrió)

La muestra de sustrato orgánico se analizó en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, las variables analizadas y los métodos de análisis se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1: Protocolos de análisis de laboratorio para la muestra de sustrato. Fuente Laboratorio de suelos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Variable	Unidad	LC	Método
pH		-	NTC 5264-2028
Materia orgánica (MO)	%	-	NTC 5526-2007
Carbono orgánico (CO)	%	-	NTC 5403-2013
Calcio (Ca)	cmol(+)/kg	-	NTC 5349-2026
Magnesio (Mg)	cmol(+)/kg	-	NTC 5349-2016
Potasio (K)	cmol(+)/kg	-	NTC 5349-2016
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)	cmol(+)/kg	-	NTC 5268-2014
Fosforo (P)	mg/kg	-	Método interno
Hierro (Fe)	mg/kg	-	NTC 5526-2007
Manganeso (Mn)	mg/kg	-	NTC 5526-2007
Cobre (Cu)	mg/kg	-	NTC 5526-2007
Zinc (Z)	mg/kg	-	NTC 5526-2007
Boro (B)	mg/kg	-	Método interno

Análisis estadísticos

Análisis del cambio de las líneas de costa vegetadas

Se realizó por medio del sistema de análisis digital de línea de costa: DSAS: Digital Shoreline Analysis System V5.0 User Guide (Himmelstoss *et al.*, 2021), que es un complemento de Esri (ArcGIS), mediante los siguientes pasos:

- Creación de la base de datos geográfica (geodatabase) y una clase de características (feature class) para unir las líneas de vegetación digitalizadas.
- Definición de una línea base on-shore para crear automáticamente los transectos perpendiculares a la línea de vegetación, con una distribución específica cada 20 metros.

- Cálculo del movimiento neto de línea de costa NSM: Net Shore Movement, estadístico del DSAS.

Análisis granulométrico

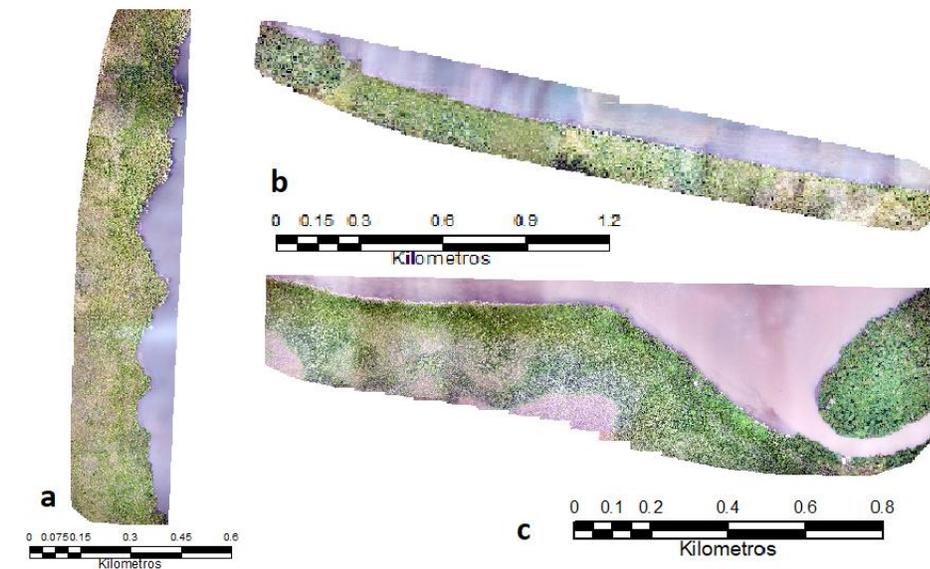
La determinación del tamaño promedio de grano, asimetría, curtosis y distribución de los diferentes tamaños de partículas, después del proceso de tamizado se hizo con el programa gradistat v9.1 (Blott & Pye, 2001), utilizando el método de Folk and Ward (μm).

Resultados

Ortofotos Bahía Colombia

Se obtuvieron 3 ortofotos de la Bahía (figura 9) una por transecto.

Figura 9: Ortofotos Bahía Colombia: a. ortofoto Marirrío; b. ortofoto Leoncito; c. ortofoto desembocadura río Suriquí.



Evolución de la línea de costa

El cambio en las LC para los tres transectos se analizó con respecto a los resultados del corrimiento neto de litoral (NSM), este se representa como la distancia entre las LC del 2009 y las del 2023. La erosión o retroceso de LC se representa en valores negativos y la acreción o ganancia de LC esta con valores positivos. Las tasas de retroceso y acreción se calculan con la longitud promedio de retroceso y acreción divididas por el número de años del período 2009 a 2023, para

el transecto Leoncito se calculan también para el período 2021-2023. La tabla 2 lista la longitud (km) de las LC muestreadas en cada transecto.

Tabla 2: Fecha, año y longitud de LC para cada transecto

Fecha	Transecto	Años	Longitud LC (km)
10/11/2023	Marirrió	2009-2023	1.92
11/11/2023	Leoncito	2009-2023	2.94
17/11/2021	Leoncito	2021-2023	2.94
11/11/2023	Desembocadura río Suriquí	2009-2023	2.10

Transecto Marirrió 2009-2023

En el transecto Marirrió predomina la erosión sobre acreción (figura 10), el retroceso del litoral estuvo entre 63 m y 7.81 m correspondiendo a un área total perdida de 3.38 ha (tabla 3). La acreción (ganancia) neta estuvo entre 0.06 m y 15.84 m, con un área total ganada de 0.13 ha (tabla 3).

Figura 10: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Marirrió 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009

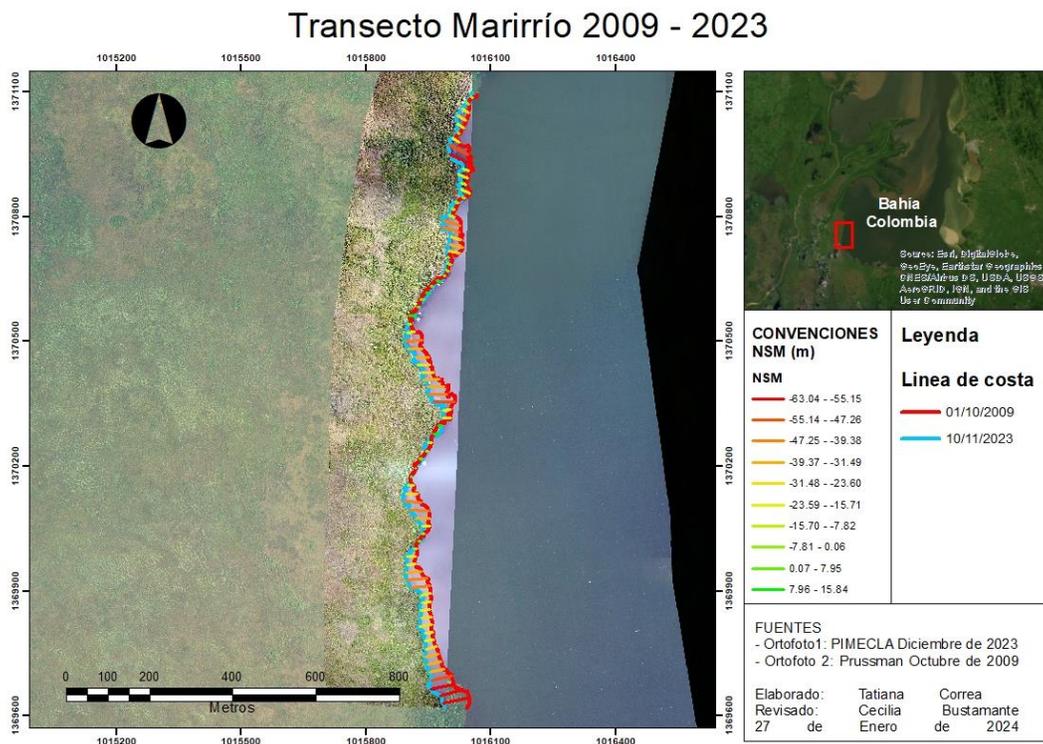


Tabla 3: Áreas de erosión y acreción, transecto Marirrío 2009-2023.

Transecto	Erosión (-)				Acreción (+)			
	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)
Marirrío	63	7.81	32.9	3.39	15.84	0.06	6.3	0.13
Tasa de retroceso: 2,35 m/año				Tasa de acreción: 0,45 m/año				

Transecto Leoncito 2009-2023

El movimiento neto de la LC muestra una tendencia negativa para todo el transecto (figura 11), con retrocesos que van desde 26 m hasta 105 m, lo que deja un área total perdida de 17.5 ha (tabla 4), no hay acreción en este transecto.

Figura 11: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Leoncito 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009.

