

ADAPTACIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA MITIGAR LA EROSIÓN COSTERA EN SAN ANDRÉS ISLA, CARIBE COLOMBIANO

Cooperación técnica para la Prevención de la erosión costera en la
isla de San Andrés, Colombia – ARCADIS NEDERLAND BV



Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
"José Benito Vives de Andrés" - INVEMAR

Santa Marta D.T.C.H., diciembre 2021

CUERPO DIRECTIVO INVEMAR

Director General

Francisco Armando Arias Isaza

Subdirector de Coordinación Científica

Jesús Antonio Garay Tinoco

Subdirectora Administrativa

Sandra Rincón Cabal

Coordinadora de Investigación e Información para la

Gestión Marina y Costera (GEZ)

Paula Cristina Sierra Correa

Coordinador Programa de Biodiversidad y Ecosistemas Marinos (BEM)

David Alejandro Alonso Carvajal

Coordinadora Programa Calidad Ambiental Marina (CAM)

Luisa Fernanda Espinosa Díaz

Coordinadora Programa Geociencias Marinas y Costeras (GEO)

Constanza Ricaurte Villota

Coordinador Programa Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos y Costeros (VAR)

Mario Enrique Rueda Hernández

Coordinador Servicios Científicos (CSC)

Julián Mauricio Betancourt Portela

Ricaurte-Villota, C., Morales, D., González, M., Rosado, A.F., Parga-Hauzeur, N., Vallejo Toro, P., Bernal, C.A. (2021). Adaptación basada en la naturaleza para mitigar la erosión costera en San Andrés Isla, Caribe colombiano. Informe técnico final. Programa Geociencias Marinas y Costeras y Programa Calidad Ambiental Marina, INVEMAR – ARCADIS NEDERLAND BV. 49 pp.

Preparado por:

PROGRAMA DE GEOCIENCIAS MARINAS Y COSTERAS (GEO) - INVEMAR

Constanza Ricaurte Villota – Oceanógrafa, PhD.
David Fernando Morales Giraldo – Geólogo, MRes.
Marco Elías González Arteaga – Geógrafo
Andrés Felipe Rosado Tapia – Geólogo
Nicolle Parga Hauzeur – Geóloga

PROGRAMA DE CALIDAD AMBIENTAL MARINA (CAM) - INVEMAR

Pedro Pablo Vallejo Toro – Químico, Dr.
Cesar Augusto Bernal – Químico, MSc.

Apoyo en Laboratorio:

Leidy Martínez – Tec. Ambiental
Leydy Alarcón – Qca; Yoselin Nieto – Qca.
Olga Díaz – Qca.; Eliana Bernal-Qca;
Roika Angulo – Qca.; Laura Díaz;
Edinson Orozco – Tec. Químico;
Jonathan Pai – Tec. Químico;
Halbin Serrano – Tec. Ambiental.

Revisión técnica:

David Fernando Morales Giraldo – Geólogo, MRes.
Luisa Fernanda Espinosa – Bióloga, PhD.
Constanza Ricaurte Villota – Oceanógrafa, PhD.

Imagen portada: Vista aérea de Spratt Bight, punta Hansa y la zona del puerto desde el noroccidente de San Andrés Isla (Programa GEO) – junio 2021.

INVEMAR
Calle 25 No. 2-55, Playa Salguero
Santa Marta D.T.C.H., Colombia
Teléfono: (57) (5) 4328600
www.invemar.org.co

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	5
2	AREA DE ESTUDIO	6
3	ALCANCES DE ESTUDIO	8
3.1	OBJETIVO GENERAL	8
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4	METODOLOGÍA	9
4.1	ACOMPañAMIENTO TÉCNICO Y RECOPIlACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	9
4.2	ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO	9
4.2.1	Muestreo de campo	9
4.2.2	Análisis de laboratorio	12
4.2.2.1	Descripción de núcleos	12
4.2.2.2	Densidad	12
4.2.2.3	Granulometría	13
4.2.2.4	Materia orgánica	13
4.2.2.5	Mineralogía	14
4.3	ANÁLISIS DE CONTAMINANTES	14
4.4	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y BATIMÉTRICO	15
4.4.1	Perfiles de playa y línea de costa	15
4.4.2	Batimetría	16
5	RESULTADOS	18
5.1	RECOPIlACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	18
5.1.1	GEOLOGÍA	18
5.1.1.1	Contexto regional	18
5.1.1.2	Formación de la isla de San Andrés	19
5.1.1.3	Estratigrafía de San Andrés	20
5.1.2	GEOMORFOLOGÍA DEL LITORAL	23
5.1.3	SEDIMENTOS	25
5.1.4	MORFOLOGÍA DE FONDOS	25
5.1.5	LISTADO DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	26

5.2	ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO	27
5.2.1	Descripción de núcleos	27
5.2.2	Densidad	28
5.2.3	Granulometría	29
5.2.4	Materia Orgánica.....	31
5.2.5	Mineralogía.....	33
5.3	ANÁLISIS DE CONTAMINANTES	35
5.4	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y BATIMÉTRICO	37
5.4.1	Cambios de la línea de costa	37
5.4.2	Perfiles de playa y perfiles topobatimétricos	38
5.4.3	Identificación de fondo marino	42
6	CONCLUSIONES	45
7	RECOMENDACIONES.....	46
8	BIBLIOGRAFÍA	47

1 INTRODUCCIÓN

En términos de erosión costera, la isla de San Andrés ha presentado un continuo deterioro de las zonas de playa, entre las que se destacan los sectores de Spratt Bight, Rocky Cay y Sound Bay. Diferentes estudios han determinado que el retroceso de la línea de costa, asociado a la pérdida de sedimentos en las playas, afecta las actividades turísticas y reduce la calidad del ecosistema en el territorio insular. Las necesidades de intervención han sido un frecuente llamado por parte de la comunidad raizal y los inversionistas de la industria del turismo por lo cual diferentes instituciones de índole nacional e internacional han abordado soluciones a la problemática que no se han concretado en obras tangibles. Es por ello, que INVEMAR se interesa en participar de la invitación realizada por DELTARES, empresa holandesa cuyo análisis de términos de referencias identificó la capacidad del instituto por recomendación de otros participantes de su mesa de trabajo (MINAMBIENTE, CORALINA, DIMAR) para apoyar la adquisición de datos en campo que contribuyan al objeto del proyecto.

De acuerdo con las instituciones y expertos holandeses, la experiencia y estrategias a nivel internacional se direcciona hacia el uso de herramientas de prevención de erosión costera promocionando soluciones basadas en la naturaleza. A pesar de las intervenciones existentes en San Andrés, como son espolones, muros de concreto y bolsacretos, el efecto de los procesos oceanográficos continúa afectando el litoral insular razón por la cual se promueve una visión integral del área. Entre algunas de las recomendaciones previas de intervención se tiene la restauración de dunas, relocalización de comunidades, localización de arrecifes artificiales, relleno de playas con material de dragado y otras. Esta propuesta ahonda en la participación de INVEMAR para la caracterización sedimentológica y geomorfológica de las playas como contribución a la actualización del estado físico y ambiental.

2 AREA DE ESTUDIO

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está conformado por 9 islas volcánicas (Albuquerque, Este-Sureste, San Andrés, Providencia, Roncador, Quitasueño, Serrana, Serranilla y Bajo Nuevo) y demás geoformas en el fondo oceánico (ridges, montes submarinos, barreras de coral, entre otros) (Idárraga-García et al., 2021) pertenecientes a la región Caribe insular de Colombia. Este sistema de islas se localiza en el extremo occidental del mar Caribe colombiano, en límites marítimos con los países de Costa Rica, Panamá, Nicaragua, Honduras, Jamaica, Haití y República Dominicana. Su área emergida, representa menos del 1% de su territorio y hace parte de la sección sur del Área Marina Protegida – AMP Seaflower, contenida dentro de la Reserva de Biosfera Seaflower, declarada por la UNESCO en el año 2000 dado el valor paisajístico, ambiental, cultural, biológico y la variedad de servicios ecosistémicos con los que cuenta esta región (CORALINA-INVEMAR, 2012).

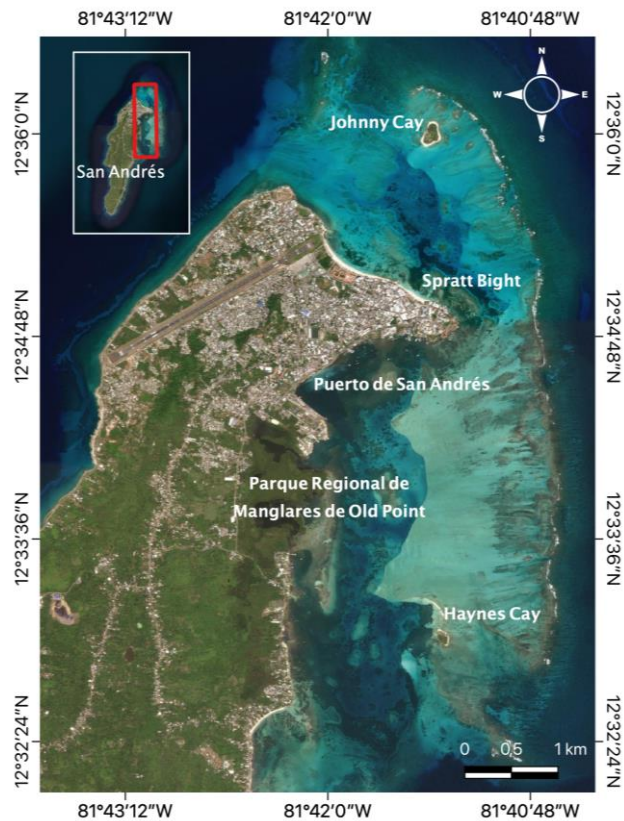


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.

Uno de los principales destinos turísticos del archipiélago es la isla de San Andrés. Esta isla oceánica colombiana, cuenta con un área aproximada de 27 km² lo cual la convierte en la más extensa del archipiélago (12.5 km de largo y un ancho máximo de 3 km) (CORALINA-INVEMAR, 2012), y una de las más propensas a problemáticas de erosión costera. Se aproxima que cerca de 7 km costeros (correspondientes a un 16% de la isla) están bajo amenaza por procesos erosivos (INVEMAR-GEO, 2015). En este informe la problemática erosiva de interés se presenta en la playa turística Spratt Bight, ubicada al NE de la isla de San Andrés, entre las coordenadas 12°35'27.08" N, 12°35'00.08" N, y 81°42'01.66" W, 81°41'22.92" W (Figura 2.1).

Para la evaluación y planteamiento de soluciones basadas en la naturaleza se llevó a cabo la caracterización sedimentológica y geomorfológica, en esta área como al NW de Spratt Bight cerca Jhonny Cay y en el canal de acceso al puerto de San Andrés (Figura 2.1); las dos últimas con la finalidad de determinar su potencial como fuente de material de relleno.

3 ALCANCES DE ESTUDIO

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a los estudios físico-químicos de las playas de San Andrés, específicamente Spratt Bight, en vías de promover alternativas de solución basadas en la naturaleza.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Acompañar técnicamente los estudios físicos y la generación de alternativas basadas en la naturaleza.
- Realizar análisis sedimentológicos físicos y químicos de las muestras de sedimento.
- Generar información topográfica y batimétrica de las playas de Spratt Bight.

4 METODOLOGÍA

4.1 ACOMPAÑAMIENTO TÉCNICO Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para el proyecto se realizó el acompañamiento técnico al equipo del consorcio. Se compiló la información disponible en cuanto a geología, geomorfología y sedimentología del área de estudio dentro del marco de los diferentes proyectos de investigación, informes y publicaciones relacionadas con la temática del proyecto.

4.2 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

4.2.1 Muestreo de campo

Se realizó la adquisición de 4 muestras de sedimento en la playa de Spratt Bight y 3 en el sector NW de la isla (Figura 4.2) utilizando un método manual (pala y draga Van Veen) (Figura 4.1), procurando la obtención de 500 g de muestra las cuales fueron almacenadas en bolsas ziplock en una nevera portátil para su traslado a las instalaciones de INVEMAR en Santa Marta.

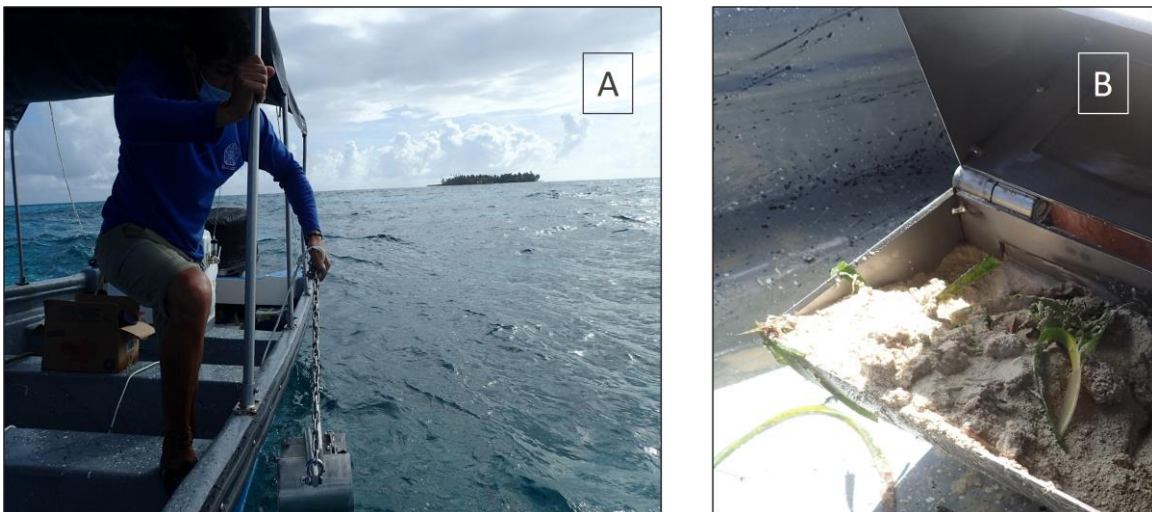


Figura 4.1. Maniobra de recuperación de sedimentos de fondo con draga Van Veen. A) Lanzamiento de draga. B) Recuperación de sedimento.