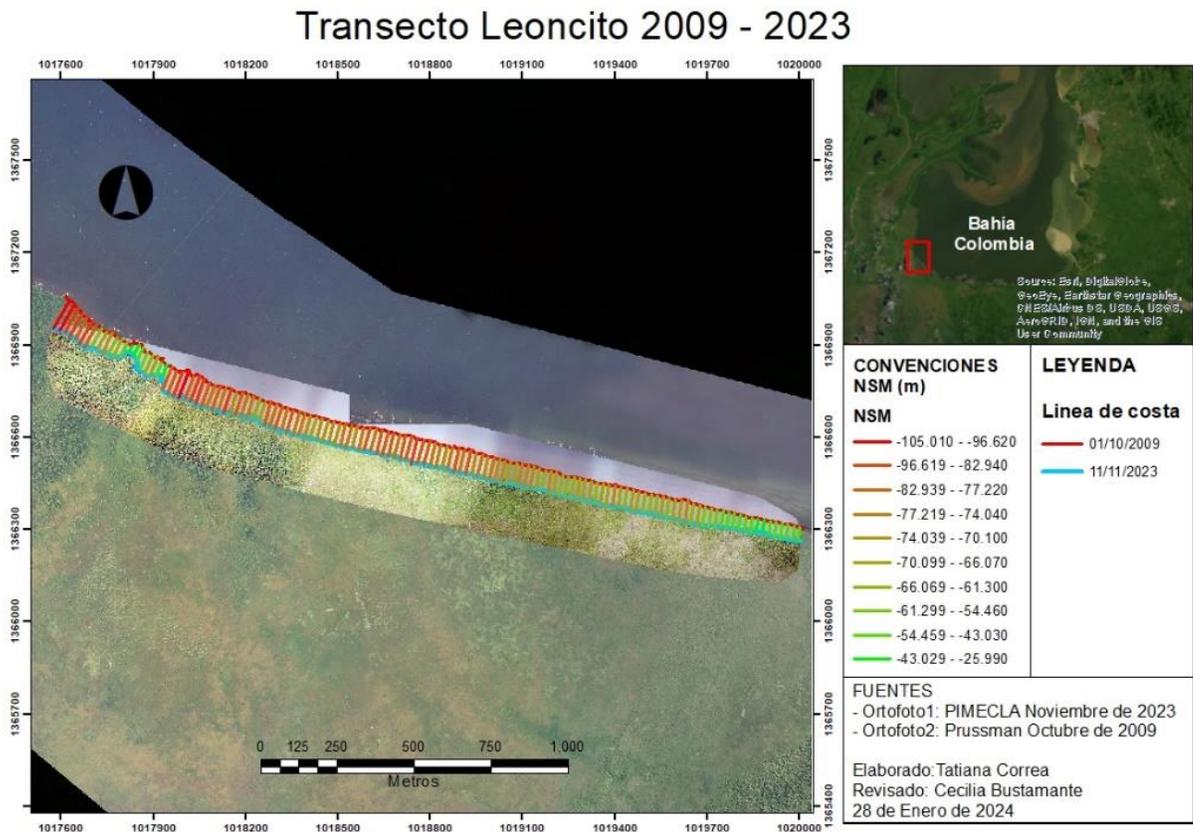


Tabla 4: Áreas de erosión y acreción, transecto Leoncito 2009-2023.

Transecto	Erosión (-)				Acreción (+)			
	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)
Leoncito	105	25.9	69	17.5	0	0	0	0
Tasa de retroceso: 4,9 m/año					Tasa de acreción: 0 m/año			

Transecto Leoncito 2021-2023

Se compararon las imágenes tomadas en el 2023 con las del 2021. El movimiento neto de la LC sigue la tendencia negativa del 2009- 2023 excepto en algunos sitios (figura12), con retrocesos netos que van desde 2.62 m hasta 23.18 m, lo que deja un área total perdida de 2.38 ha (tabla5); la acreción es de 0.030 m con un área ganada de 0.004 ha (tabla5).

Figura 12: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto Leoncito 2021-2023. Fuente: PIMECLA 2021 - 2023, World Imagery 2009.

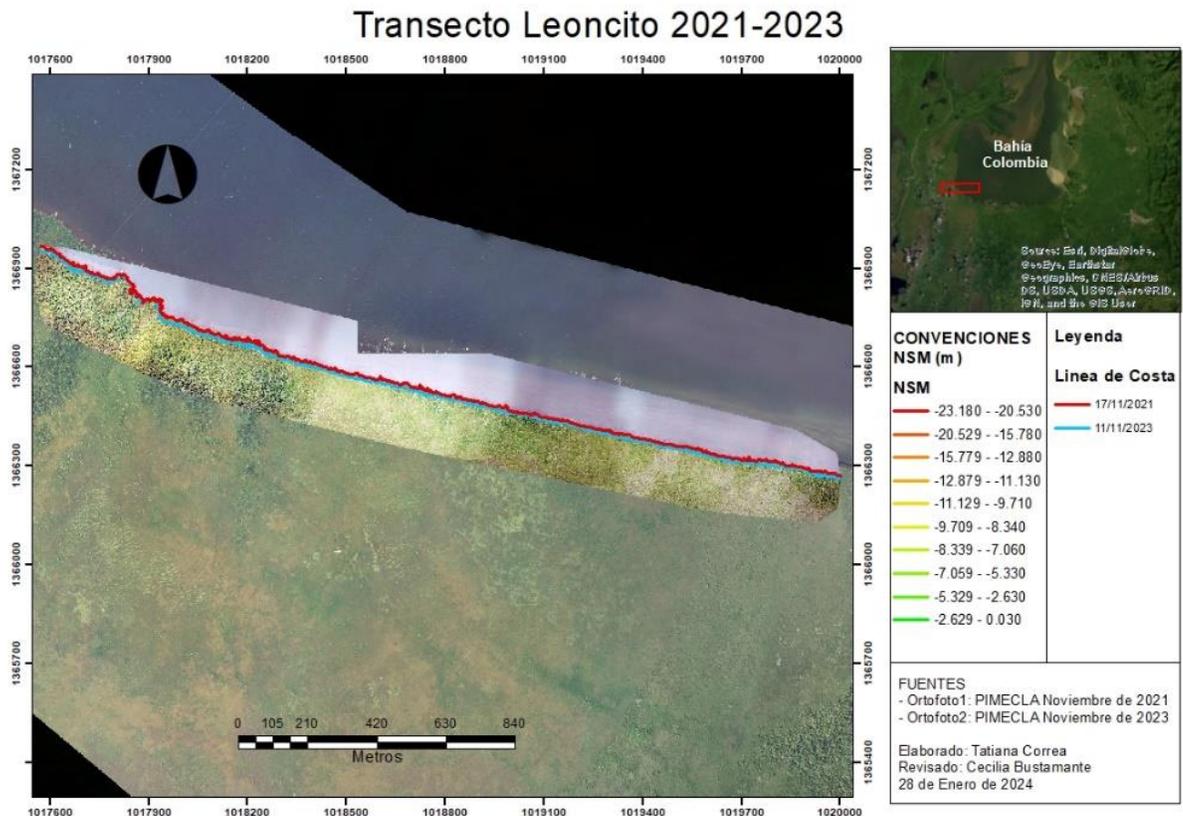


Tabla 5: Áreas de erosión y acreción, transecto Leoncito 2021-2023.

Transecto	Erosión (-)				Acreción (+)			
	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)
Leoncito	23	2.6	11	2.38	0.03	0.03	0.03	0.004
Tasa de retroceso: 5,5 m/año				Tasa de acreción: 0,0115 m/año				

Transecto Desembocadura río Suriquí 2009-2023

Para el transecto de la desembocadura del río Suriquí, predominó la erosión excepto en algunos sitios en la margen derecha del río (figura 13). Los retrocesos están entre 2.36 m y 59.69 m, con un área total perdida de 5.85 ha (tabla 6); la acreción es de 6.54 m con un área ganada de 0.02 ha (tabla 6).

Figura 13: Movimiento neto de la línea de costa para el transecto desembocadura río Suriquí 2009-2023. Fuente: PIMECLA 2023, Prüssmann 2009, World Imagery 2009.

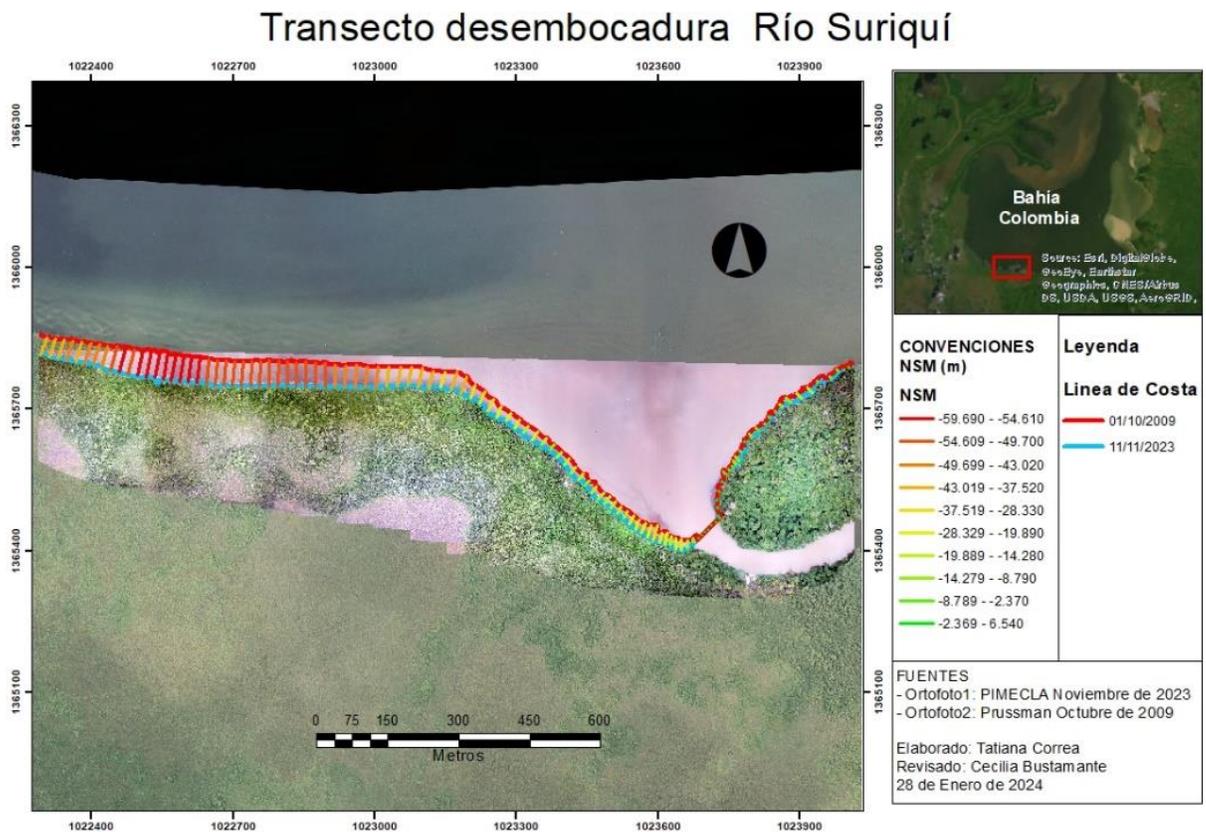
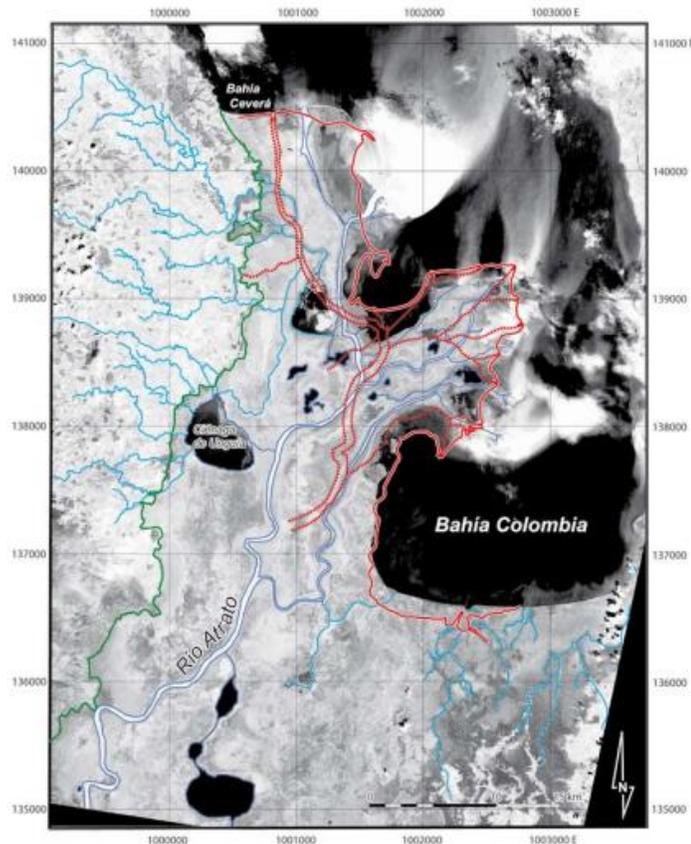