Se complementó el estudio con la obtención de 10 muestras de sedimento en la zona del canal de acceso al puerto, en zonas previamente identificadas como áreas de depósito no consolidado, utilizando una draga Van Veen de 0,04 m², procurando la obtención de 500 g o más

de muestra de sedimento para ser almacenada en bolsas ziplock en una nevera portátil para su traslado a las instalaciones de INVEMAR en Santa Marta (

Tabla 4.1, Figura 4.2). Adicionalmente, se colectaron dos núcleos de sedimento utilizando tubos de PVC.

Tabla 4.1 Localización de muestras y profundidades de recolección

Código de muestra	Latitud	Longitud	Localidad	Profundidad (m)
SB1	12°35'13.65"	81°41'54.79"	Supramareal Spratt Bight	-
SB2	12°35'24.28"	81°41'42.96"	Frente de Spratt Bight	-4,3
SB3	12°35'12.47"	81°41'28.23"	Frente de Spratt Bight	-7,7
SB4	12°35'3.03"	81°41'30.47"	Supramareal Spratt Bight	-
SD1	12°35'44.89"	81°41'54.76"	Sector NW	-5,9
SD2	12°35'56.75"	81°41'37.51"	Sector NW	-5,2
SD3	12°36'11.24"	81°41'51.51"	Sector NW	-2,9
C1	12°32'25.73"	81°41'35.96"	Canal de acceso	-10,2
C2	12°32'38.64"	81°41'43.15"	Canal de acceso	-12,7
C3	12°32'50.42"	81°41'42.10"	Canal de acceso	-10
C3 + Núcleo	12°32'50.42"	81°41'42.10"	Canal de acceso	-10
C4	12°33'5.74"	81°41'53.26"	Canal de acceso	-11,2
C5	12°33'19.86"	81°41'53.37"	Canal de acceso	-8,5
C5 + Núcleo	12°33'19.86"	81°41'53.37"	Canal de acceso	-8,5
C6	12°33'29.39"	81°41'48.39"	Canal de acceso	-11,6
C7	12°33'47.72"	81°41'52.01"	Canal de acceso	-6,1
C8	12°34'1.41"	81°41'43.98"	Canal de acceso	-4,6

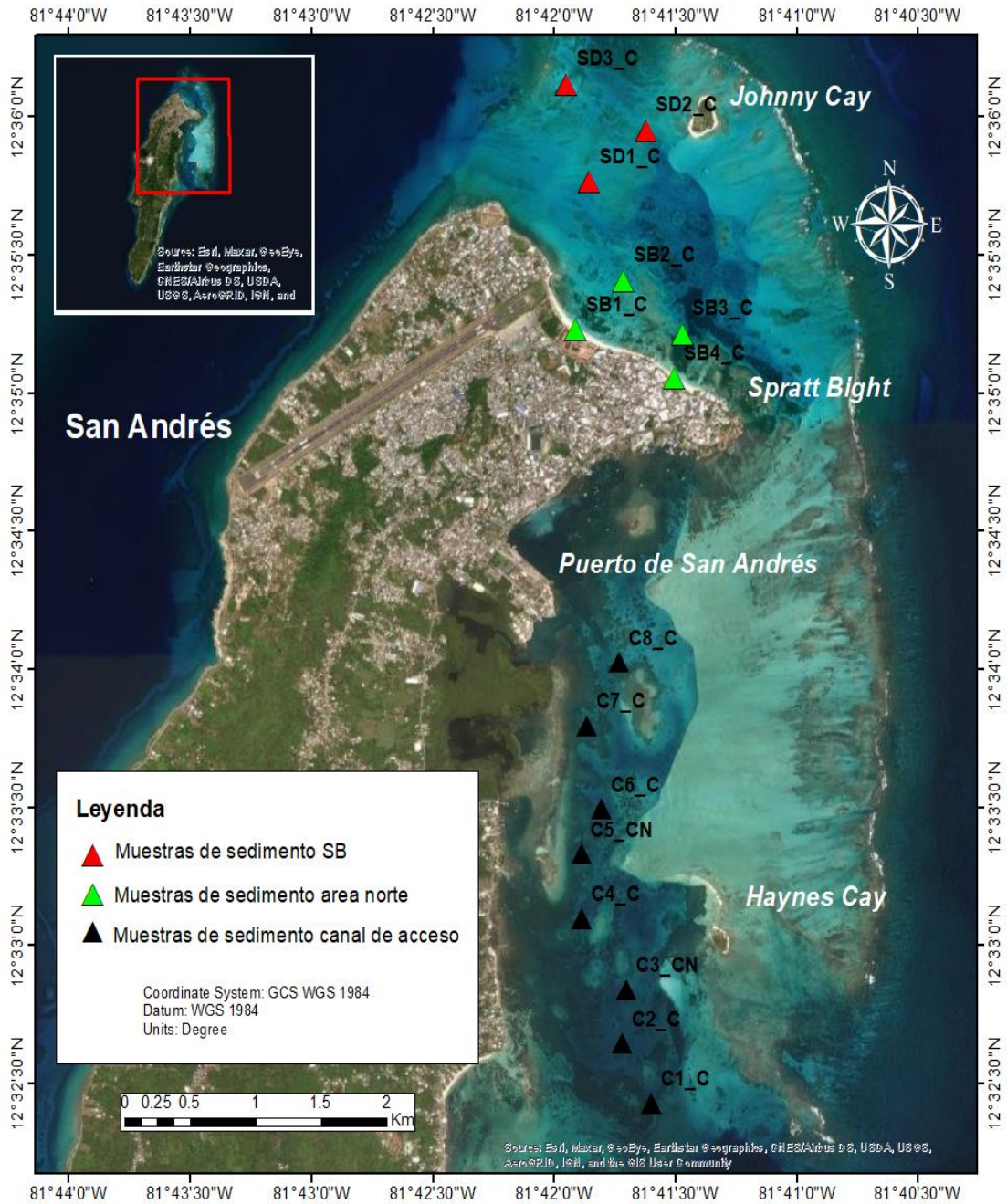


Figura 4.2 Ubicación de muestras recolectadas el 12 de Noviembre para el proyecto ARCADIS

4.2.2 *Análisis de laboratorio*

4.2.2.1 Descripción de núcleos

La obtención de núcleos es útil para conocer la variación del sedimento a profundidad y establecer la presencia de estructuras sedimentarias o contactos geológicos. Para hacer el reconocimiento y descripción del sedimento recolectado por los núcleos C3_N y C5_N se requirió la apertura de los tubos PVC (procedimiento realizado por el técnico del laboratorio) (Figura 4.3) y posterior descripción del geólogo. A partir de allí se reportaron las principales características observables: cambios texturales, color, identificación preliminar de minerales y presencia de algas marinas.



Figura 4.3 Procedimiento de apertura de núcleos en el Laboratorio de Instrumentación Marina -LABIMA.

4.2.2.2 Densidad

Una vez entregadas las muestras se procedió a realizar el análisis de densidad en el laboratorio de instrumentación marina (LABIMA). El procedimiento se ejecutó bajo los conceptos de densidad aparente saturada y densidad aparente seca de Barnes (2016). Al implementar esta metodología se obtuvo un valor aproximado de la compactación del sedimento mas no la densidad del material que lo compone. Teniendo esto en cuenta, se requirió que la muestra de sedimento no hubiera sido homogenizada ni manipulada; esto con el propósito de preservar el arreglo, compactación y humedad de las partículas.

Para el estudio se estableció un volumen de muestra fijo (10 cm^3) el cual fue recolectado directamente del bloque de sedimento con una jeringa previamente calibrada. Se registró el peso de la fracción recolectada y se depositó en un disco Petri para ser secado durante 24 horas a 90°C y pesado nuevamente (Figura 4.4). A partir de estos datos se calculó la relación masa/volumen y se obtuvo la densidad aparente saturada y húmeda.

Se aclara que lo ideal sería extraer este volumen determinado directamente del ambiente de depositación para preservar el grado de compactación natural, sin embargo, la metodología empleada es adecuada para obtener un valor aproximado de dicha variable.

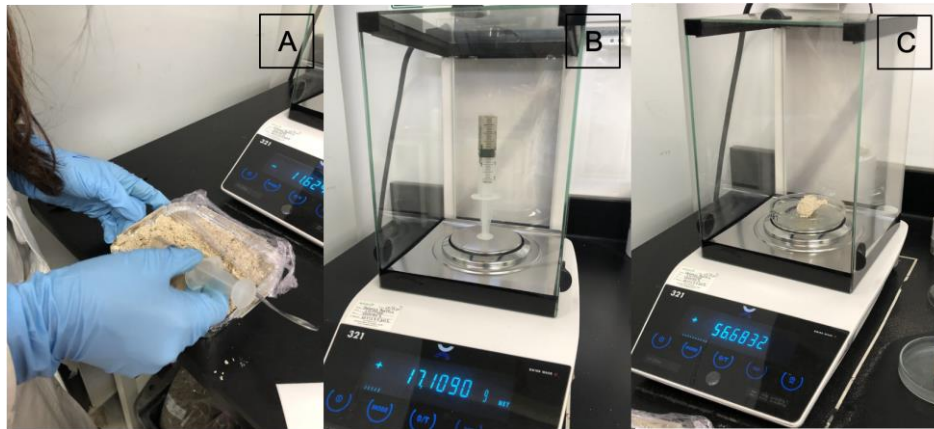


Figura 4.4 Procedimiento para calcular la densidad del sedimento. A) Extracción del material con jeringa. B) Peso de 10 cm³ de sedimento húmedo en jeringa. C) Peso de sedimento seco en disco Petri.

4.2.2.3 Granulometría

El análisis textural de las muestras recolectadas para el proyecto ARCADIS se realizó a través del método de granulometría por tamices. Para la preparación de las muestras se hizo un lavado previo con hexametáfosfato de sodio [(NaPO₄)₆] en solución al 0,25%, a aquellos ejemplares con altos porcentajes de partículas <63 μm, y posteriormente se secó la totalidad de muestras a 90°C por 48 horas hasta obtener un peso constante sin humedad.

Para este procedimiento se implementó un set de seis tamices con diferente abertura de malla: 2 mm, 1 mm, 500 μm, 250 μm, 125 μm, y 63 μm. Una vez obtenidos los pesos por fracción se procesaron los datos en el software GRADISTAT 4.0 (Blott & Pye, 2001) generando un análisis textural detallado, incluyendo parámetros estadísticos como la media, el tipo de selección, el coeficiente de simetría y Curtosis (Folk & Ward, 1957).

4.2.2.4 Materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica en las muestras se obtuvo por el método de pérdida por ignición. Se expusieron 5 gr de sedimento seco de tamaños < 2mm a una temperatura de 430°C en un horno-mufla durante 24 h para después reportar el peso final/remanente de la muestra. Durante el procedimiento la materia orgánica sufre un proceso de oxidación y se destruye (Unda et al., 2020). Finalmente, para definir el porcentaje de materia orgánica se emplea la ecuación %MO= 100 x (1- [Peso final/Peso inicial]).

4.2.2.5 Mineralogía

Se escogió una muestra representativa de cada sector de la zona de estudio (playa Spratt Bight, NW de Spratt Bight y el canal de acceso – tres muestras en total) para la descripción composicional y textural. Dicha descripción se ejecutó mediante la observación de la fracción predominante (previamente determinada en la granulometría) en una lupa binocular/estereoscopio. En esta se determinaron sistemáticamente los porcentajes de minerales constituyentes de la muestra, redondez y esfericidad del material.

4.3 ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

Para el análisis de metales y contaminantes orgánicos se seleccionaron once muestras de sedimento, que fueron llevadas a la Unidad de laboratorios de calidad ambiental marina (LABCAM), para su análisis, siguiendo las metodologías estandarizadas que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Variables y métodos de análisis para la caracterización química de sedimentos.

Variable	Límite de cuantificación	Método de análisis
Arsénico total	2,00 mg kg ⁻¹	Digestión asistida por microondas EPA 3052 y cuantificación por Absorción atómica con horno de grafito EPA 7010
Cadmio Total	0,042 mg kg ⁻¹	Digestión asistida por microondas EPA 3052 y cuantificación por Absorción atómica SM 3111B
Cobre Total	5,00 mg kg ⁻¹	
Cromo Total	25,0 mg kg ⁻¹	
Níquel Total	0,42 mg kg ⁻¹	
Plomo Total	15,0 mg kg ⁻¹	
Zinc Total	10,0 mg kg ⁻¹	
Mercurio total	0,003 mg kg ⁻¹	Descomposición térmica, amalgamación y espectrometría de absorción atómica. Método EPA 7473.
Hidrocarburos alifáticos C8-C40	0,50 mg kg ⁻¹	Extracción soxhlet con diclorometano:acetona, fraccionamiento en columna de sílica:alúmina y cuantificación GC-MSD. EPA 3540C:1996, EPA 3630C:1996, EPA 8270E:2017
Hidrocarburos HAPs (16 compuestos)	0,006 mg kg ⁻¹	Extracción soxhlet con diclorometano:acetona, fraccionamiento en columna de sílica:alúmina y cuantificación GC-MSD. EPA 3540C:1996, EPA 3630C:1996, EPA 8270E:2017

<p>Bifenilos policlorados – PCBs</p>	<p>PCB 28: 0,10 mg kg⁻¹ PCB 52: 0,40 mg kg⁻¹ PCB 101: 0,10 mg kg⁻¹ PCB 118: 0,050 mg kg⁻¹ PCB 138: 0,050 mg kg⁻¹ PCB 153: 0,050 mg kg⁻¹ PCB 180: 0,025 mg kg⁻¹</p>	<p>Extracción Asistida por Microondas EPA 3546, limpieza con ácido sulfúrico:agua (1:1) o solución de permanganato de potasio al 5% EPA 3556A, Limpieza o remoción de azufre con cobre EPA 3660B, Limpieza con florisil EPA 3620C. Lectura EPA 8082A (PCBs).</p>
<p>Carbono Orgánico Total – COT</p>	<p>0,10 %</p>	<p>Método de combustión catalítica y determinación por analizador de carbono total ISO 10694 / calculo estequiométrico</p>

Las concentraciones de los contaminantes se determinaron con base al peso seco y se normalizaron a la fracción del sedimento menor de 2 mm. Estos valores fueron comparados con los límites establecidos por diferentes directrices internacionales, a nivel Sudamérica se compararon con la Resolución 454 del concejo nacional del medio ambiente de Brasil (CONAMA, 2012), quienes establecen dos niveles el Nivel 1, Umbral por debajo del cual hay menos probabilidad de efectos adversos para la biota y el Nivel 2, Umbral por encima del cual hay mayor probabilidad de efectos adversos para la biota.