Tabla 6: Áreas de erosión y acreción, transecto Desembocadura rio Suriquí 2009-2023.

Transecto	Erosión (-)				Acreción (+)			
	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)	Lmax (m)	Lmin (m)	Lprom (m)	área (ha)
Leoncito	23	2.6	30	5.85	6.5	6.5	6.5	0.02
Tasa de retroceso: 2.14 m/año				Tasa de acreción: 0.46 m/año				

Este análisis del movimiento neto de la LC desde el 2009 al 2023 evidencia una predominancia de los procesos erosivos sobre los de acreción, sin embargo, Ménanteau (2007) compara planos y mapas con imágenes satelitales Spot para el período 1807 y 1999 (figura 14), revelando la evolución del delta río Atrato en un periodo de 200 años, en este lapso se observa una progradación (acreación) de LC en Bahía Colombia, en la figura 14 las líneas rojas, continuas y discontinuas, corresponden, respectivamente, a la línea de costa y al drenaje en 1807 y las azules continuas, al drenaje en 1999. La línea verde continua delimita la zona aluvial del Holoceno.

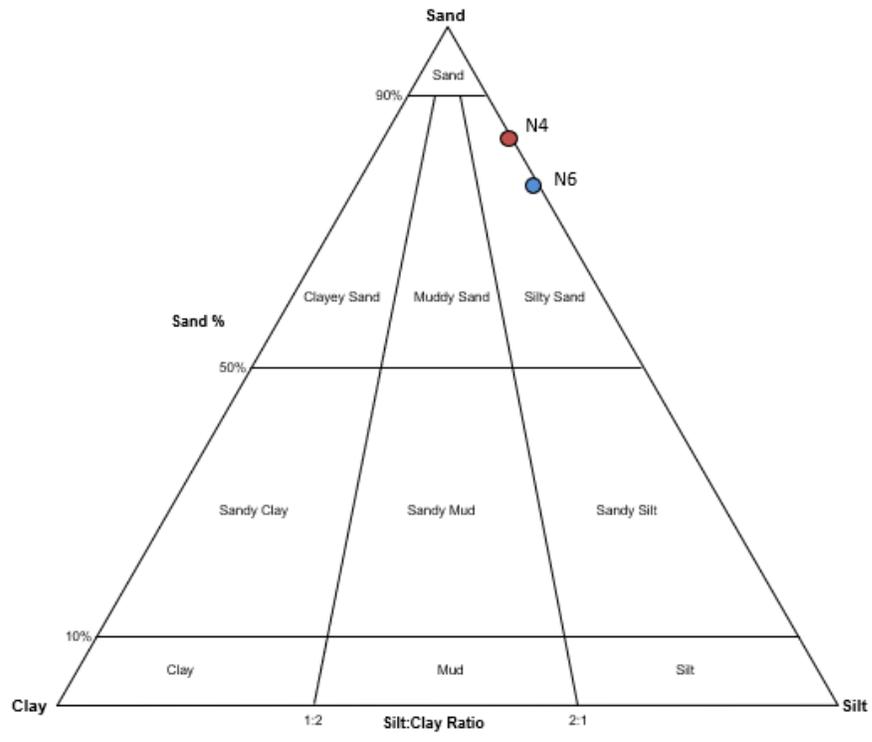
Figura 14: Evolución histórica del delta del Atrato entre 1807 y 1999. Mosaico de imágenes del satélite Spot (escenas 639-333 y 639-334) adquiridas en modo XS el 12 de noviembre de 1989. Georeferenciación en UTM Bogotá observatory (Colombia). Realización: O. Geff



Granulometría de las muestras de arena

Las arenas colectadas se clasifican en el grupo textural de arenas limosas unimodal moderadamente bien sorteadas en el diagrama de Folk (figura 15).

Figura 15: Clasificación granulométrica triángulo de Folk, núcleo 4 (N4 punto rojo) y núcleo 6 (N6 punto azul)



El núcleo 4 con un 85.2% de arena, distribuida entre arenas medias (0.1%), arenas finas (27.3%), arenas muy finas (57.8%), con 14,8% de limos distribuidos en limos muy gruesos (13.9%) y limos gruesos, medios, finos, muy finos y arcillas (0,2%), con una pérdida de 0,7%. El tamaño medio de granos es de 96.21 μm (arena muy fina); con una asimetría de 0.40 (simétrica), o sea que no hay un predominio significativo de partículas finas o gruesas; la curtosis es de 0.767 (curva platicúrtica), la distribución es aplanada donde los valores están más dispersos.

El núcleo 6 presentó un contenido de arenas de 79% distribuidos entre arenas medias (0.1%), arenas finas (12.8%) y arenas muy finas (66.1%), con un contenido de limos de 21% distribuidos entre limos muy gruesos (16.4%) y limos gruesos, medios, finos, muy finos y arcillas (0.9%). El tamaño medio de granos es de 84.70 μm (arena muy fina); con una asimetría de 0.004 (simétrica) esto significa que no hay un predominio significativo de partículas finas o gruesas; la curtosis es de 0.970 (mesocúrtica), es decir, una distribución normal en campana, donde hay una buena mezcla de las partículas.

Debido a la dificultad de extraer la muestra de arena para todos los núcleos y que los valores reportado por Thomas., *et al* (2007) son similares a los analizados, se asume que la granulometría para las capas de arenas de todos los núcleos es la misma.

Descripción de núcleos

Descripción general de las zonas de muestreo

La zona donde se obtuvieron los núcleos es la LC con anegación periódica por mareas (planicie intermareal) y cubierta por vegetación con predominancia del ecosistema de manglar, arracachal y panganal. El sustrato de estos ecosistemas es principalmente material orgánico proveniente de la vegetación, la velocidad de acumulación de estos materiales es mayor a su velocidad de descomposición, generando un depósito de materiales orgánicos o turbera (Moreno, *et al.*, 2004; Rao, 1987); a continuación se hace una descripción detallada de las condiciones físicas de Bahía Colombia

Localización: Bahía Colombia municipio de Turbo (Antioquia)

Piso altitudinal: tropical, altitud 0 msnm

Clima ambiental: cálido húmedo

Tipo de relieve: planicie intermareal

Topografía: plana o casi plana, inclinación < 3%

Clase de humedad: muy húmeda > 100

Régimen de humedad del sustrato: perácuico

Régimen de temperatura del sustrato: Isohipertérmico > 22 °C

Cobertura vegetal natural: manglar de borde, panganal, arracachal, ranconchales

Frecuencia y duración de las inundaciones: permanentemente inundado

Profundidad efectiva del sustrato: superficial a moderadamente profundo

Núcleo 1

Coordenadas: Lat. 07° 59' 15,023" N Long. 76° 55' 40,585 W (Figura 2)

El núcleo 1 se obtuvo en manglar de borde en estado relativamente bien conservado (*Rhizophora mangle*) asociado con helecho matatigre (*A. aureum*) y plántulas de *R. mangle* (figura 16).

El sustrato es material orgánico proveniente del manglar, en las capas superficiales el material es fresco y en profundidad presenta estados de descomposición incipiente (materiales fibricos), intermedio (materiales hémicos) y avanzado (materiales sápricos), con bioestructura dada por la materia orgánica. La muestra analizada en laboratorio de suelos de la Universidad Nacional corresponde al material vegetal de 0-10 cm de profundidad del manglar.

La primera capa de MO del núcleo 1 cumplió con los requerimientos de epipedón hístico (Soil Survey Staff, 2014) para clasificar al suelo como un Histosol, siendo un Typic Haplohemist (Soil Survey Staff, 2014). La figura 16 ilustra el sitio donde se extrajo el núcleo 1.