4.4 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y BATIMÉTRICO

4.4.1 Perfiles de playa y línea de costa

Se realizó el levantamiento topográfico de 5 perfiles de playa con estación total y levantamiento de línea de costa con equipo GNSS a lo largo de la playa de Spratt Bight en la isla San Andrés. Los perfiles se iniciaron en un punto de referencia (PR) en la parte trasera de la playa, donde el depósito limita con la infraestructura destinada a actividades turísticas y de ocio (calles y edificios), y, se finalizaron hasta donde fue posible y segura la operación con estación total (aproximadamente -1 metro de profundidad) (

Figura 4.5).

Se obtuvo un set de datos topográficos levantados con estación total para cada perfil en el Sistema de Coordenadas UTM 17N con Datum WGS84. En la Tabla 4.3 se referencia las coordenadas iniciales y azimut de cada perfil. Por otro lado, se obtuvo también un set de datos GNSS de la línea de costa georreferenciados en el mismo sistema de coordenadas, a los cuales se les aplicó un procesamiento diferencial utilizando como dato de referencia la estación base de la GEORED.



Figura 4.5 Levantamiento de perfiles de playa y línea de costa. A y B) Levantamiento de perfiles con estación total. C) Estado generalizado de la playa Spratt Bight.

Tabla 4.3 Localización los puntos de referencia y orientación de los perfiles de playa levantados en Spratt Bight

PERFIL	Datum: UTM 17N		AZIMUT
	NORTE (m)	ESTE (m)	
PFSB 01	1391178,7	424902,3	33°
PFSB 02	1391284,0	424778,6	39°
PFSB 03	1391409,7	424591,5	20°
PFSB 04	1391497,4	424225,6	30°
PFSB 05	1391691,8	423987,6	60°

4.4.2 Batimetría

Utilizando la ecosonda Garmin GPS546 de tipo monohaz abordo de una embarcación (lancha) se obtuvieron datos de profundidad en la bahía de Spratt Bight (Figura 4.6). Estos fueron procesados posteriormente para obtener perfiles topobatimétricos que se extienden desde la playa hacia el fondo. Así mismo en esta área se realizaron 3 transectos de reconocimiento del

fondo marino al NW de Johnny Cay y se registró material multimedia (fotos y videos) con el apoyo de un buzo técnico local (Figura 4.7).



Figura 4.6 Maniobras de adquisición batimétrica en el área de la bahía de Spratt Bight. A) Monitoreo y operación de la sonda monohaz. B) Montaje de transductor fuera de borda.



Figura 4.7. Mapa de transectos de reconocimiento de fondo marino al NW de San Andrés.

5 RESULTADOS

5.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

5.1.1 GEOLOGÍA

5.1.1.1 Contexto regional

A nivel geológico regional, el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se sitúa sobre el sector SW de la placa tectónica Caribe; un sector de tectónica compleja donde coexisten provincias tanto de origen continental como oceánico con expresiones morfológicas características en el lecho marino originadas y/o modificadas por procesos geológicos aun poco explorados hoy en día (Idárraga-García *et al.*, 2021).

La elevación de Nicaragua o Nicaraguan Rise en inglés, es un alto batimétrico orientado en sentido NW-SE que se enmarca en el área de estudio; este se subdivide en los bloques Upper Nicaraguan Rise y Lower Nicaraguan Rise (Case *et al.*, 1990). Se ha propuesto mediante la observación de datos geofísicos que el Upper Nicaraguan Rise, esta infrayacido por corteza de origen continental; mientras que bajo el Lower Nicaraguan Rise se encuentra un basamento de afinidad oceánica. Es decir que, el bloque denominado Lower Nicaraguan Rise estaría confinado al NW por el Upper Nicaraguan Rise y al SE por la cuenca Colombia (bloque de la placa Caribe) (Mauffret and Leroy, 1997) (Figura 5.1). Sobre el Lower Nicaraguan Rise se sitúa el denominado archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Las islas y demás expresiones morfológicas asociadas a este sistema, exhiben un patrón de lineamiento que sugiere la presencia de una zona de fallas submarina asociada a procesos de vulcanismo inactivo (Geister, 1992). Por ejemplo, las islas de Albuquerque, Quitasueño, San Andrés y Providencia, están orientadas en sentido NE-SW - NNE-SSW, paralelo al trazo del sistema de fallas de Albuquerque-Providencia. Estos sistemas de falla, configuran sitios de tectónica transtensional intraplaca, lo cual favorece el desarrollo del vulcanismo en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Idárraga-García *et al.*, 2021). La distinción de una nueva provincia denominada "Provincia Volcánica Caribe NW" se efectúa debido a los rasgos geológicos y morfológicos distintivos identificados en el lecho marino adyacente al archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina característicos de un origen tectónico-volcánico (Idárraga-García *et al.*, 2021). Diversos estudios en el área afirman que las islas, montes submarinos y ridges en este sector (Lower Nicaraguan Rise), fueron originados en el cenozoico temprano como volcanes que fueron experimentando procesos de subsidencia y posteriormente fueron cubiertos por depósitos de carbonatos que tomaron su lugar y conforman hoy en día la parte emergida de varios de estos sitios (Christofferson, 1983; Case *et al.*, 1990; Carvajal-Arenas and Mann, 2018).

Un ejemplo de ello es la isla de San Andrés, conformada principalmente por depósitos calcáreos cenozoicos de origen biogénico situados sobre un basamento de origen volcánico (Geister & Diaz, 2007).

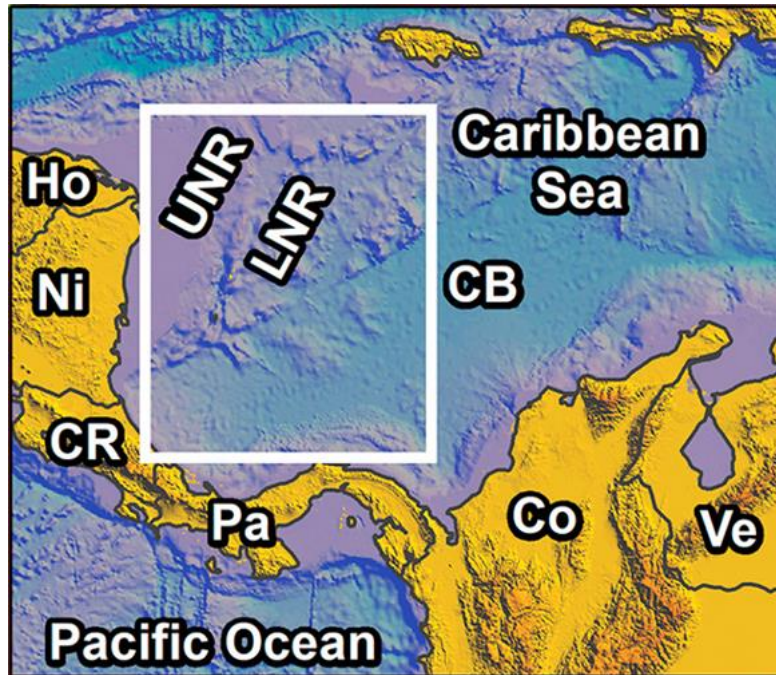


Figura 5.1. Mapa esquematizado del contexto geológico-tectónico regional del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Ho: Honduras, Ni: Nicaragua, CR: Costa Rica, Pa: Panamá, Co: Colombia, Ve: Venezuela, CB: Caribbean Basin, LNR: Lower Nicaraguan Rise, UNR: Upper Nicaraguan Rise. Tomado de Idárraga-García *et al.*, 2021.

5.1.1.2 Formación de la isla de San Andrés

La isla de San Andrés ha sido el resultado de una compleja actividad tectónica y variedad de procesos sedimentarios que esculpen y modifican su forma a través del tiempo geológico (Figura 5.2). Se estima que un vulcanismo de edad Pre-Mioceno generó unos conos volcánicos a lo largo de las zonas de falla del Alto de Nicaragua, con orientación NNE y S, los cuales llegaron a alturas similares o superiores del nivel del mar. Estos conos sufrieron una lenta subsidencia hasta el Mioceno tardío que favoreció la colonización de arrecifes de coral y cobertura con material

detrítico calcáreo (lodo calcáreo y arena) (Hernández, 2013) en el tope de las estructuras. Este fenómeno los convirtió en atolones una vez cesó la subsidencia. (Geister, 2007)

En el Mioceno superior, el atolón comenzó a bascularse hacia el Este como resultado del levantamiento de la parte oriental de la fosa San Andrés/Old Providence (Geister, 2007). Este basculamiento resulto en la emergencia de la parte oeste del atolón, creando una isla calcárea alta, que ha sufrido meteorización y erosión subaérea continua hasta alcanzar su actual altura de 87 msnm. La parte oriental, en contraste, sufrió subsidencia hasta el presente, permaneciendo una plataforma carbonatada productiva, que hoy corresponde a la moderna barrera arrecifal que se extiende al oriente de la isla (INVEMAR-GEO, 2015) (Figura 5.2).

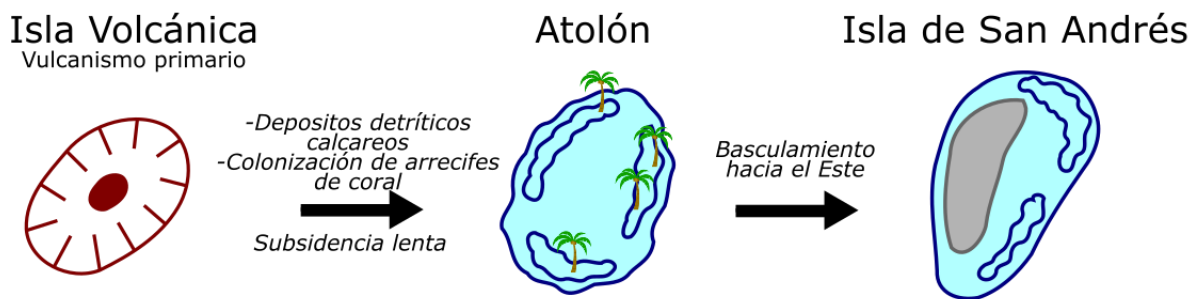


Figura 5.2. Esquema de la formación de San Andrés simplificado. Modificado de Geister, 2007

5.1.1.3 Estratigrafía de San Andrés

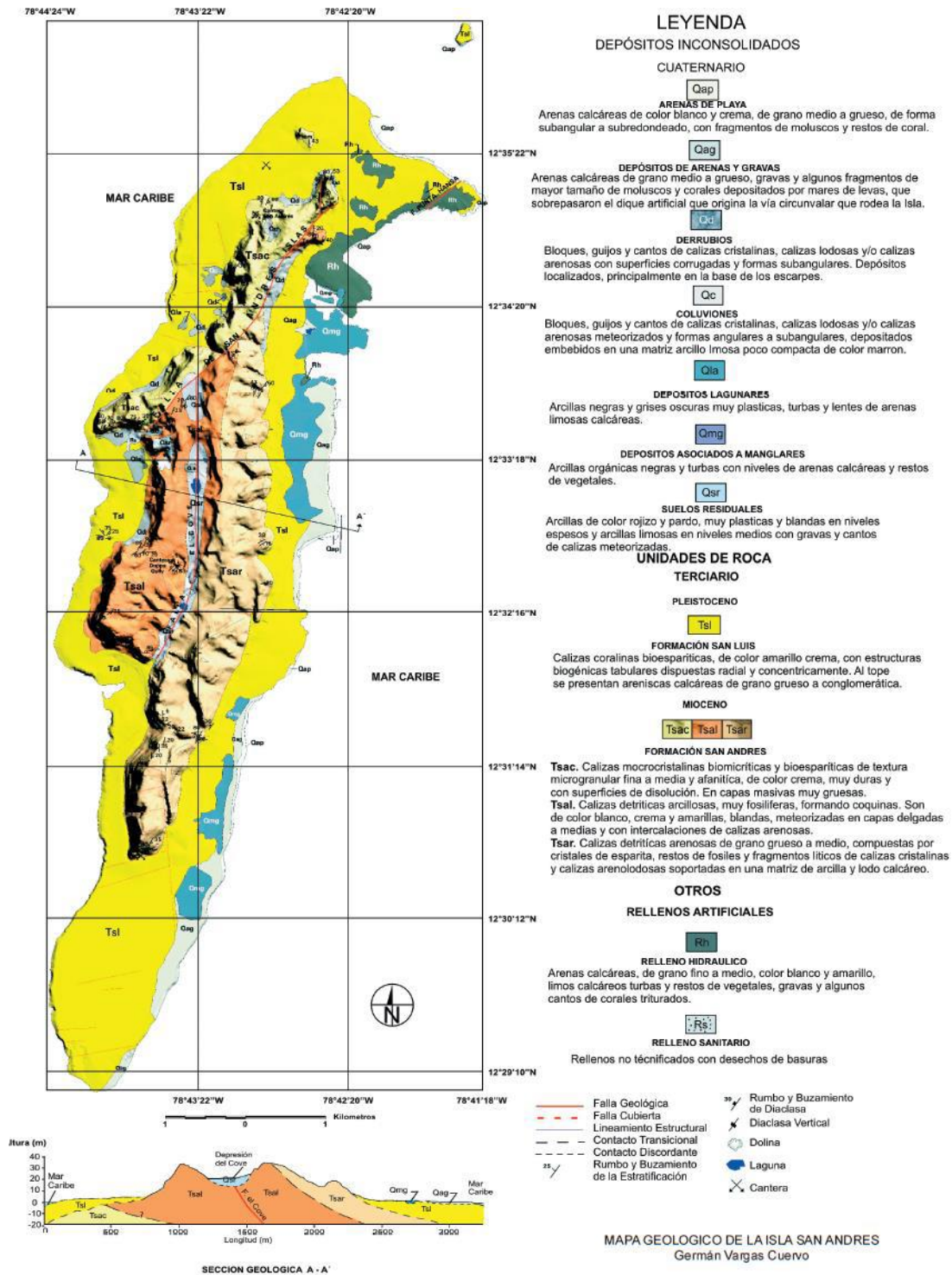
Vargas (2005) divide la estratigrafía en dos grupos importantes y genera un mapa geomorfológico de la isla de San Andrés (Figura 5.3). Aquellas de edad terciaria principalmente constituidas por material calcáreo, como la Formación San Andrés de edad Mioceno y la Formación San Luis de edad Pleistoceno, y los depósitos cuaternarios que incluyen la formación Bahía, depósitos lacustres, depósitos asociados a zonas de manglar, coluviones o derrubios y depósitos de origen antrópico.

- Formación San Andrés: Esta formación es de edad Mioceno Medio a Superior (Burgl, 1959) con un ambiente de deposición de -lagoon- en el periodo donde la isla era un atolón (Sáenz et al., 2009). Dicha formación aflora en las colinas del centro de la isla y posee espesores perforados mayores a 113 m e inferidos de 250 m. La litología corresponde a calizas microcristalinas esparíticas, calizas arenosas y lodosas de origen detrítico (Vargas, 2005).
- Formación San Luis: Está constituida por calizas coralinas arrecifales de composición bioesparítica (Vargas, 2005) de edad inferida Pleistoceno (Burgl, 1959) con espesores

perforados de 15 m. Estas componen la plataforma continental de la isla creando una morfología inclinada hacia el océano.

- Formación Bahía: Esta descrita por Vargas (2005) como arenas de playa, depósitos de arenas y gravas, depósitos lagunares, depósitos asociados a manglares. Estos se encuentran sobre la formación del Pleistoceno, debido a la erosión y transporte de los depósitos calcáreos.
- Depósitos de ladera: Este tipo de depósito está constituido principalmente por derrubios, con tamaños de partículas de hasta 4 m³, ubicados en las bases de las laderas y escarpes rocosos de los taludes bajos de la zona central de la isla. En una menor proporción están los coluviones. En la región del Cove se caracterizó uno de estos depósitos de 1,5 m, con fragmentos de calizas alteradas de hasta 60 cm y formas subangulares a angulares en una matriz arcillo limosa (Sáenz *et al.*, 2009).
- Depósitos de origen antrópico: La intervención antrópica de la isla es alta; se han cartografiado rellenos hidráulicos con espesores variables de hasta 20 m, constituidos en mayor proporción por arenas y limos y menor proporción gravas y restos de materia orgánica y depósitos sanitarios localizados al occidente de la isla cerca de Schooner Bight (Vargas, 2005).

ADAPTACIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA MITIGAR
LA EROSIÓN COSTERA EN SAN ANDRÉS ISLA, CARIBE
COLOMBIANO



5.1.2 GEOMORFOLOGÍA DEL LITORAL

La geomorfología del área de estudio muestra diferencias marcadas. Inicialmente, el área problemática conocida como la playa turística Spratt Bight, está compuesta por depósitos de playa con alta vulnerabilidad por erosión costera. La permanencia o la remoción de sedimentos en esta zona está contralada por múltiples variables naturales y antrópicas. La afectación por fenómenos hidrometeorológicos extremos como tormentas y huracanes modifica su morfología, al igual que fenómenos estacionales como la acción de los vientos alisios causantes del oleaje. Por otra parte, se presentan intervenciones antrópicas rígidas como espolones, muros, vías, canales de descargas de agua y un paseo peatonal, y, acciones comunales blandas pero agresivas como eliminación de vegetación y rellenos de playa.

La geomorfología en el canal de acceso al puerto tiene más elementos geomorfológicos distintivos. Fundiéndose con las bermas de las playas, entre las coordenadas 12°33'30,90"N, 81°42'13,54"O y 12°32'27,18"N, 81°42'27,25"O, cartografía depósitos de tormenta. Estas estructuras son cuerpos paralelos a la costa, depositados durante eventos extremos meteorológicos, compuestos de fragmentos de roca coralina con tamaños desde cantos hasta gránulos, con dimensiones de hasta 4 m de ancho, 60 cm de alto y pendientes >15° (INVEMAR-GEO, 2015). Otro elemento distintivo de esta zona, son los pantanos de manglar. Estos son muy comunes en la zona este de la isla, y están localizados en zonas deprimidas cercanas a la costa, en sectores de lagunas arrecifales protegidas. El sedimento allí se caracteriza por ser lodoso con aportes arenosos y turbas (INVEMAR-GEO, 2015). La especie dominante es *Rhizophora sp.* importante para la preservación del ecosistema ya que sus raíces atrapan sedimentos y sirven de protección para el oleaje. Rellenos artificiales ocupan un área amplia en aledaños a la zona del canal, parte del terminal marítimo, muelles y vías de acceso se construyeron con eso.

ADAPTACIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA MITIGAR
LA EROSIÓN COSTERA EN SAN ANDRÉS ISLA, CARIBE
COLOMBIANO

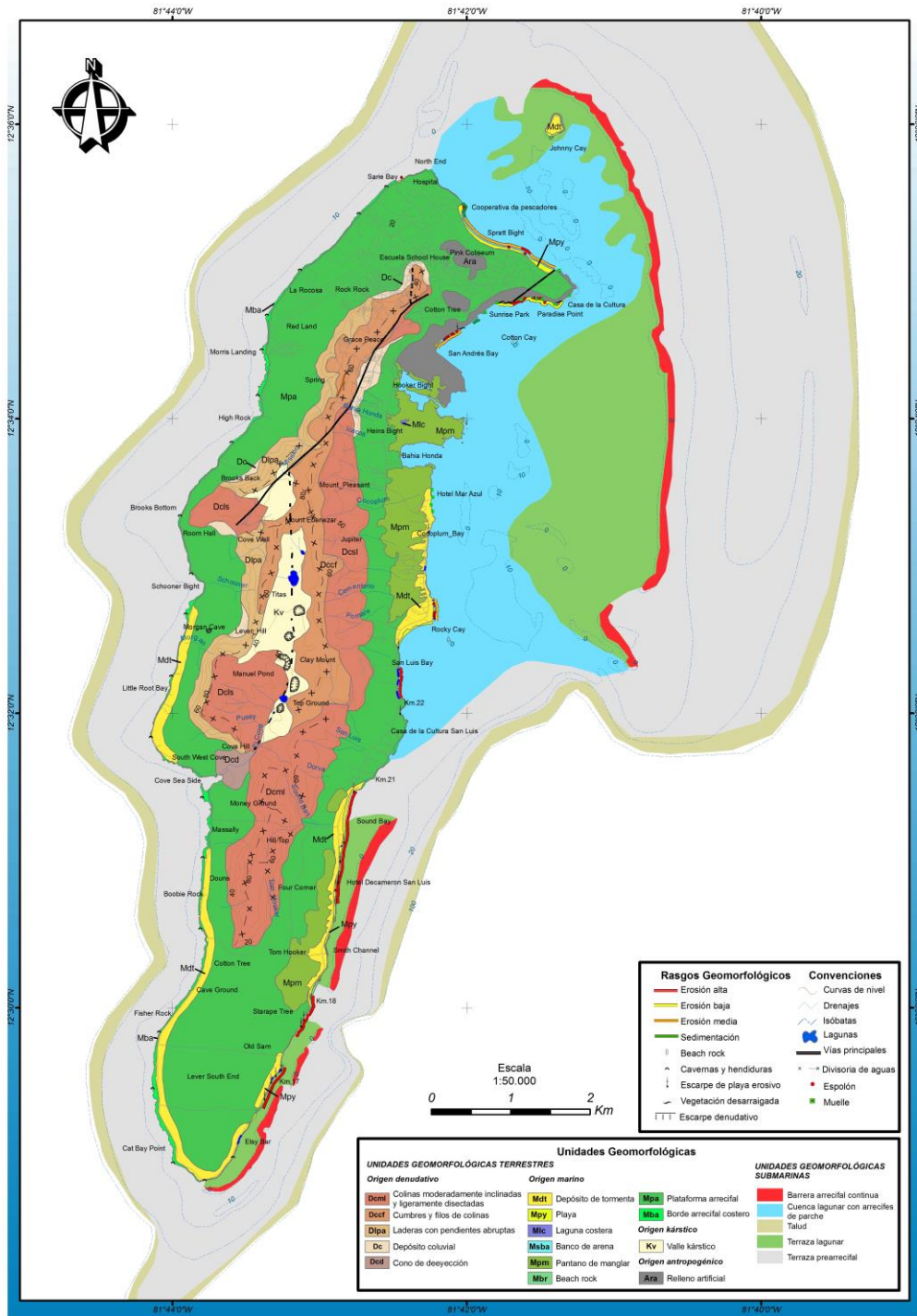


Figura 5.4. Mapa de geomorfología y amenazas para la isla de San Andrés. Tomado de Posada *et al.*, 2011.

5.1.3 SEDIMENTOS

De manera general los sedimentos de San Andrés están compuestos por partículas de origen biogénico provenientes de organismos marinos. La mayor fuente de sedimentos se produce por la acción mecánica de las olas que erosiona los ecosistemas de coral circundantes. Este material después es transportado a parte someras y nutre geoformas marinas y costeras como playas y cayos (Martín-Prieto, 2013). En épocas de tormenta la acción erosiva es más intensa y hay mayor cantidad de material removido. Otra fuente de sedimento en la parte oriental de la isla son los fondos someros de las lagunas. Estas se caracterizan por tener amplias zonas productivas con pasto marino (*Thalassia testudinum*) y alga calcárea (*Halimeda spp*); se estima que un 50% de la arena de esta zona del Caribe está compuesta por fragmentos del esqueleto de dichas algas (INVEMAR, 2005).

Ossa (2004) muestra que el material constituyente de Spratt Bight son partículas de tamaño arena fina con 58% corales, 21% algas 12% moluscos y 9% foraminíferos. Mientras que Saenz et al., (2009) describe la zona del canal del acceso como partículas pobremente seleccionadas, con presencia de arenas finas, medias y gruesas, y distribuciones platicúrticas y mesocúrticas.

5.1.4 MORFOLOGÍA DE FONDOS

Los más recientes monitoreos geofísicos en el canal de acceso al puerto de San Andrés fueron compartidos bajo el marco de proyecto BPIN Erosión costera de INVEMAR donde describen información de perfiles recolectados en octubre 2009. INVEMAR (2011) muestra que el canal está ubicado paralelo a línea de costa y está limitado por dos plataformas coralinas que le dan un sentido N - S. La plataforma occidental corresponde a la constituyente de la isla de San Andrés y la oriental es una formación coralina de espesor 2-3 m con inclinación de 20° que constituye una franja desde el NE de la isla. Se estima que el espesor de arenas oscila entre 0,1 y 6 m en dos áreas de interés en la latitud de Bahía Honda. El área norte se caracteriza por ser un depósito cerrado mientras que el área sur es una cuenca cóncava de baja pendiente que permite la extensión del depósito, con espesores promedios de 3 m con montículos cubiertos por formaciones coralinas (INVEMAR, 2011).

Sáenz *et al.*, (2009) genera interpretaciones geofísicas de los datos obtenidos en Julio 2009 los cuales son muy similares a los recientes (Figura 5.5). Muestran que hay una variabilidad en los espesores de sedimento (2 - 5 m) y debido a la baja densidad de líneas y la dirección del registro, no fue posible definir las tendencias en cuanto a las acumulaciones de las arenas. A pesar de la poca resolución lograron identificar espesores de hasta 5 m de arena y realizaron un modelo aproximado para el volumen de arenas con resultado 112.000 m³.

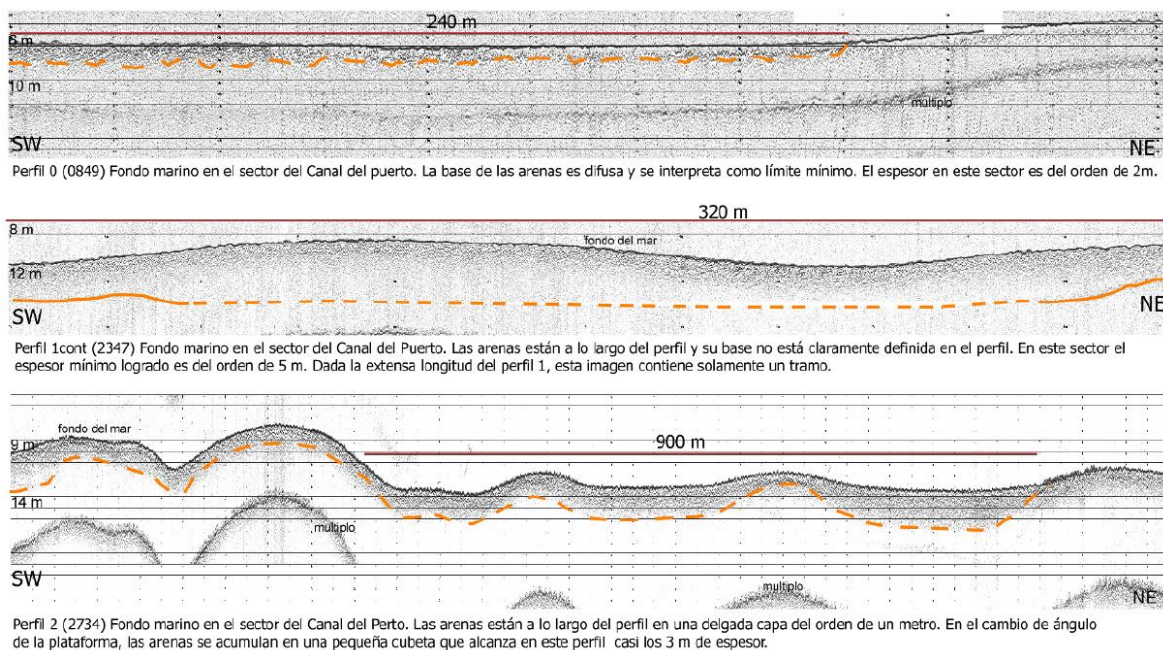


Figura 5.5. Depósitos de arenas en el sector del canal de acceso al puerto. Tomado de Sáenz *et al.*, 2009.

5.1.5 LISTADO DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para el proyecto se realizó el acompañamiento técnico y se compiló la información disponible en cuanto a geología, geomorfología y sedimentología del área de estudio. A continuación, se hace un listado de informes y artículos de interés.

- INVEMAR-GEO. (2008) Estudios para la recuperación de las playas del hotel Decamerón San Luis
- Sáenz, H.F., J.M. Betancourt, B.O. Posada, I. Restrepo, D.F. Morales, M.P. Bolaño, D. Vega, L.A. Mejía, A. Merchán, L.A. Gómez Y L.C. Gámez. (2009) - Diagnóstico geológico, geofísico, biótico y de caracterización de la calidad de las aguas y sedimentos del proyecto de definición del diseño de las playas entre el hoyo soplador y San Luis en San Andrés Isla.
- Posada, B. O., D. Morales-G. y W. Henao P. (2011) - Diagnóstico de la erosión costera del territorio insular colombiano.
- INVEMAR. (2014) - Evaluación de la vulnerabilidad por ascenso en el nivel del mar (ANM) y propuesta de lineamientos de adaptación en las islas de San Andrés Providencia y Santa Catalina.
- INVEMAR-GEO. (2015) - Erosión costera en la isla de San Andrés.
- CORALINA-INVEMAR. (2018) - Levantamiento de información biofísica marino-costera para la gestión ambiental del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA).
- Coca-Domínguez, O., C. Ricaurte-Villota, D.F. Morales-Giraldo y K. Luna. (2019). Estado de las playas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (2015-2019).