Figura 16: sitio de muestreo núcleo 1, 10/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Descripción del perfil núcleo 1 (identificación taxonómica del suelo orgánico)

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
MO	0 - 35	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); con fibras, raíces y proporciones aproximadamente iguales de materiales fibricos, hémicos y sápricos; con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y con tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; consistencia no plástica y no pegajosa en húmedo, en seco dura; muchos poros finos y muy finos: muchas raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR 8/6), pocas medias, gruesas y muy gruesas de color en húmedo amarillo rojizo (5YR 6/6); bioestructura determinada por las raíces y los materiales fibricos, hémicos y sápricos.
MO	35 – 55 ++	

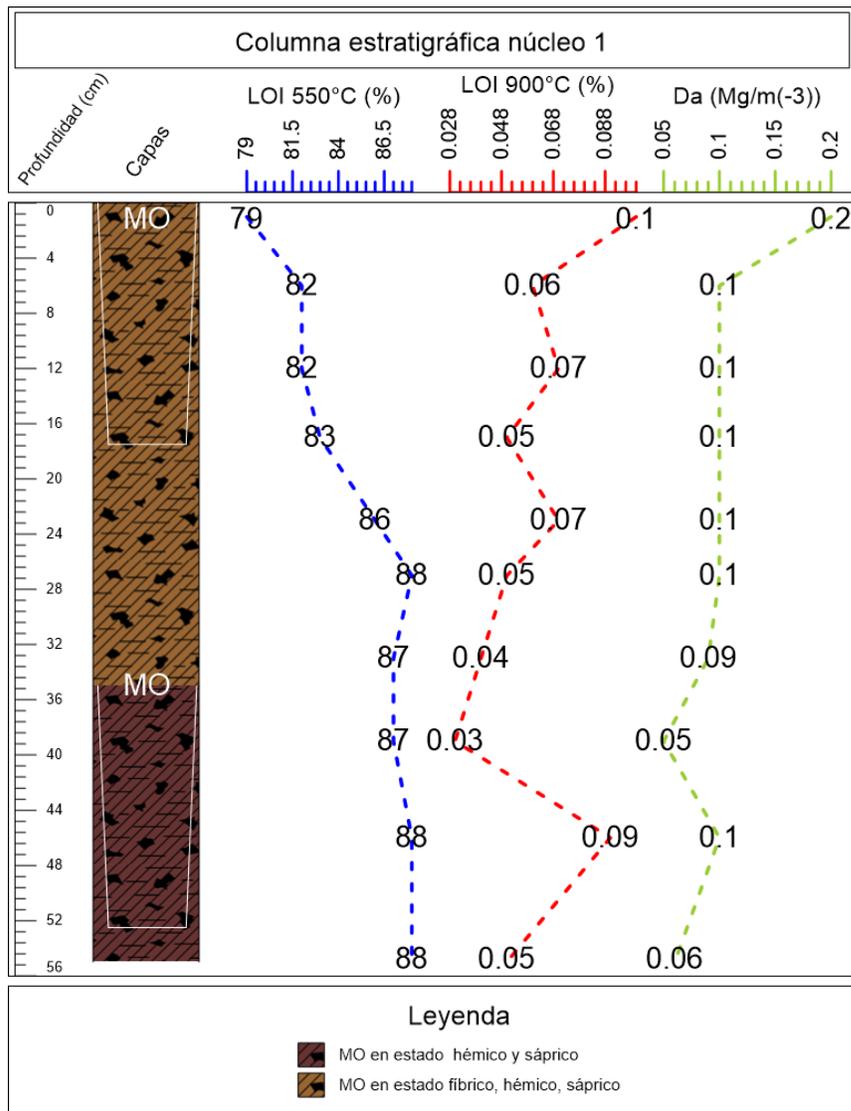




Color en húmedo negro (10YR 2/1); con fibras, raíces y mayor proporción de materiales sápricos bien formados, diferenciables; agregados de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; consistencia no plástica y no pegajosa en húmedo, en seco dura; muchos poros finos y muy finos; muchas raíces muy finas y finas, color en húmedo amarillo (10YR 8/6), pocas medias, gruesas y muy gruesas poco descompuestas, color en húmedo amarillo rojizo (5YR 6/6); bioestructura determinada por las raíces y los materiales hémicos y sápricos.

La figura 17 ilustra la columna estratigráfica correspondiente al núcleo 1

Figura 17: Columna estratigráfica núcleo 1 Marirrió.



El núcleo 1 presenta un alto contenido de MO (LOI 550°C), con 78% en superficie y aumenta gradualmente en profundidad hasta el 88%. El %MO es menor en la capa superficial debido al constante aporte de material vegetal fresco compuesto por fibras, hojas, fragmentos de troncos, raíces vivas y muertas, con la profundidad aumenta la descomposición de estos materiales avanzando de estados fíbricos a hémicos y sápricos, estos dos últimos liberan nutrientes y gases que aumentan el porcentaje de MO.

Para los carbonatos (LOI 900°C) y densidad aparente (Da) se obtuvieron valores muy bajos, los carbonatos (CO_3^{2-}) están entre 0.03% y 0.1% y la densidad aparente entre 0.05 - 0.2 $M_g m^{-3}$

El perfil estratigráfico de carbonatos en las capas de materia orgánica muestra un incremento gradual con la profundidad, puede atribuirse diferentes factores como la precipitación inducida por organismos fotosintéticos, la reducción de sulfatos (Zhu & Dittrich, 2016) y por la diagénesis y el proceso de entierro secuencial de sedimentos; los valores de Da clasifican al sustrato del núcleo 1 como sustrato turboso (Soil Survey Staff, 1998)), la disminución de la Da con la profundidad se debe al aumento del tamaño de las raíces vivas que dejan espacios porosos de mayor tamaño. El valor promedio de la Da para materiales orgánicos es de 0,224 $M_g m^{-3}$, los materiales fíbricos tienen densidad menor y puede llegar a 0,1 $M_g m^{-3}$; los materiales sápricos tienen una densidad ligeramente mayor y puede llegar a 0,2 $M_g m^{-3}$ (Soil Survey Staff, 1999).

Resultados muestra de sustrato de Marirrío

Los análisis de laboratorio de suelos de la UNAL corresponden a la muestra de sustrato obtenida en Marirrío y representan los primeros 10 cm del N1 (tabla 7).

Tabla 7: Resultados análisis muestra del sustrato de suelo de Marirrío

Identificación de la muestra													
Histosol de manglar													
	%		C (mol(+)/kg)					mg/kg					
pH	MO	CO	Al	Ca	Mg	K	CICE	P	Fe	Mn	Cu	Zn	B
5,5	31,73	18,40	N. A	22,91	40,12	5,42	68,45	42,26	476,97	19,58	10,12	5,99	0,23

El pH fuertemente ácido (5.5) se encuentra en el rango de pH para los materiales orgánicos; el contenido de MO orgánica se determinó por el método de Walkley y Black (WB), este método necesita un factor de corrección de 1,724 para calcular el contenido de carbono orgánico que fue de 18,40%, estos contenidos de CO permiten reconocer un epipedón hístico (horizonte superficial) que es diagnóstico para los suelos del orden Histosol (Soil Survey Staff, 2014). La saturación de bases es de niveles medios y da cuenta de la CICE. Los valores de hierro y manganeso son altos, debido al método de extracción en laboratorio, pues estos metales forman compuestos orgá-

metálicos con la MO y la extracción en laboratorio rompe los enlaces de estos compuestos liberando los metales (Zapata, 2006). Los niveles alto de fosforo corresponden al fósforo orgánico que proviene de la descomposición de los restos vegetales y que se ha precipitado o adsorbido en hierro y manganeso en suelos ácidos (Echeverri, 2018).

Núcleo 2

Descripción del sitio del N2

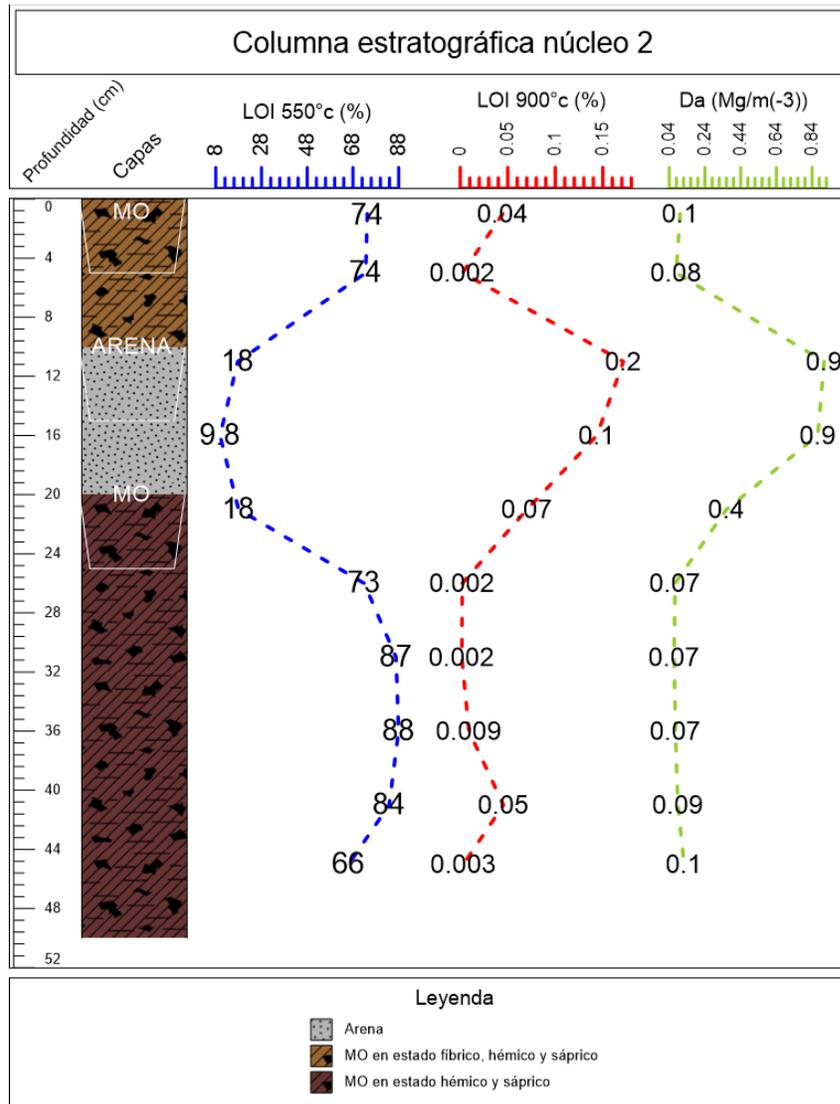
Coordenadas N2: Lat. 07°56'47,563" N, Long. 76°55'59,966" W (Figura 2).