5.2 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

5.2.1 Descripción de núcleos

Los dos núcleos incluidos en los estudios fueron extraídos del canal de acceso al puerto de San Andrés (Figura 4.2 para ubicación). El núcleo C3_N (Figura 5.6) se obtuvo a una profundidad de -10 m y posee una longitud de 36 cm. A vista macroscópica se observa un 95% de clastos de color blanco crema de tamaño arena fina - limo, con un 5 % complementario de granos de arena finos-medios de color negro que aumentan su tamaño hacia la base del núcleo. La base del núcleo (32-36 cm) contiene algas. En general la sedimentación es homogénea, no es visible ninguna estructura sedimentaria, laminación o estratificación. Por otra parte, el núcleo C5_N (Figura 5.6) se perforó a una profundidad de -8.5 m y tiene una longitud de 30 cm. El sedimento es de color gris claro / cremoso, presenta una mala selección con tamaños de clastos que varían entre limos hasta arenas gruesas. Las partículas de mayores tamaños son fácilmente reconocidas como fragmentos de bivalvos, foraminíferos y moluscos desarticulados. Al igual que C3_N, no se logra identificar alguna estructura sedimentaria, laminación o estratificación. Tiene un alto contenido de *Halimeda* y pastos marinos que han incorporado su esqueleto remanente al sedimento en el núcleo.



Figura 5.6 Fotografía de núcleo (Flecha indicando el tope del núcleo). A) C3_N B) C5_N

5.2.2 Densidad

Los resultados a partir del análisis de densidad no muestran diferencias en la compactación de los sedimentos en las diferentes zonas. Los valores poseen cierta similitud y el comportamiento en cuanto a la variación de densidad aparente seca y saturada es similar (Figura 5.7). Para la saturada, los valores oscilan entre 1,42 y 2,12 g/cm³, con un promedio de 1,65 g/cm³. Mientras que para la seca el rango esta entre 0,78 y 1,60 g/cm³ y el promedio es 1,23 g/cm³.

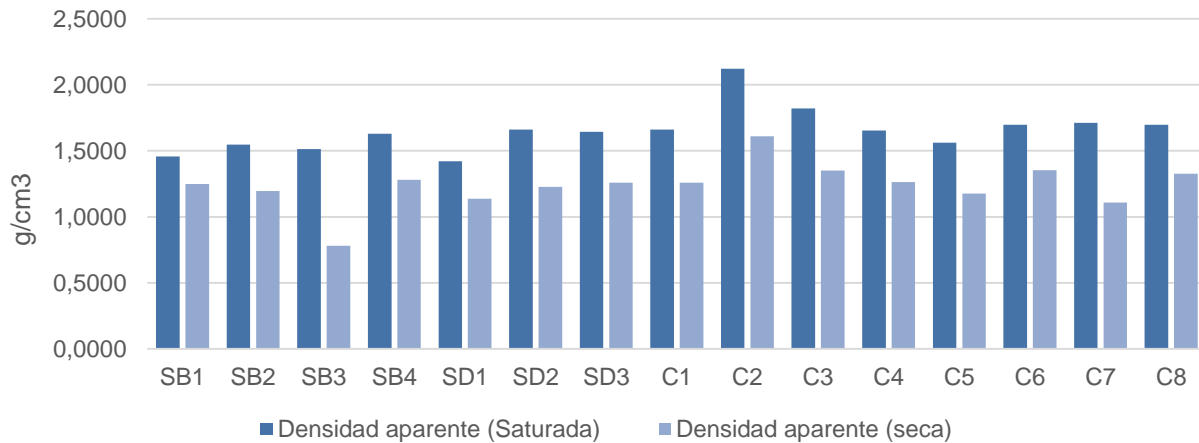


Figura 5.7 Valores de densidad en las 15 estaciones.

El comportamiento esperado de la densidad en sedimentos es que aumente su densidad conforme aumenta la profundidad. Esto se puede observar con una subida sutil en los valores de densidad en los núcleos (Figura 5.8). Si bien los cambios no son significativos, este comportamiento es observable. Existe poca diferencia ya que la profundidad de la perforación es únicamente 30-36 cm, es decir que carece de una carga litostática significativa, y la columna de agua no supera los 10 m.

Si bien el procedimiento genera un valor aproximado, es mejor hacer el procedimiento *in situ*. Los ligeros cambios de densidad reportados seguramente se deban a en el proceso de recolección y la cantidad de agua almacenada.

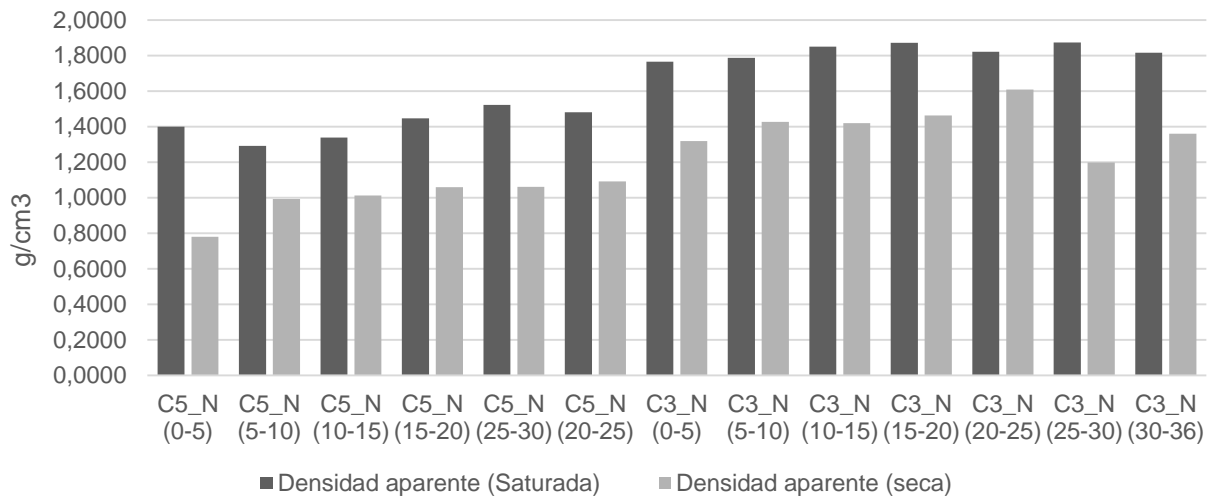


Figura 5.8 Valores de densidad por rangos de profundidad en los núcleos.

5.2.3 Granulometría

A continuación, se mostrarán los resultados granulométricos teniendo en cuenta los parámetros estadísticos de Folk & Ward (1957) al procesar la información en el software GRADISTAT 4.0 (Blott & Pye, 2000).

Al obtener la distribución de tamaños de partícula constituyentes en cada estación (Figura 5.9), se observa que las muestras SB1, SB2 y SB4 en Spratt Bight muestran similares comportamientos, con porcentajes de lodo imperceptibles y de arena fina menores a 20%, a excepción de la muestra SB3 (porcentajes de lodo de hasta 30%). En general, en Spratt Bight, el sedimento está dominado por arenas gruesas y medias con una pobre a moderada selección y distribuciones platicúrticas (SB3, SB4), mesocúrticas (SB1) y leptocúrticas (SB2). Por otro lado, las muestras del sector NW están compuestas principalmente por clastos de tamaño arena gruesa, con porcentajes de hasta 20% de gravas, contenido de arenas finas menor a 10% y ausencia de material lodoso. La selección de partículas es pobre y muestran distribución platicúrtica. Por último, en el sector del canal, hay una gran variación en los porcentajes constituyentes de cada muestra. Los ejemplares C1, C4, C5, y C8 están dominados por arenas medias y gruesas con porcentajes de lodo menores a 3,4%, arenas finas menores a 23,8 %, pobre a moderada selección y distribuciones platicúrticas (C4), mesocúrticas (C1 y C8) y leptocúrticas (C5). Mientras que las muestras C2, C3, C5 y C6 tienen porcentajes de lodos de hasta 35 % y porcentajes de arena fina y muy fina de 50 %, mala selección y distribuciones leptocúrticas y mesocúrticas.

Los datos suministrados (perforación por Hector Olaya y Javier Moreno – trabajo 1083D en 2018) reportan una granulometría compuesta por 21,25% de finos y 78,75% de arenas, para un punto en las coordenadas 81° 41' 45" W, 12° 33' 59" N, a 80 m de la estación C8. Al comparar estos

puntos cercanos se observa una diferencia de 10% en los componentes. La muestra C8 muestra porcentajes de 7,1% de finos, 89,7% arenas y 3,2% gravas. Esta diferencia podría ser producto de eventos temporales de mayor energía que han disminuido la cantidad de finos en el sector y hacen parte del proceso de balance sedimentario en el canal.

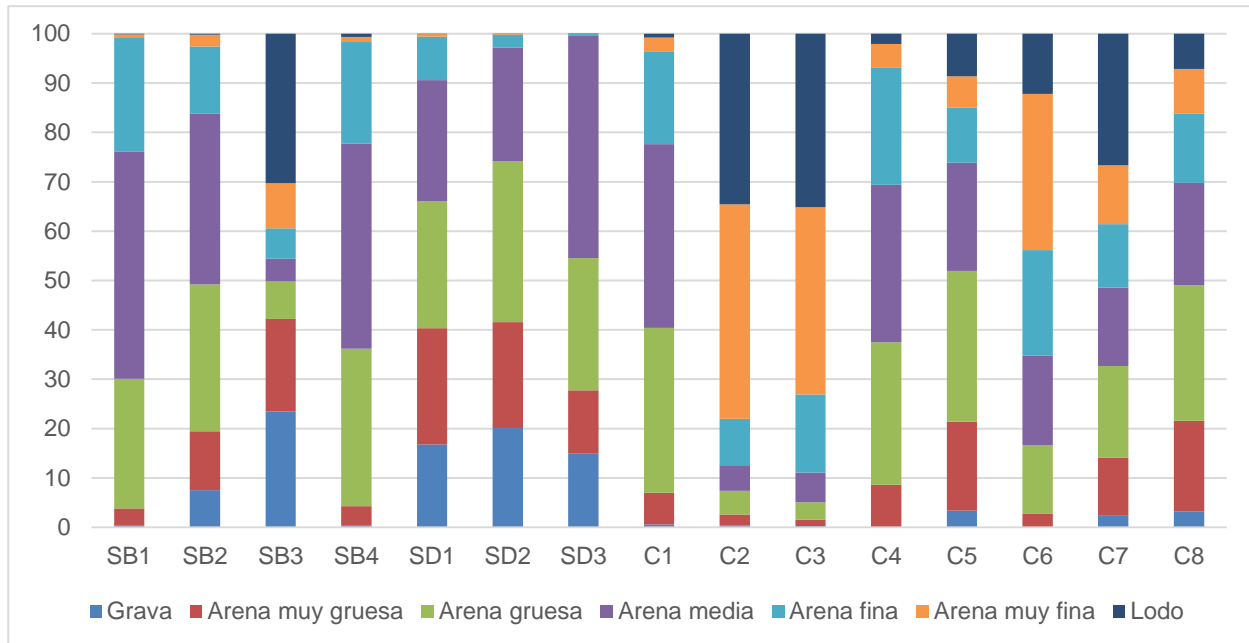


Figura 5.9 Distribución de tamaño de los clastos para las diferentes muestras recolectadas en los tres sectores (Spratt Bight-SB, sector NW-SD y canal de acceso-C) del área de estudio.

Continuando con un análisis más localizado se analizaron las variaciones texturales en los núcleos de sedimento recolectados el 12 de noviembre (Figura 5.10). EL núcleo C3_N posee predominancia de partículas tamaño arena muy fina y porcentajes de lodos que alcanzan hasta el 38%. Los sedimentos muestran una pobre selección y tienen distribuciones muy leptocúrticas. La presencia de arenas gruesas es menor al 2%. El núcleo C5_N muestra un comportamiento opuesto al descrito anteriormente. En este domina en proporciones similares la arena media, gruesa, y muy gruesa. El porcentaje de arenas finas y muy finas es menor al 18,7% en todas las profundidades. Las partículas poseen una mala selección de partículas y una distribución platicúrtica. En los dos núcleos descritos no hay fluctuaciones texturales significativas en la columna de sedimento de 30-36 cm.

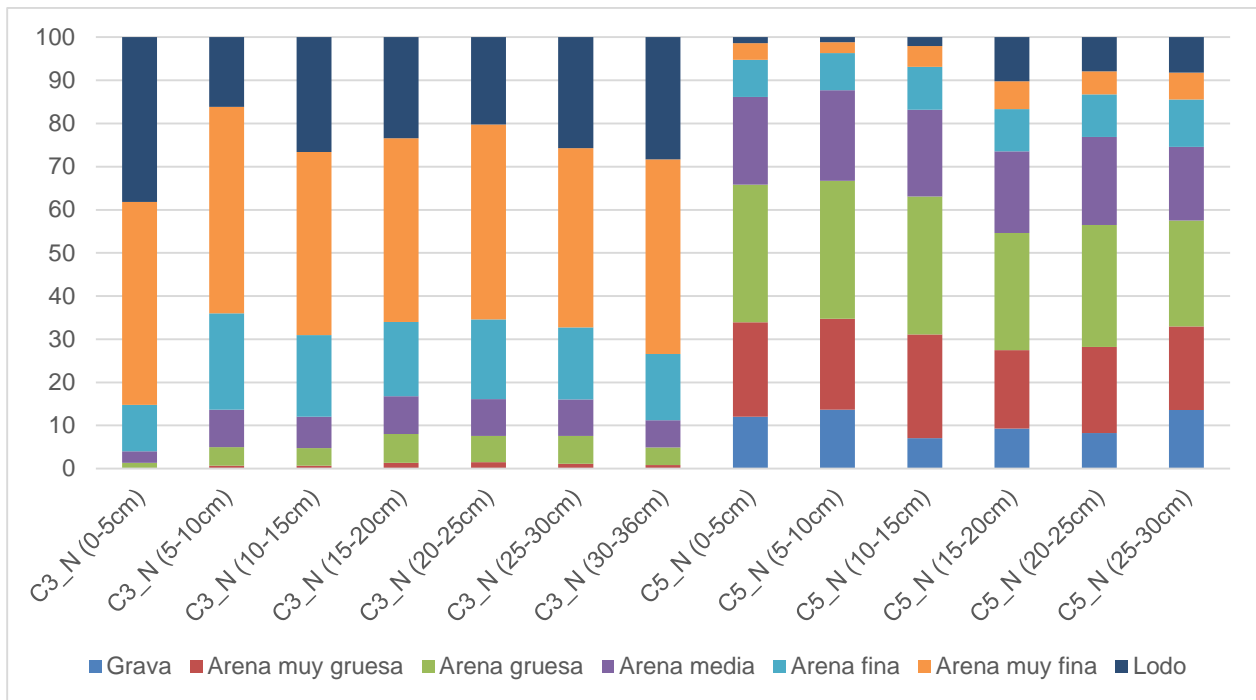


Figura 5.10 Distribución de tamaño de los clastos en los núcleos C3_N y C5_N recolectados en el canal de acceso al puerto de San Andrés.