El núcleo 2 con una longitud de 50 cm se obtuvo en un ecosistema de manglar de borde con helecho mata tigre (*A. aureum*), ya aparecen especies vegetales deterioradas o muertas (figura 18)

Figura 18: sitio de muestreo núcleo 2, 10/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Figura 19: Columna estratigráfica núcleo 2.



Descripción del perfil

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
MO	0 - 10	Color en húmedo negro (10YR 2/1); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; consistencia no plástica y no pegajosa en húmedo, en seco dura; muchos poros finos y muy finos; muchas fibras, raíces muy finas y finas de color en húmedo pardo amarilloso oscuro (10YR 4/4); fragmentos de corteza, troncos medios a



		gruesos; bioestructura determinada por las raíces y los materiales fibricos, hémicos y sápricos.
Arena	10 – 20	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); arena muy fina y limos mezclada con abundante cantidad de MO; muchas raíces muy finas y finas; presencia abundante de cuarzo transparente y blanco, opaco, subredondeado y subanguloso, líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos.
		
MO	20 – 50	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras, raíces muy finas y finas de color en húmedo pardo amarilloso claro (10YR 6/4); se observa epidermis de raíz y poco tejido vegetal.
		

El núcleo 2 presenta un contenido de MO con valores entre 9.8% y 87%; en la capa superficial el valor inicial de la MO es 74% y disminuye en profundidad al mezclarse con material mineral de la capa adyacente; en la capa intermedia la MO disminuye a 9.8%, pues es una capa compuesta por arenas muy finas y limos; para la capa entre 20 y 50 cm, el material orgánico en estado hémico y sáprico hacen que la MO aumente hasta 87% y se mantenga relativamente estable en profundidad.

Los valores para los CO_3^{2-} oscilan entre 0.002% y 0.2% y la Da entre 0.07 Mg m^{-3} y 0.9 Mg m^{-3} , exhiben un comportamiento similar entre ellos: disminuyen en de 0 cm a 5cm y comienzan a aumentar, en la capa superficial el valor inicial para los CO_3^{2-} es de 0.04% y disminuye en profundidad hasta la capa intermedia de arenas finas y limosas donde él % CO_3^{2-} aumentó hasta su valor máximo de 0.2%, disminuye nuevamente en profundidad en la última capa hasta 0.003%;

la Da con valores de 0.07 Mg m^{-3} y 0.9 Mg m^{-3} disminuye con la profundidad hasta llegar a valores de 0.08 Mg m^{-3} en la capa superficial, para luego aumentar al valor máximo de 0.9 Mg m^{-3} en la capa intermedia de arena muy fina y limos, y disminuye nuevamente hasta valores de 0.07 Mg m^{-3} y continua relativamente estable en profundidad en la capa de MO.

Núcleo 3

Descripción del sitio del N3

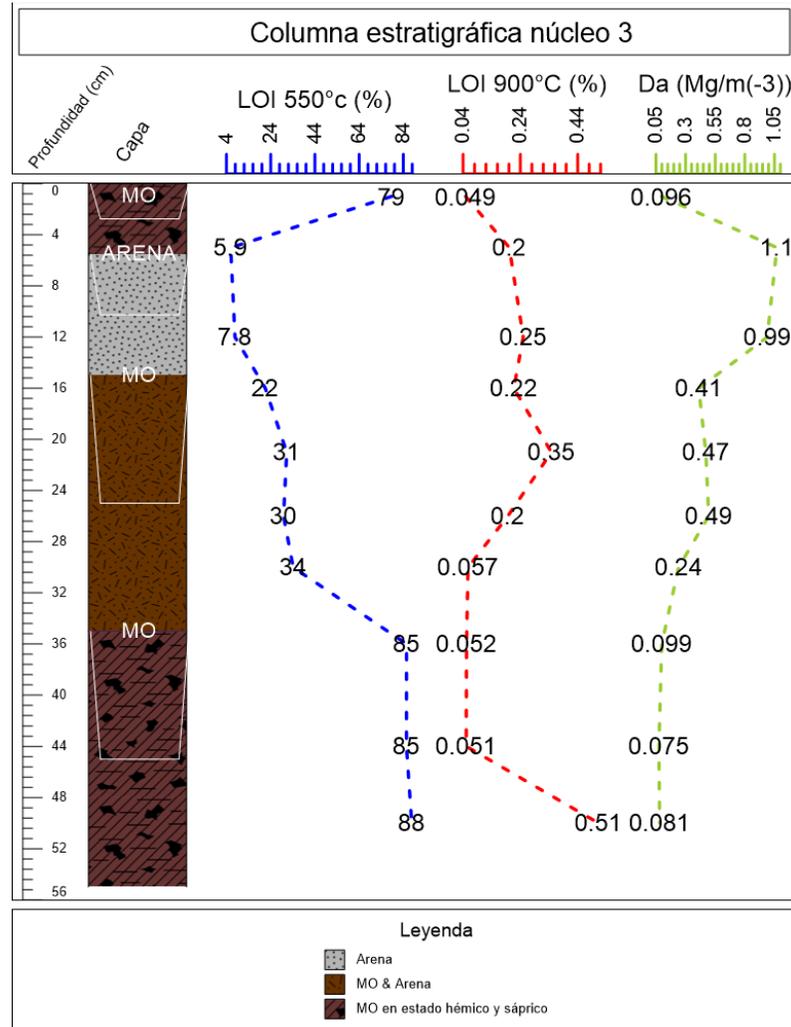
Las coordenadas del N3 son Lat. 07°54'43,701" N, Long. 76°54'44,25" W (Figura 2).

El núcleo 4 con una longitud de 55 cm se obtuvo en un ecosistema con presencia de arracachales (*M. arborescens*), helecho matatigre (*A. aureum*) y panganales (*R. taedigera*), se incrementa la aparición especies deterioradas y muertas (figura 20)

Figura 20: sitio de muestreo núcleo 3, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Figura 21: Columna estratigráfica núcleo 3.



Descripción del perfil

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
MO	0 - 5.5	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo café oscuro (10YR 3/3); fragmentos de corteza finos a medios.



Arena	5.5 – 15	 <p data-bbox="532 247 1302 546">Color en húmedo gris verdoso (GLEYY1 5/5GY 5/1); Arena muy fina y limos, mezclados con poca MO; abundante presencia de cuarzo transparente, blanco opaco, subredondeado y subanguloso, líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos; fragmentos de mica brillantes y planares.</p>
MO	15 – 35	 <p data-bbox="532 546 1302 982">Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico mezclado con arena; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo café oscuro (10YR 3/3); fragmentos de corteza finos a medios; fragmentos de troncos y fibras vegetales.</p>
MO	35 – 55	 <p data-bbox="532 982 1302 1356">Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo café oscuro (10YR 3/3); fragmentos alargados de epidermis de raíz de diámetro fino y color transparente.</p>

El núcleo 3 tiene porcentajes de MO entre 5.9% y 88%, en la capa superficial su valor es de 79% disminuyendo en profundidad al mezclarse con material mineral de la capa subyacente; en la segunda capa la MO disminuye a 5.9%, debido a que son arenas muy finas y limos; la tercera capa compuesta de MO mezclada con arena presenta porcentajes de MO entre 22% para el techo de la capa y 85% para el piso de la capa, para la última capa compuesta por materiales hémicos y sápricos, el valor máximo de la MO es de 88%.

Para los CO_3^{2-} y la Da los valores oscilan entre 0.049% y 0.51% y 0.075 Mg m^{-3} y Mg m^{-3} respectivamente; en la capa superficial el valor de los CO_3^{2-} es 0.049% y aumenta gradualmente en la profundidad pasando por la capa de arena y llega a un pico de 0.35% en la tercera capa de MO mezclada con arena, después de este pico disminuye gradualmente en la cuarta capa de MO y a partir de esta profundidad se incrementa hasta su valor máximo de 0.51%; la Da inicia con valores

de $0.096 M_g m^{-3}$ en la capa superficial y aumenta con la profundidad hasta llegar a valor máximo de $1.1 M_g m^{-3}$ en la segunda capa compuesta de arena muy fina y limos, para luego disminuir gradualmente con la profundidad pasando por la tercera capa compuesta de MO mezclada con arena y llegar a su valor mínimo de $0.07 M_g m^{-3}$ en la última capa compuesta de MO en estado hémico y sáprico y continuar relativamente estable en profundidad.

Núcleo 4

Descripción del sitio del N4

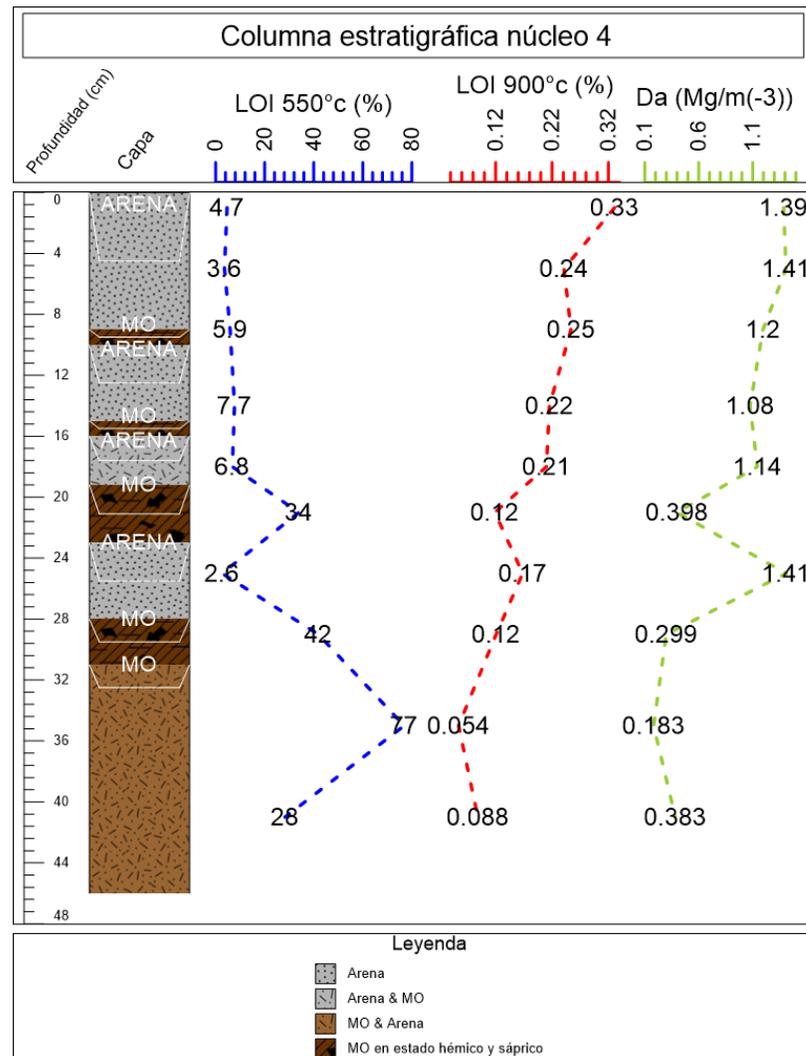
Las coordenadas del N4 son Lat. $07^{\circ}54'40.625''$ N, Long. $76^{\circ}54'38.692''$ W (Figura 2).

El núcleo 4 con una longitud de 46 cm se obtuvo en un ecosistema con presencia de arracachales (*M. arborescens*) y helecho matatigre (*A. aureum*), se incrementa la aparición especies muertas y restos de troncos en descomposición (figura 22)

Figura 22: sitio de muestreo núcleo 4, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Figura 23: Columna estratigráfica núcleo 4



Descripción del perfil

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
Arena	0 – 9	Color en húmedo de color gris (GLEY1 5/N); Arena muy fina y limos; abundantes granos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos; fragmentos de mica brillantes y planares.
MO	9 – 10	



			<p>Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillas (10YR 7/6)</p>
Arena	10 – 15		<p>Color en húmedo de color gris (GLE Y1 5/N); Arena muy fina y limos, mezclados con poca MO, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso, junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos.</p>
MO	15 - 16		<p>Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillas (10YR 7/6)</p>
Arena	16 – 19.2		<p>Color en húmedo de color gris (GLE Y1 5/N); Arena muy fina y limos, mezclados con poca MO, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso, junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos.</p>
MO	19.2 – 23		<p>Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillas (10YR 7/6)</p>

Arena	23 - 28	Color en húmedo de color gris (GLEY1 5/N); Arena muy fina y limos, mezclados con poca MO, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso, junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos
		
MO	28 - 31	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillas (10YR 7/6)
		
MO	31 - 46	Color en húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico mezclados con arena; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillas (10YR 7/6)
		

El núcleo 4 presenta un contenido de MO, con valores que oscilan entre 2.6% y 77%, en la capa superficial el valor inicial de la MO es 4.7% y permanece con valores similares en profundidad pasando por las capas de arena muy finas y limosa y por las láminas discontinuas de MO, para luego aumentar a 34% en la capa intermedia de MO en estado hémico y sáprico y disminuye a 2.6% en la capa de arena inferior, aumentando nuevamente de manera gradual hasta llegar al pico máximo de 77% y disminuir nuevamente hasta 28% al pasar por la última capa de MO mezclada con arena.

Para los CO_3^{2-} y la Da los valores oscilan entre 0.054% y 0.33% y 0.183 Mg m^{-3} y 1.41 M Mg m^{-3} respectivamente; en la capa superficial el valor inicial para los CO_3^{2-} es de 0.33% y disminuye gradualmente en profundidad llegando a valores de 0.054% y 0.088% en la última capa compuesta de MO mezclada con arena; la Da inicia con valores de 1.39 Mg m^{-3} en la capa superficial y disminuye en profundidad pasando por las capas de arena y las láminas discontinuas de MO hasta llegar a 0.398 Mg m^{-3} en la capa intermedia de MO en estado hémico y sáprico y aumenta nuevamente a 1.41 Mg m^{-3} en la capa inferior compuesta de arena muy fina y limos, y disminuir a valores de 0.183 Mg m^{-3} y 0.383 Mg m^{-3} en la última capa compuesta de MO y arena.

Núcleo 5

Descripción del sitio del N5

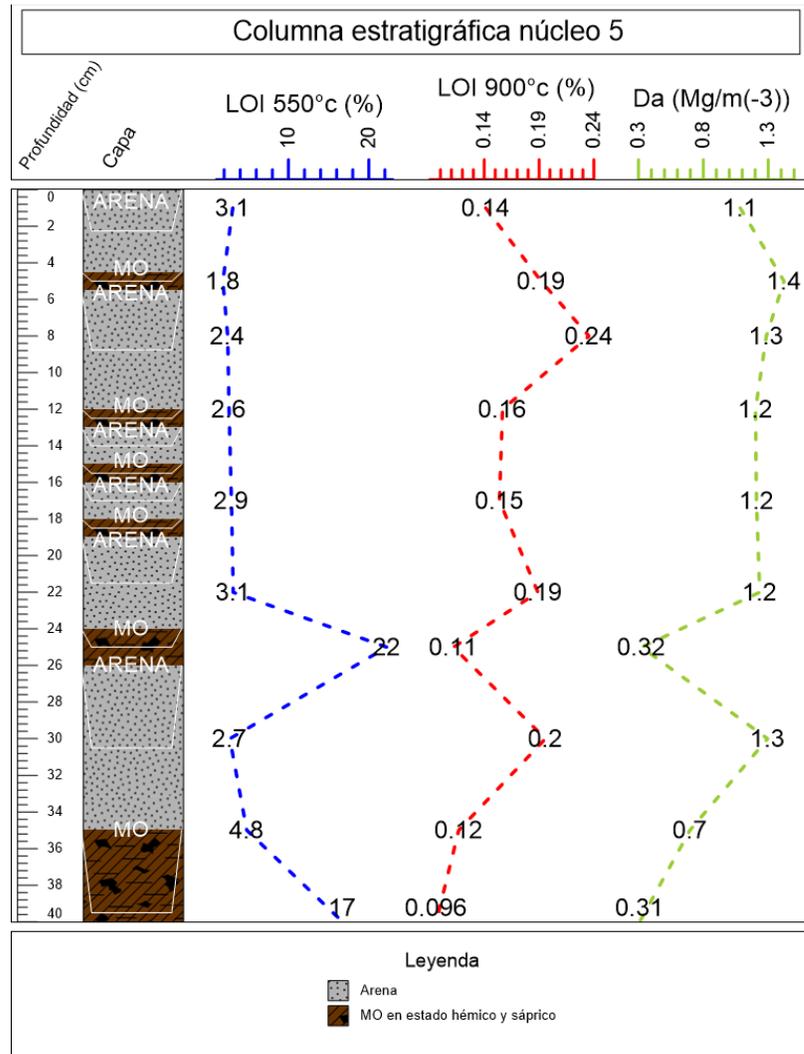
Con coordenadas Lat. 07°54'12,791" N, Long. 76°52'5,399" W (Figura 2).

El núcleo 5 con una longitud de 40 cm se obtuvo en un ecosistema con presencia de arracachales (*M. arborescens*) y helecho matatigre (*A. aureum*), se incrementa la aparición especies vegetales deterioradas y muertas, además de restos de troncos en descomposición (figura 24)

Figura 24: sitio de muestreo núcleo 5, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Figura 25: Columna estratigráfica núcleo 5.



Descripción del perfil

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
Arena	0 – 4.5	Color en húmedo gris oscuro (GLE Y1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso, fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos, pocos tejidos vegetales.
MO	4.5 – 5.5	



		Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); Lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6)
		
Arena	5.5 - 12	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso; junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro, subredondeados y subangulosos, pocos tejidos vegetales.
		
MO	12 - 13	Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); Lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6)
		
Arena	13 - 15	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco con formas subredondeadas y subangulosas, junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subangulosos y subredondeados, pocos tejidos vegetales.
		
MO	15 - 16	Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6).
		
Arena	16 - 18	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco con formas subredondeadas y subangulosas, junto con
		

		fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos, pocos tejidos vegetales.
MO	18 – 19	Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6)
		
Arena	19 – 24	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeado y subanguloso; fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos, subredondeado y subanguloso, pocos tejidos vegetales.
		
MO	24 – 26	Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6)
		
Arena	26 – 35	Color en húmedo gris oscuro (GLEY1 4/N); Arena muy fina y limos, fragmentos de mica de tamaño muy fino y planar, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, subredondeados y subangulosos, fragmentos líticos muy finos de color oscuro, subredondeados y subangulosos, pocos tejidos vegetales.
		
MO	35 – 40	Color húmedo pardo muy oscuro (10YR 2/2); MO en estado hémico y sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo amarillo (10YR8/6)

El núcleo 5 tiene porcentajes de MO entre 1.8% y 22%, en la capa superficial su valor es de 3.1% disminuyendo en profundidad y conservando valores similares en las capas de arena muy finas y limosas y por las láminas discontinuas de MO hasta llegar a su valor máximo de 22%, para luego disminuir a 2.7% en la capa subyacente de arena muy fina y limosa y aumentar nuevamente hasta 4.5% y 17% en la última capa compuesta por MO en estado hémico y sáprico.

Para los CO_3^{2-} y la Da los valores oscilan entre 0.096% y 0.24% y 0.31 Mg m^{-3} y 1.4 Mg m^{-3} respectivamente; en la capa superficial el valor de los CO_3^{2-} es 0.14% y aumenta gradualmente en la profundidad llegando a su valor máximo de 0.24% en la tercera capa compuesta de arena, después de este pico disminuye hasta 0.15% y 0.16% en las capas de arena y limos y las láminas discontinuas de MO en estado hémico y sáprico, y aumenta nuevamente a 0.19% en la capa de arena subyacente y hasta 0.11% en la capa inferior de MO para incrementarse nuevamente a 0.2% en la capa de arena, y disminuir hasta su valor mínimo de 0.096% en la última capa de MO en estado hémico y sáprico; la Da inicia con valores de 1.1 Mg m^{-3} en la capa superficial y aumenta con la profundidad hasta llegar al valor máximo de 1.4 Mg m^{-3} en la segunda lamina discontinua de MO, para luego disminuir en profundidad pasando por las capas de arena muy finas y limos y por las láminas discontinuas de MO hasta llegar a su valor mínimo de 0.32 Mg m^{-3} en la capa de MO en estado hémico y sáprico y aumentar a 1.3 Mg m^{-3} en la capa subyacente compuesta de arenas muy finas y limos, para finalmente disminuir a su valor mínimo de 0.31 Mg m^{-3} en la última capa de MO en estado hémico y sáprico.