5.2.4 Materia Orgánica

El resultado de los análisis de contenido de materia orgánica indica que el área de estudio presenta porcentajes bajos que oscilan entre 0,5-5,9% (Figura 5.11). Este comportamiento se debe principalmente a ausencia de ríos en la isla, causando un muy bajo aporte terrígeno, que depende mayormente de la escorrentía.

En el sector de Spratt Bight, la muestra SB3 muestra el mayor porcentaje reportado en el estudio, 5,9%. A pesar de este dato anómalo las muestras aledañas del sector no presentan mucha variación y se encuentran en el rango de 2,3-3,7%. El sector NW, más alejado de la línea de costa de San Andrés, muestra muy bajos porcentajes de materia orgánica 0,5% en SD1 siendo el más bajo del estudio y 1,7% para SD3, a excepción de SD2 (4%). Este aumento podría ser causado por algas o pastos marinos localizados. La zona del canal también muestra una alta variación en los porcentajes de materia orgánica. No se observa ningún patrón predominante en la variación del contenido los valores suben y bajan entre 1,7% y 5,2%. Sin embargo, es evidente que en la estaciones más al sur C1, C2 y C3, se mantiene alto este porcentaje a comparación de las otras estaciones.

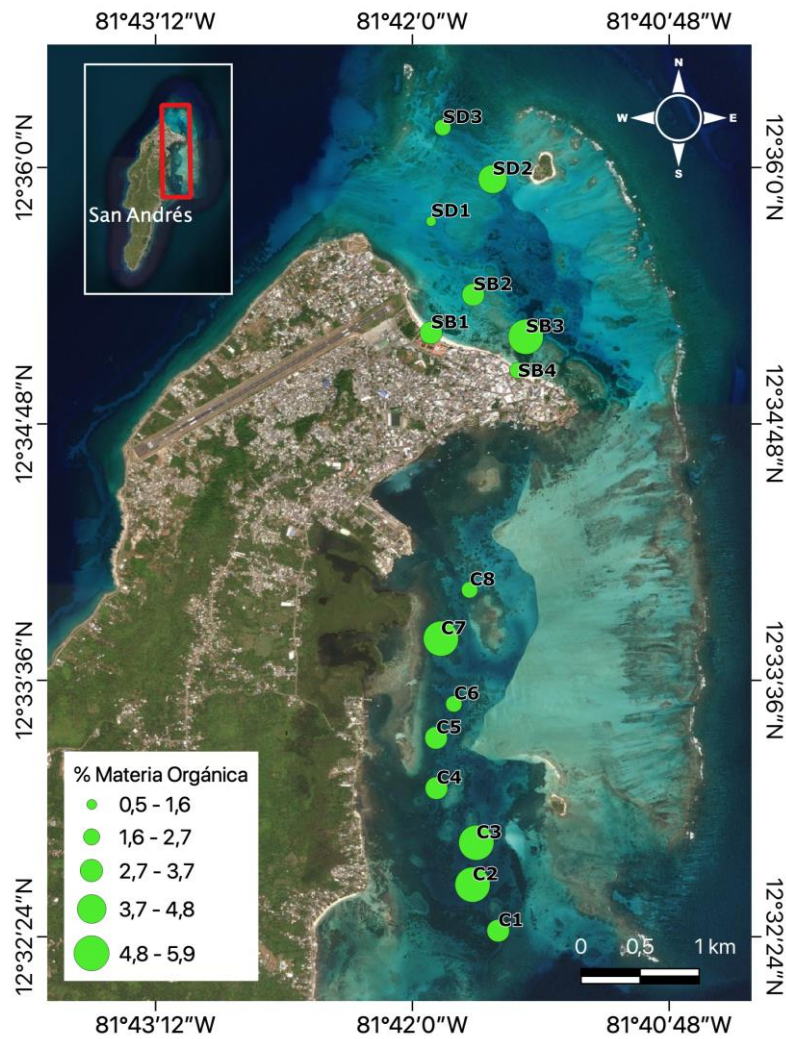


Figura 5.11 Distribución espacial de porcentajes de materia orgánica en el área de estudio

Observando los resultados de contenido de materia orgánica por segmento en los núcleos (Figura 5.12), que en C3_N esta variable muestra valores entre 2,2 y 5,1 %. el valor más alto corresponde a la presencia de *Halimeda*. Estas variaciones se deben a la captación de dichas algas a diferentes profundidades. El núcleo C5_N muestra una menor variación en los porcentajes de materia orgánica 2,5 – 3,7% con un pequeño bajón en la profundidad 15-20 cm.

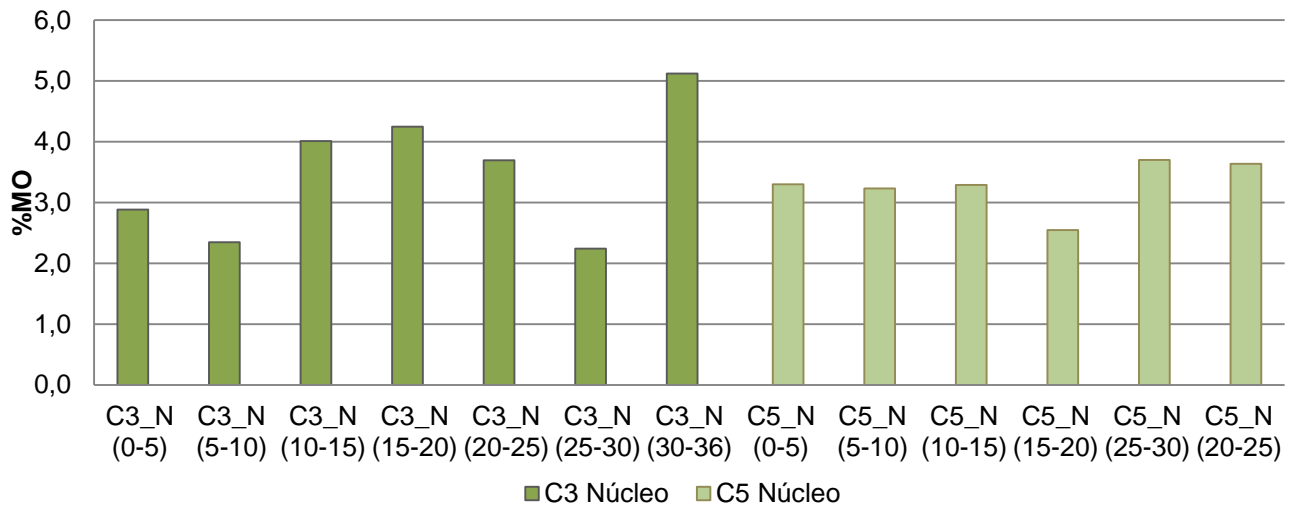


Figura 5.12 Porcentajes de materia orgánica en núcleos del área de estudio

5.2.5 Mineralogía

De manera general las muestras demuestran una homogeneidad en cuanto a su composición y textura. En la playa Spratt Bight, los clastos de la muestra SB2 (Figura 5.13) son de baja esfericidad con formas prismáticas - subprismáticas y subangulosos. En cuanto a la composición, dominan con un 77% los fragmentos biogénicos de orígenes marinos como corales, bivalvos, gasterópodos, y foraminíferos, secundarios, un 21% de calcita y fragmentos organismos marinos recristalizados. Se observan también fragmentos de algas calcáreas. El aporte terrígeno es muy bajo o casi nulo ya que no se hizo reconocimiento de cuarzo y los fragmentos líticos representan el 2% de la muestra.



Figura 5.13 Muestra SB2 bajo lupa binocular para descripción composicional y textural en la fracción dominante de tamaño de grano 0,25 mm.

En el sector NW, la muestra SD1 los clastos poseen una baja esfericidad con formas prismáticas - subprismáticas y subangulosos (Figura 5.14). En cuanto a la composición, dominan nuevamente con un 74% los fragmentos biogénicos de origen marino mencionados anteriormente, y adicionales 25% de calcita y fragmentos organismos marinos recristalizados. Al igual que en SB2, el aporte continental es muy bajo ya que los fragmentos líticos representan el 1% de la muestra.

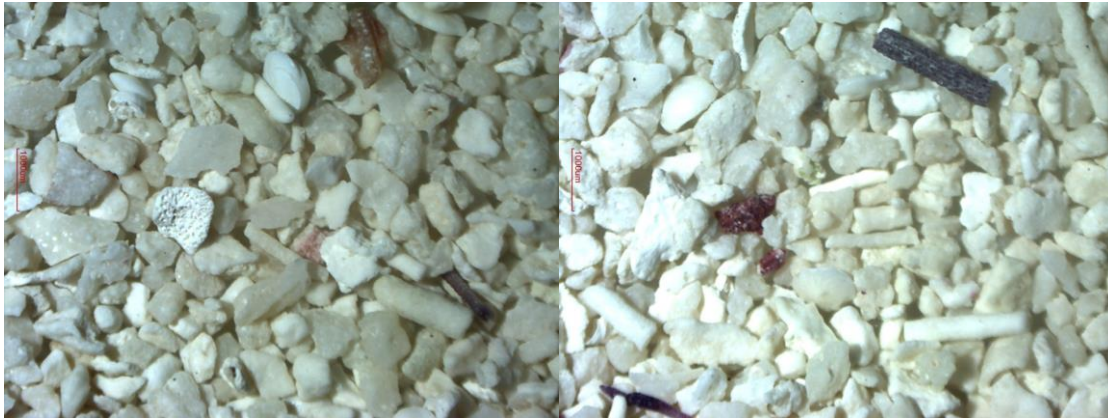


Figura 5.14 Muestra SD1 bajo lupa binocular para descripción composicional y textural en fracción dominante de tamaño de grano (0.5mm).

Por último, en el sector del canal de acceso al puerto de San Andrés, la muestra C4 son clastos de baja esfericidad con formas subprismáticas y subangulosos (Figura 5.15). En cuanto a la composición, dominan los fragmentos biogénicos de origen marino como corales, bivalvos, gasterópodos, y foraminíferos (79%), y subordinado un 20% de calcita y fragmentos de organismos marinos recristalizados de color negro. Como en las otras zonas, el aporte continental es muy bajo o casi nulo del 1% de la muestra.

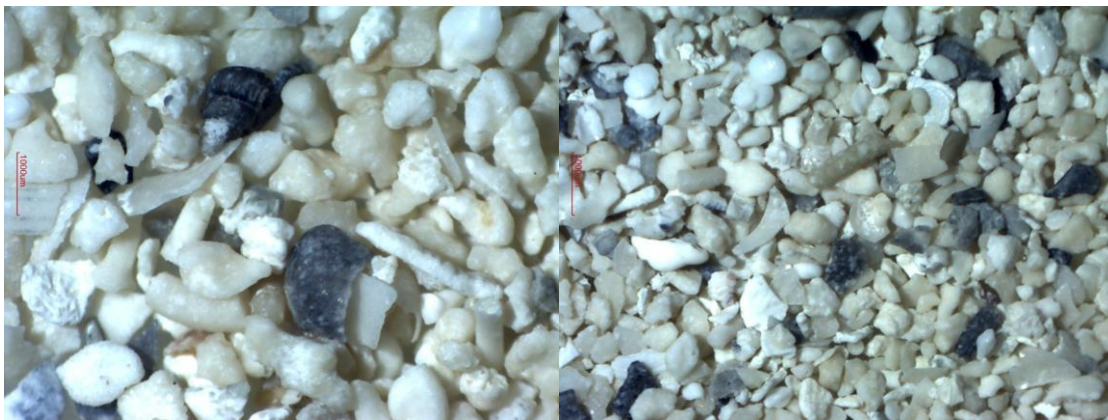


Figura 5.15 Muestra C4 bajo lupa binocular para descripción composicional y textural en la fracción dominante de tamaño de grano 0,25 mm.

5.3 ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

En la mayoría de las muestras de sedimento, los metales analizados estuvieron por debajo del límite de cuantificación (LC) establecido por el LABCAM del INVEMAR, Cd ($0,042 \text{ mg kg}^{-1}$), Cu ($5,00 \text{ mg kg}^{-1}$), Cr ($25,0 \text{ mg kg}^{-1}$), Pb ($15,0 \text{ mg kg}^{-1}$) y Zn ($10,0 \text{ mg kg}^{-1}$); con excepción del As que se registró en la muestra SB3, el Hg solamente en las muestras SD2, C5 y C8 estuvo por debajo del LC ($0,003 \text{ mg kg}^{-1}$) y para el Ni en las muestras SB1, C7 y la sección C5_N 10-15 cm, estuvo por debajo del LC ($0,42 \text{ mg kg}^{-1}$) (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Concentración de metales en muestras de sedimentos analizadas por el LABCAM.

Código de muestra		As mg kg^{-1} p.s.	Cd mg kg^{-1} p.s.	Cu mg kg^{-1} p.s.	Cr mg kg^{-1} p.s.	Hg mg kg^{-1} p.s.	Ni mg kg^{-1} p.s.	Pb mg kg^{-1} p.s.	Zn mg kg^{-1} p.s.
SB1		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00485	<0,42	<15,0	<10,0
SB3		2,09	<0,042	<5,0	<25,0	0,01438	1,33	<15,0	<10,0
SD1		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00421	0,50	<15,0	<10,0
SD2		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	<0,003	0,58	<15,0	<10,0
C1		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00328	0,57	<15,0	<10,0
C3		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00439	0,52	<15,0	<10,0
C5		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	<0,003	0,48	<15,0	<10,0
C7		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00479	<0,42	<15,0	<10,0
C8		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	<0,003	0,53	<15,0	<10,0
N_C5 10-15 cm		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00506	<0,42	<15,0	<10,0
N_C5 25-30 cm		<2,00	<0,042	<5,0	<25,0	0,00630	0,73	<15,0	<10,0
Directriz España (CIEM, 2015)	Peligroso	1000	72	2500	1000 Cr VI	17	1000	1000	2500
	Nivel A	35	1,20	70	140	0,35	30	80	205
Resolución 454 (CONAMA, 2012)	Nivel 1	19	1,2	34	81	0,30	20,9	46,7	150
	Nivel 2	70	7,2	270	370	1,0	51,6	218	410
Resolución 420 (CONAMA, 2009)	Nivel de prevención	15	1,3	60	75	0,5	30	72	300
Tablas SQiRTs NOAA. (Buchman, 2008)	TEL	7,2	0,68	18	52,3	0,13	15,9	30,2	124
	PEL	41,6	4,2	108	108	0,7	42,8	112	271

Las concentraciones de los contaminantes orgánicos (PCBs y HAPs) fueron no detectables estando así por debajo de las concentraciones establecidas por las normativas comparadas (Tabla 5.2). El contenido de Carbono Orgánico para todas las muestras estuvo por debajo de los valores de referencia (10 %) para disposición de material dragado (CONAMA, 2012).

Tabla 5.2. Umbral de concentraciones para sedimentos dragados directrices internacionales.

Parámetro	Directriz España (CIEM, 2015)		Resolución 454 (CONAMA, 2012)		Resolución 420 (CONAMA, 2009)	Tablas SQUIRTs NOAA. (Buchman, 2008)	
	Nivel A (mg kg ⁻¹)	Peligroso (mg kg ⁻¹)	Nivel 1 (mg kg ⁻¹)	Nivel 2 (mg kg ⁻¹)	Nivel de prevención	TEL	PEL
Σ PCBs	0,05	4,0	0,0227	0,180	0,01*	0,0216	0,189
Σ HAPs	1,88	110	4,0	---	12,7	1,684	16,77

*Nivel de investigación para uso agrícola

El propósito del análisis de contaminantes en los sedimentos recolectados es identificar si este material dragado puede ser utilizado en las playas como estrategia para evitar la erosión costera. Con este objetivo, los resultados se compararon con la resolución 420 del 2009 del Concejo Nacional del Medio Ambiente de Brasil (CONAMA, 2009) la cual *“establece los criterios y valores rectores de calidad del suelo en cuanto a la presencia de sustancias y establece directrices para la gestión de impacto ambiental de las áreas contaminadas por estas sustancias debidas a actividades antrópicas”*. Dicha directriz define el suelo como medio básico para la ocupación territorial, las prácticas recreativas y otros usos públicos y económicos, definición que aplica para el propósito de los sedimentos recolectados. Teniendo en cuenta que los contaminantes analizados están en concentraciones menores que el umbral establecido como nivel de prevención, el cual es la concentración límite de determinada sustancia en el suelo de tal manera que este sea capaz de mantener sus funciones principales (Tabla 5.1), en consecuencia, los sedimentos analizados podrían ser usados para la recuperación de playas.

Los resultados también fueron comparados con la directriz para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo-terrestre española CIEM (2015) donde se establecen diferentes niveles de acción teniendo como el más bajo el nivel de acción A, que representa el umbral de concentraciones por debajo de los cuales se puede considerar estadísticamente el material como carente de efectos biológicos significativos. Las muestras analizadas en el LABCAM, tienen concentraciones por debajo del nivel de acción A (Tabla 5.1).

Finalmente se comparan con los valores de referencia internacionales establecidos por la Administración Nacional de Estados Unidos para los Océanos y la Atmósfera (NOAA) (Buchman, 2008). Utilizando el nivel de efectos umbral TEL (Threshold Effect Level) que representa la concentración total por debajo de la cual raramente se presentan efectos adversos sobre la flora y la fauna y el nivel de efecto probable PEL (Probable Effect Level) valor por encima del cual

frecuentemente se encuentra asociado a efectos adversos sobre la flora y la fauna, todas las muestras de sedimentos analizadas en el LABCAM, mostraron valores por debajo del valor de referencia TEL (Tabla 5.1)

Cabe resaltar que en la muestra SB3, las concentraciones de As están 3 veces por debajo del valor de referencia TEL; y las de Hg y Ni 10 veces por debajo del valor de referencia TEL.

5.4 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO Y BATIMÉTRICO

5.4.1 Cambios de la línea de costa

La evolución histórica de la playa de Spratt Bight durante el periodo de 1990 a 2021 está mostrando una tendencia a la estabilidad en la parte al noroeste (transectos del 5 al 14) con tasas de acreción de hasta 0,5 m/año. Por el contrario, en la parte centro (trasectos 15 al 23) la playa tiene una mayor variabilidad asociada a la pérdida de los depósitos de playa con tasas de erosión máxima de -1,4 m/año, lo cual está indicando cambios negativos de hasta 43,4 m en los últimos 31 años. En el sector sureste la dinámica de la línea de costa refleja variaciones con tendencia entre acreción y erosión (Figura 5.16).

De acuerdo con lo anterior se identifican en la playa de Spratt Bight tres sectores diferenciados con base en la evolución morfológica y la ubicación de las obras construidas para la protección de la costa. El primer sector que representa el área más conservada naturalmente, contiene el mayor depósito de arenas y una línea de vegetación en su parte trasera, este sector, aunque ha tenido procesos de erosión severos muestra una tendencia a mantenerse estable. El segundo sector se encuentra en la parte centro, es el más afectado por la pérdida de los depósitos de sedimentos, y esta intervenido con espolones.

Por último, el tercer sector presenta características similares a una dinámica de basculamiento natural de los depósitos de arena que pueden estar regulados por las épocas climáticas. En general en este sector los depósitos de arena permanentes están localizados en el límite final al sureste estabilizados en la parte trasera por la vegetación.

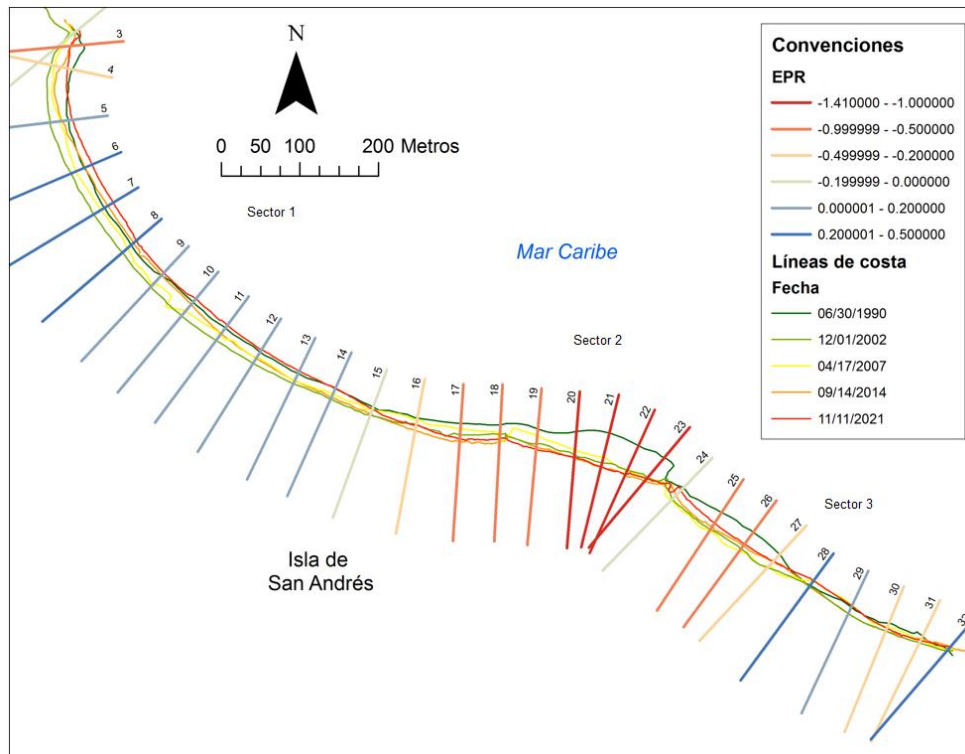


Figura 5.16 Tasas de cambio de la línea de costa de la playa de Spratt Bight entre 1990 y 2021

5.4.2 Perfiles de playa y perfiles topobatimétricos

La morfología de los perfiles de playa es concordante con lo evidenciando en la evolución de la línea de costa observada en campo (Figura 5.17). Entre el perfil 1 y el perfil 2 se observan cambios en las características morfológicas de playa pasando de 60 m de amplitud a 30 metros, la pendiente del frente de playa varía entre 7° y 9° respectivamente (Figura 5.18 a, b). En la zona inframareal o costa sumergida la morfología de los perfiles 1 y 2 presenta características homogéneas con pocas irregularidades del fondo en la proximidad a la línea de costa, sin embargo, en la extensión del perfil topo-batimétrico del perfil 1 se observan variaciones en las elevaciones asociadas a la presencia de terrazas coralinas (Figura 5.19a). El perfil 3 tiene una morfología característica de áreas con procesos erosivos severos, con una amplitud de la playa menor a 10 metros y ausencia de depósitos de arenas (Figura 5.18c), el frente de playa presenta una inclinación de hasta 15° y es limitado hacia la zona inframareal por la terraza coralina.

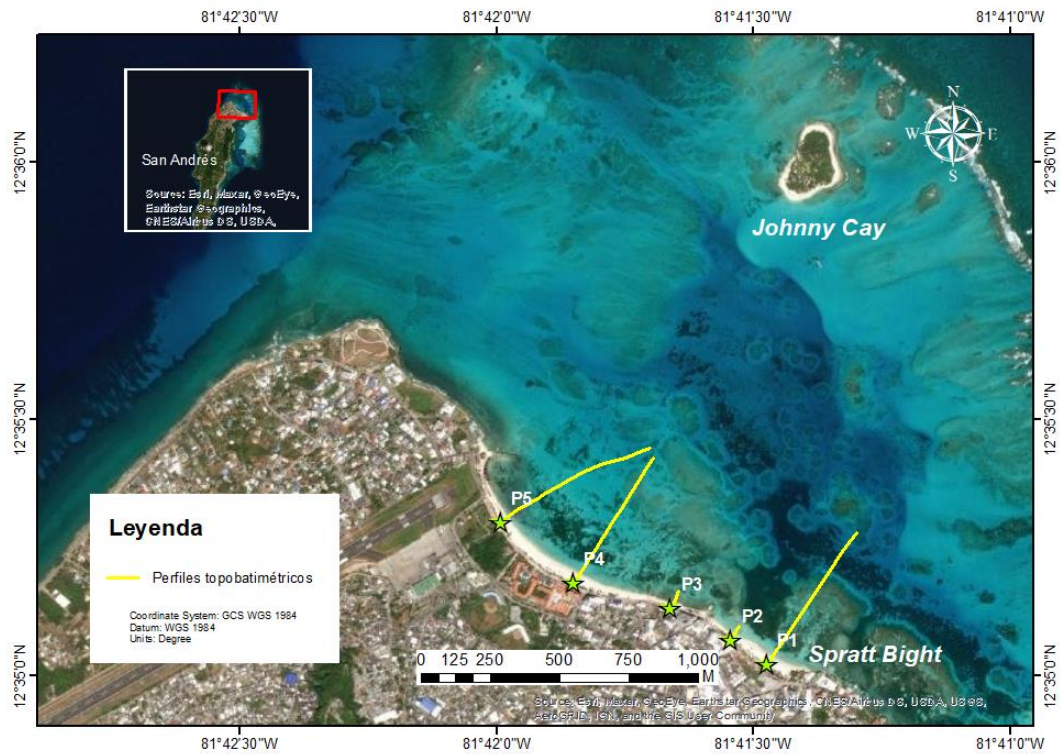


Figura 5.17. Mapa de localización de los perfiles topobatimétricos levantados en el sector de Spratt Bight.

Los perfiles 4 y 5 presentan una amplitud de 40 y 39 metros, la pendiente del frente de playa varía entre 6° y 10° (Figura 5.18d). La extensión del perfil topobatimétrico del perfil 4 está mostrando un asomeramiento con respecto al perfil 5, registrando irregularidades (montículos) del fondo y profundidades de hasta -2,9 m, características que se mantienen a lo largo de 300 m sin evidenciar una tendencia a la profundización (Figura 5.19 c). La extensión topo-batimétrica del perfil 5 presenta características morfológicas del fondo similares al perfil 4, con una tendencia a mayores de valores de profundidad, los cuales alcanzan hasta -5,1 m (Figura 5.19 c). En general la profundidad de los perfiles batimétricos es concordante con los registros batimétricos de INVEMAR-CORALINA (2018) levantados en la bahía de Spratt Bight.