Núcleo 6

Descripción del sitio del N6

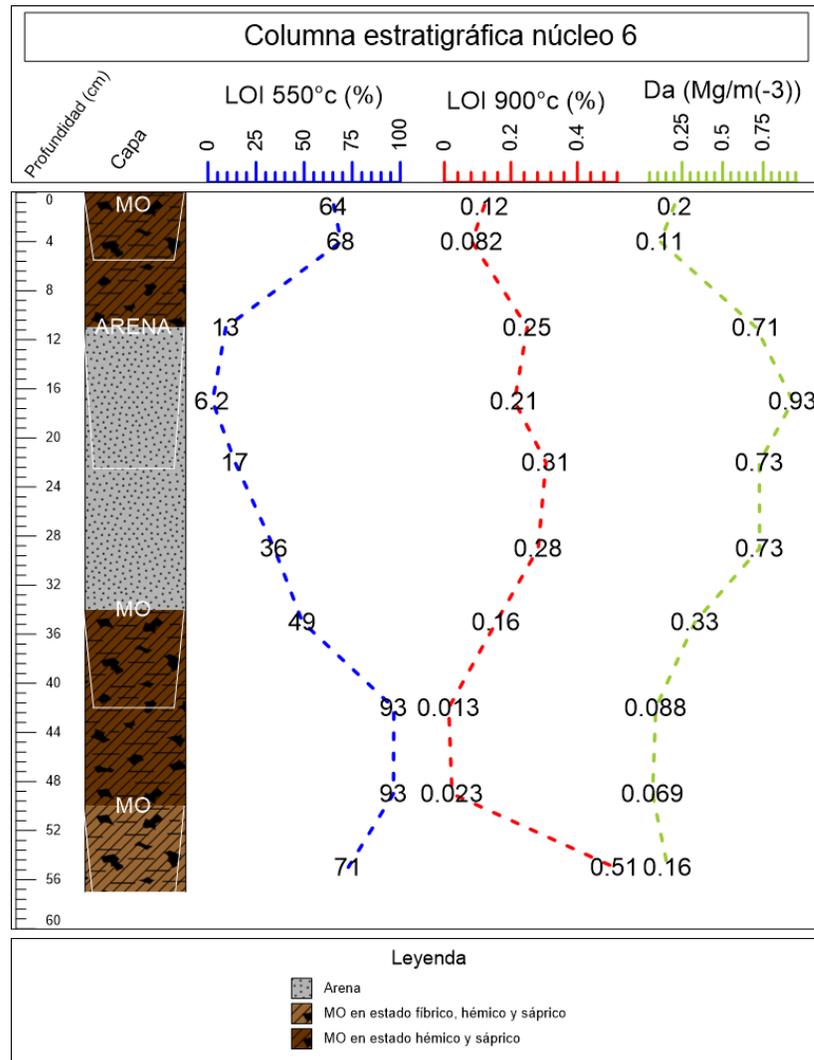
Las coordenadas del N6 son Lat. $07^{\circ}54'32,632''$ N, Long. $76^{\circ}54'3,424''$ W (Figura 2).

El núcleo 6 con una longitud de 57 cm se obtuvo en un sitio con presencia de manglar de borde (*R. mangle*), helecho mata tigre (*A. aureum*) y arracachales (*M. arborescens*), se presentan especies vegetales deterioradas y muertas, además de restos de troncos en descomposición (figura 26)

Figura 26: sitio de muestreo núcleo 6, 11/11/2023. Fuente: Cecilia Bustamante



Figura 27: Columna estratigráfica núcleo 6.



Descripción del perfil

Capa	Profundidad (cm)	Descripción
MO	0 – 11	Color en húmedo negro (10YR 2/1); MO en estado sáprico; agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR 3/4); junto a fragmentos de corteza y troncos finos a medios.
		
Arena	11 – 34	Color en húmedo gris muy oscuro (GLE Y1); Arena muy fina y limos, abundantes fragmentos de cuarzo transparente y blanco opaco, con formas subredondeadas y subangulosas, junto con fragmentos líticos muy finos de color oscuro subredondeados y subangulosos.
		
MO	34 – 50	Color en húmedo negro (10YR 2/1); lamina discontinua de MO en estado hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR 3/4).
		
MO	50 – 57	Color en húmedo negro (10YR 2/1); MO en estado fibrico, hémico y sáprico, con agregados de materiales sápricos bien formados, diferenciables y de tamaño muy fino y fino; con estructura débil a moderada; en húmedo la consistencia es no plástica y no pegajosa, en seco se torna dura; muchos poros finos y muy finos; numerosas fibras y raíces muy finas y finas de color en húmedo pardo amarillento oscuro (10YR 3/4);
		

El núcleo 6 tiene porcentajes de MO entre 6.2% y 93%; en la capa superficial compuesta por MO en estado sáprico su valor es de 64% disminuyendo en profundidad hasta llegar a su valor mínimo de 6% en la capa inferior de arena muy fina y limosa, y aumenta gradualmente en profundidad hasta 49% al pasar por la lámina de MO, las capas de arena y la capa de MO mezclada con arena, y aumentar al valor máximo de 92% en la capa de MO en estado hémico y sáprico y finalmente disminuir hasta 71% en la última capa de MO en estado fábriico, hémico y sáprico.

Para los CO_3^{2-} y la Da los valores oscilan entre 0.013% y 0.51% y 0.069 Mg m^{-3} y 0.93 Mg m^{-3} respectivamente; en la capa superficial el valor de los CO_3^{2-} es 0.12% y disminuye en profundidad y aumenta a un pico de 0.31% en la capa de arena, luego de ese pico disminuye gradualmente en profundidad al pasar por la capa de MO mezclada con arena hasta llegar a su valor mínimo de 0.013% en la capa de MO en estado hémico y sáprico, y finalmente aumentar a su valor máximo de 0.51% en la última capa de MO en estado fábriico, hémico y sáprico, este ligero aumento de los CO_3^{2-} puede atribuirse a la precipitación inducida por organismos fotosintéticos, la reducción de sulfatos (Zhu & Dittrich, 2016) y por la diagénesis y el proceso de entierro secuencial de sedimentos; la Da inicia con valores de 0.2 Mg m^{-3} y disminuye en profundidad a 0.11 Mg m^{-3} en la capa superficial y aumenta con la profundidad hasta llegar al valor máximo de 0.93 Mg m^{-3} en la segunda capa compuesta de arena muy fina y limos, para luego disminuir en profundidad hasta su valor mínimo de 0.06 Mg m^{-3} y mantenerse relativamente estable en las últimas capas de MO en estado fábriico, hémico y sáprico.

Análisis

El núcleo 1 (figura 28) cuyo sustrato es una mezcla de turba de madera y de raíces de herbáceas, con alto contenido de MO, bajo contenido de carbonatos y una densidad aparente baja, sostiene un ecosistema en buen estado de conservación, con condiciones favorables para el desarrollo de la vegetación.

La presencia de capas de arena en el sustrato turboso, cambia la densidad aparente disminuyendo la porosidad y compactando el sustrato, esto impide la penetración de las raíces de la vegetación, el intercambio de nutrientes y la permeabilidad del sustrato para el libre paso del agua, condiciones necesarias para el mantenimiento de la vegetación hidrófila, esto es lo que se comienza a observar en los núcleos 2 a 6.

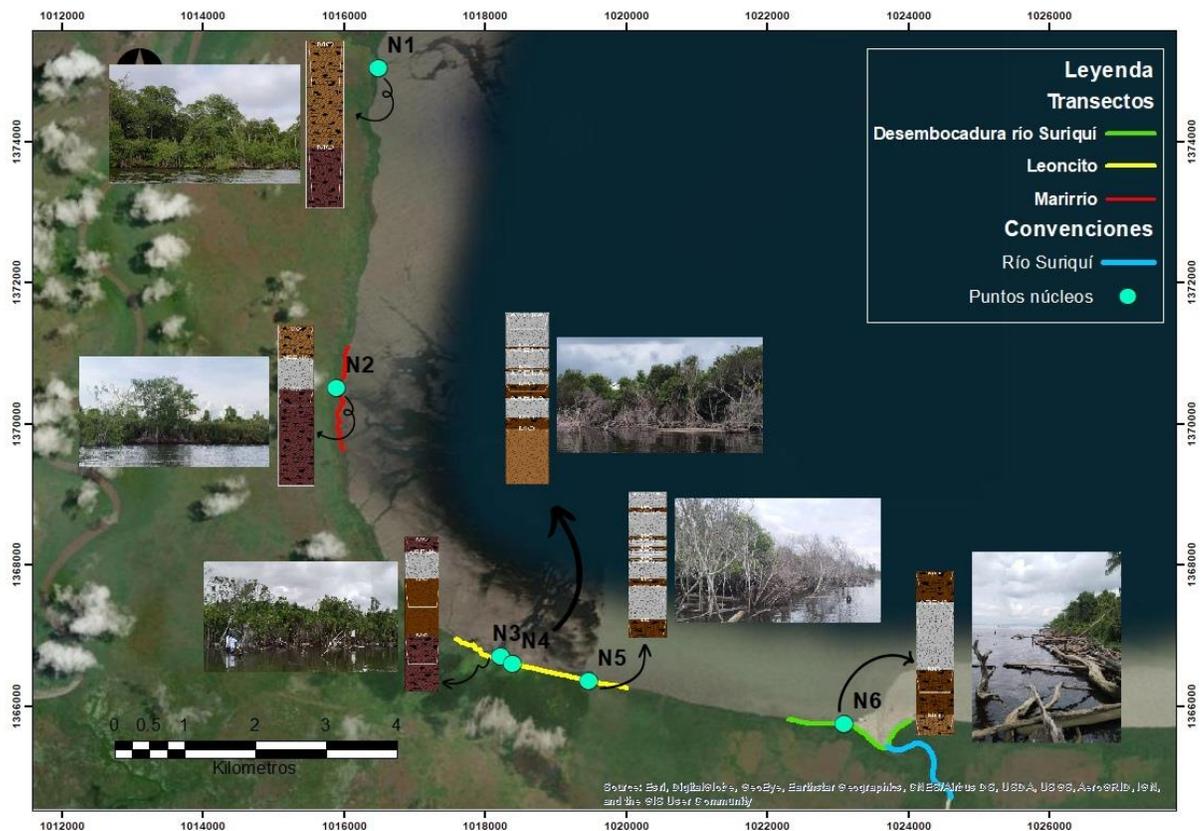
En el núcleo 2 (transecto Marirríio) (figura 28) presenta una capa intermedia de arena en el sustrato turboso, y comienzan a aparecer especies vegetales deterioradas o muertas; la tasa de retroceso para este transecto fue de 2.35 m/año.

El núcleo 3 tomado en el transecto Leoncito (figura 28) presenta una capa intermedia de arena en el sustrato turboso y en los núcleos 4 y 5 (transecto Leoncito) los carbonatos y la densidad aparente son más altos, predominan las capas de arena, posiblemente procedentes de las altas tasas de sedimentación de los ríos Suriquí, León y Atrato y depositadas por acción de olas y corrientes,

impidiendo la reposición y descomposición de la MO y así la regeneración del ecosistema; este transecto fue donde más se evidencio muerte de la vegetación y mayor erosión, la tasa de retroceso fue de 4.9 m/año.

En el núcleo 6 (transecto desembocadura río Suriquí) (figura 28) aparece nuevamente una capa intermedia de arena en el sustrato turboso, presenta un estado de deterioro menor en comparación al transecto Leoncito; la tasa de retroceso fue de 2.14 m/año.

Figura 28: Transectos con el núcleo correspondiente y vegetación sobre ese sustrato



La migración tierra adentro de los ecosistemas del litoral como consecuencia del cambio en el sustrato (turberas) debido al retroceso de la línea de costa, tiene un impacto significativo en la captura y almacenamiento de carbono. Cuando las turberas son erosionadas, el carbono almacenado en su sustrato se libera a la atmósfera y al agua, lo que contribuye al cambio climático. Estos ecosistemas juegan un papel muy importante en la dinámica de las costas y proporcionan una gran diversidad de servicios ecosistémicos como la protección del litoral frente a procesos erosivos y fenómenos climáticos, además son refugio y fuente de alimento de diversas especies y sostiene importantes pesquerías (Yáñez & Lara, 1999)

Conclusiones

A partir de los análisis realizados se puede concluir que:

Existe una relación entre el retroceso (migración) tierra adentro de los ecosistemas naturales del litoral en Bahía Colombia y el retroceso (migración) de la línea de costa, mediada por cambios en las características del sustrato, donde el contenido de materia orgánica (turba de madera y raíces de herbáceas), carbonatos y densidad aparente del sustrato son diferentes entre los sitios con vegetación conservada (menor retroceso de LC) y los sitios con degradación o muerte de la vegetación (mayor retroceso de LC). La figura 28 muestra el contexto de los sustratos y la vegetación que soportan.

La presencia de capas de arena en el sustrato parece tener un impacto negativo en la salud de los ecosistemas y en los procesos de retroceso de la línea de costa, dificultando el desarrollo de la vegetación y reduciendo la protección del sustrato contra la erosión.

Las condiciones necesarias del sustrato para que los ecosistemas naturales estudiados en la línea de costa de Bahía Colombia se establezcan son: alto contenido de MO, bajo contenido de carbonatos y una densidad aparente baja.

Los valores de los CO_3^{2-} para todos los núcleos son similares a los reportados por Thomas, *et al* (2007) para la bahía, esto sugiere que la composición química del sustrato en términos de carbonatos es relativamente homogénea en la zona de estudio.

Recomendaciones

Se recomienda en futuros estudios:

- ❖ Estudiar los efectos del cambio de sustrato en las condiciones fitosanitarias que afectan a manglares, arracachales y panganales.
- ❖ Realizar estudios de procedencia de los sedimentos, corrientes y medir las tasas de sedimentación, para comprender la dinámica costera de la bahía.
- ❖ Realizar cronoestratigrafía a las capas de sedimentos y pedo-estratigrafía a los horizontes de los histosoles para determinar las condiciones de formación y de depósito.

Referencias

- Angers, D & Larney, F. (2008). Soil physical analyses. Particle size distribution. Soil sampling and methods of analysis. pp 713 – 725.
- Arroyave, A., Blanco, J., & Taborda, A. (2012). Exportación de sedimentos desde cuencas hidrográficas de la vertiente oriental del golfo de Urabá: influencias climáticas y antrópicas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20). pp. 13-30.
- Bernal, G., Montoya, L., Garizábal, C., & Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y ambiente*, 8(1). pp. 123-135.
- Blanco, J. 2009. Libreros. Banana Crop Expansion and Increased River-borne Sediment Exports to the Gulf of Urabá, Caribbean Coast of Colombia. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(3). pp. 181-183.
- Blanco, J. (2016). Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión. *Actualidades Biológicas*, 38(104). pp. 53 – 70.
- Blott, J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26. pp. 1237-1248.
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Coastal Research*, 21(4), pp. 688–703.
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (2014). Histosols. pp. 185 – 192. Claves para la Taxonomía de Suelos, decima segunda edición.
- Chevillot, P., Giraldo, L., Molina, C., & Molina, A. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, (14), pp. 79-90
- Echeverri, E. (2018). Dinámica del fosforo en suelo-planta en regiones tropicales. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). *Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados*. p. 205.

- Guzmán, W., Posada, B., Guzmán, 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. INVEMAR. p.72.
- Heiri, O., Lotter, A., & Lemcke, G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. **25**. pp. 101–110.
- Himmelstoss, E., Henderson, R., Kratzmann, M., & Farris, A., 2021, *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1091. p. 104.
- Jaramillo, D. (2002a). El perfil del suelo. pp. 127-148. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad nacional de Colombia, facultad de ciencias. Medellín.
- Jaramillo, D. (2002b). Densidad y porosidad del suelo. pp. 181-199. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad nacional de Colombia, facultad de ciencias. Medellín.
- Jaramillo, D. (2002c). Cartografía de suelo. pp. 521-537. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad nacional de Colombia, facultad de ciencias. Medellín.
- Ménanteau, L. 2007. Geohistoria del golfo. Pp. 23-73, en GarcíaValencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Santa Marta, Colombia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12
- Montoya, L., & Montoya, R. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(7). pp. 101-109.
- Moreno, E., Gutiérrez, M., Guerrero, A., Ortiz, C., & Palma, D. (2004). Micromorfología en la clasificación de Histosoles en humedales de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*. 22(2). pp. 153-160.
- Munsell Color, 2009. Munsell Soil Color Charts
- Nichols, G (2009). Field Sedimentology, Facies and Environments. pp. 69-86. *Sedimentology and stratigraphy* / Gary Nichols. – 2nd ed.

- Geffray, O., Ménanteau, L. (2007). Evolución histórica del delta del Atrato entre 1807 51 y 1999. Mapa. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12. Santa Marta, Colombia. P 180.
- PIMECLA (2021-2023). *Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño*. Gobernación de Antioquia, Departamento administrativo de gestión del riesgo de desastres DAGRAN, Corporación académica ambiental Universidad de Antioquia. En proceso de publicación.
- Posada, B. & Henao, W. 2008. *Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano*. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 13.
- Prüssmann, J. (2012). *Nuevos elementos para el manejo integrado de la región de Urabá, costa Caribe colombiana*. Universidad EAFIT.
- Rangel, N., Anfuso, G., & Williams, A. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, vol 114. pp. 129-144.
- Rao, A. (1987). Mangrove ecosystem of Asia and the Pacific. En: *Mangroves of Asia and the Pacific: status and management*. Manila, Unesco/COMES/PNUD.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2ª. Ed. Agriculture Handbook N° 436. Natural Resources Conservation Service. USDA. p. 869.
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to Soil Taxonomy*, 11ª ed. Natural Resources Conservation Service. USDA. p. 155.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 14ª ed. Natural Resources Conservation Service. USDA. p. 393.
- Thomas, Y., Garcia, C., Cesaraccio, M., Rojas, X. (2007). Paisaje en el golfo. Pp. 75-127. en García Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –INVEMAR – y Gobernación de Antioquia. Santa Marta, Colombia. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR N° 12.

- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2018). *Field Indicators of Hydric Soils in the United States*. Version 8.2. L.M. Vasilas, G.W. Hurt, and J.F. Berkowitz (eds.). USDA, NRCS, in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils. p.45.
- Urrego L, Molina E, Suárez J, Ruiz H, Polanía J (2016). Distribución, composición y estructura de los manglares del golfo de Urabá. pp. 109-132. En: Blanco-Libreros, J. F. & M. H. Londoño-Mesa (Eds.). Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano.
- Yáñez, A. & Lara, A. (1999). Los manglares de América Latina en la encrucijada. *Ecosistemas de manglar en América*. Instituto de Ecología A.C. México, UICN/ORMA, Costa Rica, NOAA/NMFS Silver Spring MD USA. p. 380.
- Yolcubal, I., Brusseau, M., Artiola, J., Wierenga, P., & Wilson, L. (2004). Environmental physical properties and processes. *Environmental monitoring and characterization*. pp. 207-239.
- Zapata, R. (2006). *Química de los procesos pedogenéticos*. Escuela de geociencias facultad de ciencias Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín
- Zhu, T., & Dittrich, M. (2016). Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4, 4.