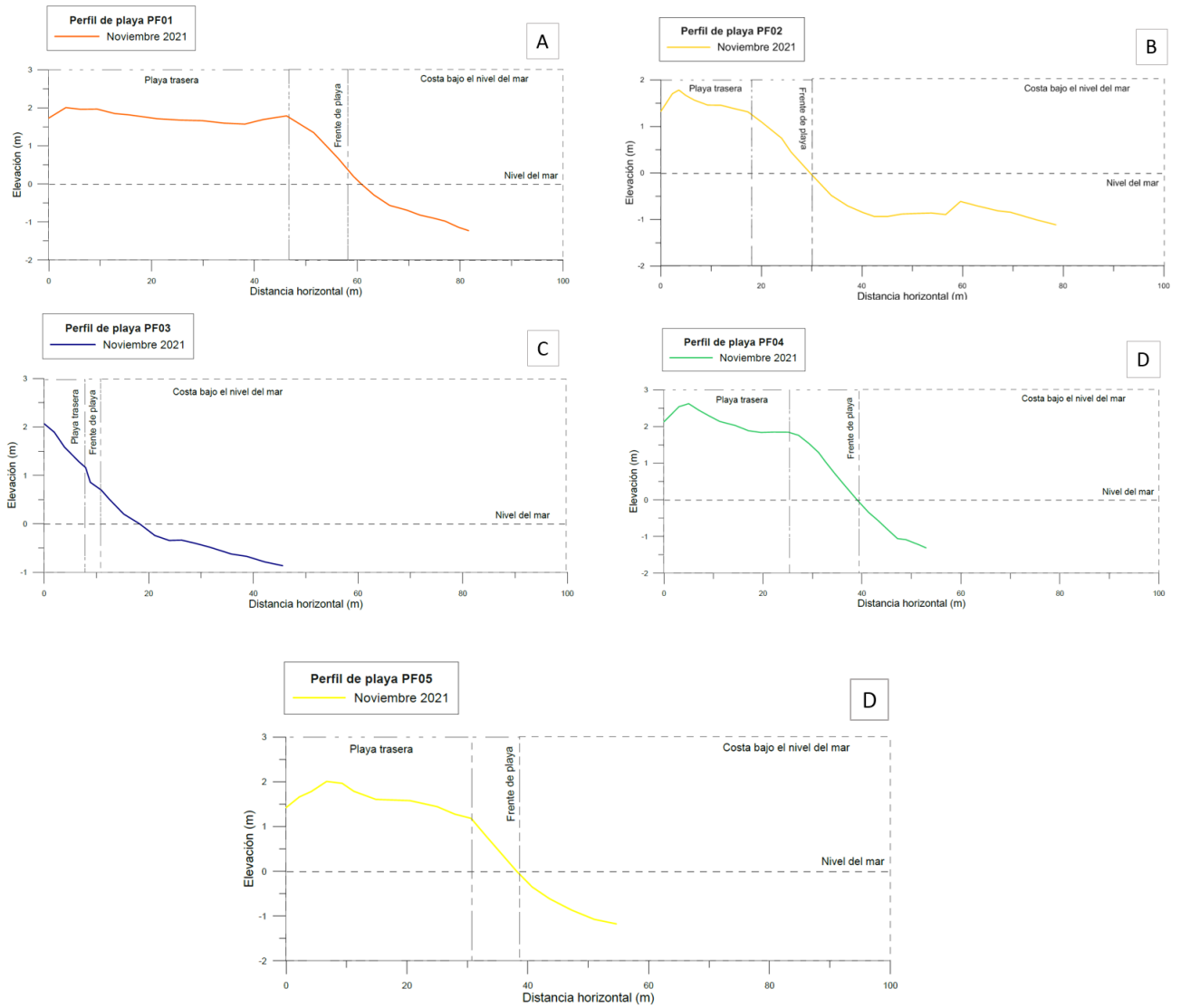


Figura 5.18 Características morfológicas de los perfiles de la playa de Spratt Bight entre el perfil 1 y 5.

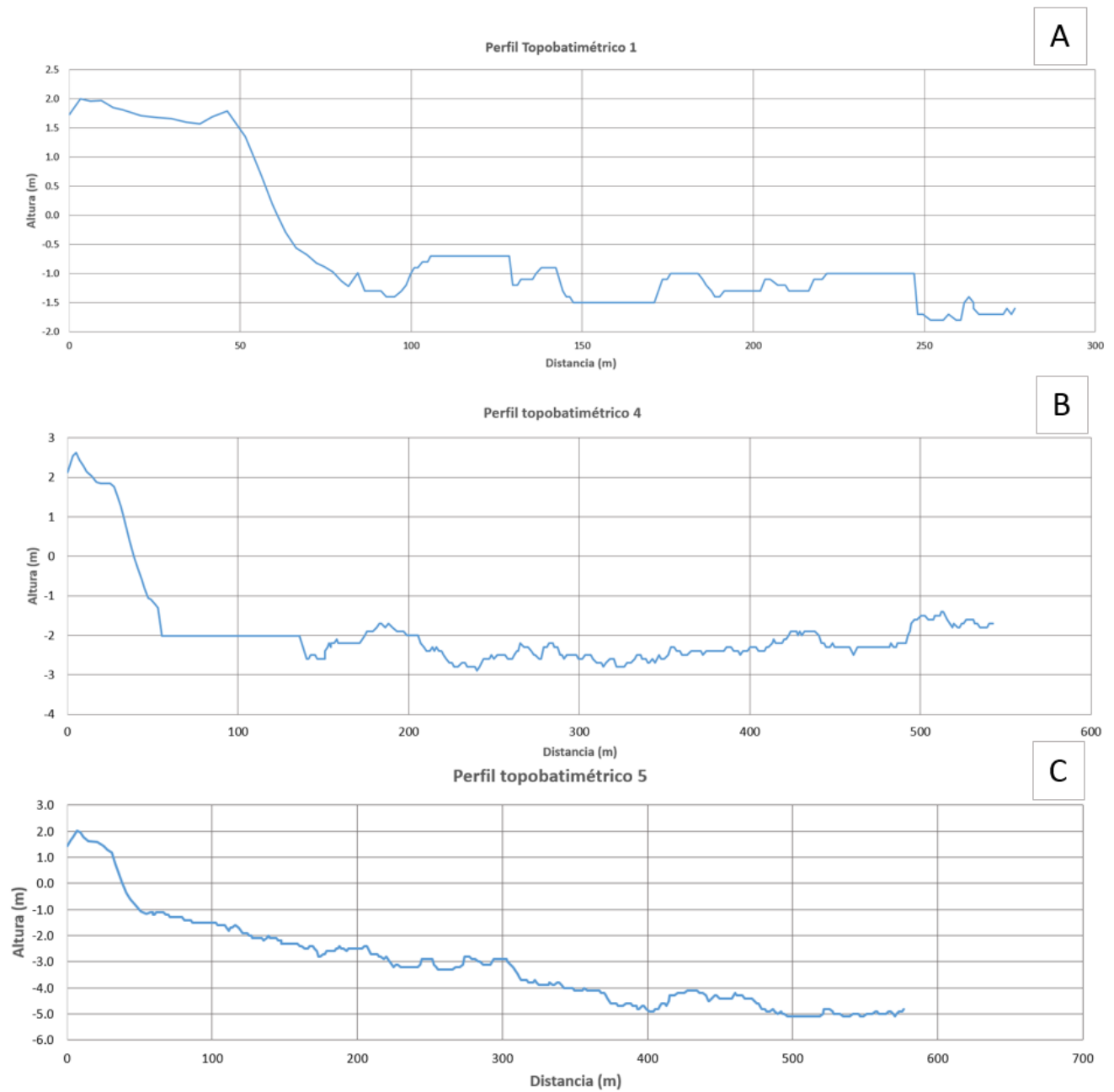


Figura 5.19 Características morfológicas de los perfiles topo batimétricos 1, 4 y 5 en la playa de Spratt Bight.

5.4.3 Identificación de fondo marino

Fueron identificados 3 tipos de coberturas principales en el fondo marino al NW de la isla de San Andrés. Se reportó con material multimedia (fotos y videos) la presencia de fondos blandos compuestos por bancos de arena con ripples formados en la superficie y pastos marinos dispuestos sobre sustratos lodosos (Figura 5.20). Por su parte, también se observaron fondos cubiertos por parches de coral distintos estados de conservación. Según información aportada por el buzo, estas estructuras se vieron afectadas con el paso de los huracanes IOTA y ETA ocurridos en noviembre de 2020 (Figura 5.21).

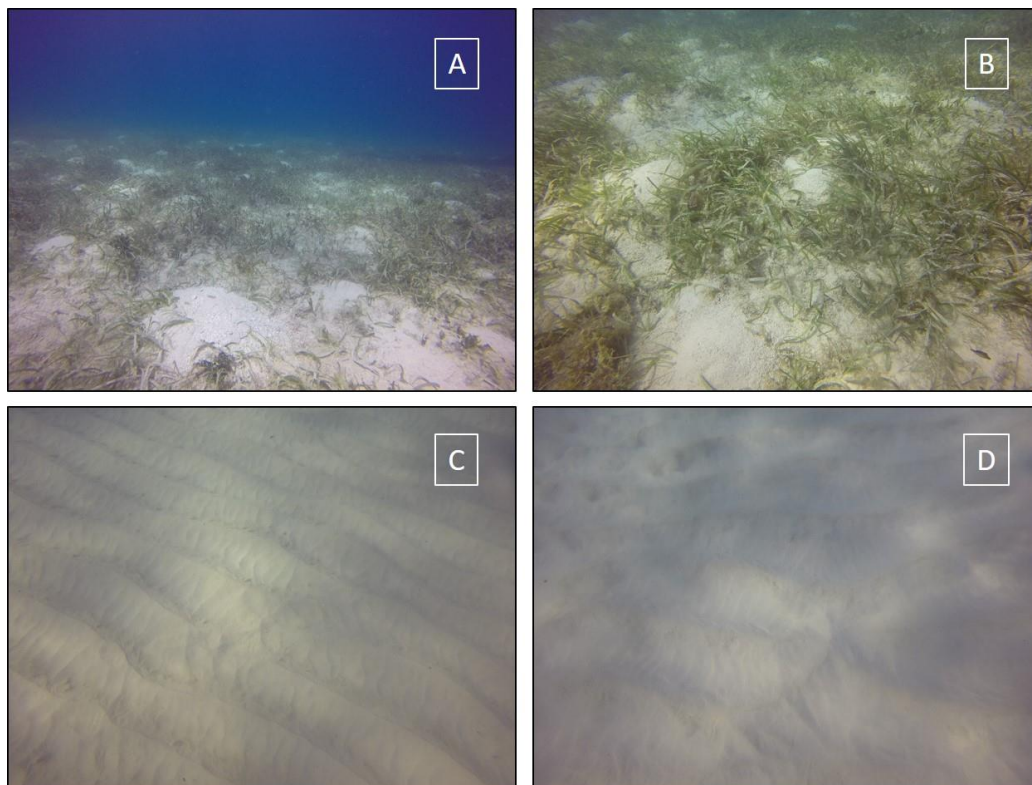


Figura 5.20. Fondos blandos observados al NW de San Andres. A y B) Pastos marinos. C y D) Bancos de arena.

Hacia el SE (trayecto 2 y 3) de la zona explorada, predominan los sustratos blandos, compuestos por sedimentos calcáreos de coloraciones blancas posiblemente derivados de las estructuras coralinas circundantes; este tipo de material es similar al que se observa en las playas cercanas (Spratt Bight, Johnny Cay). También se registraron sectores con material gravoso derivado de los arrecifes de coral distribuido en el sustrato arenoso, este material está dispuesto sobre el fondo sin ningún tipo de fijación, es fácilmente removible (Figura 5.22). Hacia el NW del sector explorado (trayecto 1 y 4) se registraron con mayor frecuencia fondos cubiertos por parches de coral, estos generalmente alternan con este tipo de sustrato arenosos (bancos de arena) (Figura 5.21).



Figura 5.21. Estructuras coralinas y ecosistemas circundantes registrados en el área explorada.

Estos fondos identificados anteriormente, se presentan en un ambiente de plataforma que reporta profundidades entre 0,05 y 15 m, protegida por una barrera arrecifal exterior; los rasgos geomorfológicos asociados a este sector, indican la presencia de terrazas arrecifales, montículos, taludes, crestas y canales, distribuidos de forma heterogénea en el área circundante 5 m (INVEMAR-CORALINA, 2018).



Figura 5.22. Fondos compuestos por sedimento calcáreo, mezcla entre materiales arenosos y gravosos derivados de las antiguas formaciones coralinas circundantes.

Estudios adelantados por INVEMAR y CORALINA (2018) en este sector, indican que los ambientes someros (2-6 m) de la costa oriental de la isla de San Andrés, han presentado reducción en la cobertura de coral vivo a partir de lo reportado en Díaz et al. (2000). Debido a esto, en la actualidad quedan pocos relictos de los antiguos parches de *Porites porites* en la plataforma y se reporta un deterioro generalizado en las demás especies presentes acelerados por la intervención antrópica de estos espacios.

6 CONCLUSIONES

Los sedimentos recolectados en el área de estudio muestran alta similitud en cuanto a la composición y textura. En general se presenta un abundante contenido en carbonatos y materia orgánica de origen marino (fragmentos de corales, bivalvos, gasterópodos y foraminíferos), restos de plantas marinas (Halimedes) y porcentajes menores al 3% de fragmentos líticos. Es común observar fragmentos de corales y organismos marinos recristalizados.

En Spratt Bight el sedimento está dominado por arenas gruesas y medias con una pobre a moderada selección y distribuciones platicúrticas (SB3, SB4), mesocúrticas (SB1) y leptocúrticas (SB2). Los porcentajes de lodo son imperceptibles y la arena fina es < 20%. En el sector NW dominan las arenas gruesas, con porcentajes de hasta 20% de gravas, contenido de arenas finas menor a 10% y hay ausencia de material lodoso. Las partículas tienen una pobre selección y muestran una distribución platicúrtica. El sector del canal muestra dos grupos con proporciones de tamaños de granos diferentes. Los ejemplares C1, C4, C5, y C8 están dominados por arenas medias y gruesas con porcentajes de lodo menores a 3,4%, arenas finas menores a 23,8 %, estas poseen una pobre a moderada selección y distribuciones platicúrticas (C4), mesocúrticas (C1 y C8) y leptocúrticas (C5). Las muestras C2, C3, C5 y C6 tienen porcentajes de lodos de hasta 35 % y porcentajes de arena fina y muy fina de 50 %, mala selección y distribuciones leptocúrticas y mesocúrticas.

Los resultados de densidad no muestran tendencias ni sectores con distinciones específicas. Las variaciones entre la densidad aparente seca y saturada son similares. Para la saturada, los valores oscilan entre 1,42 y 2,12 g/cm³, con un promedio de 1,65 g/cm³. Mientras que para la seca el rango está entre 0,78 y 1,60 g/cm³ y el promedio es 1,23 g/cm³. La densidad en los núcleos es homogénea, los ligeros cambios reportados se deben a la manipulación de la muestra al ser recolectada y almacenada. Los porcentajes de materia orgánica son bajos y oscilan entre 0,5-5,9%. Este comportamiento se debe principalmente a ausencia de ríos en la isla, causando un muy bajo aporte terrígeno, que depende mayormente de la escorrentía.

Las concentraciones de metales y contaminantes orgánicos en las muestras analizadas en el LABCAM de INVEMAR pueden considerarse como material carente de efectos biológicos significativos, ya que sus concentraciones están por debajo de los umbrales establecidos en las directrices internacionales con las cuales fueron comparados.

La evolución de la línea de costa de la playa de Spratt Bight permite diferenciar tres sectores con respuestas morfológicas diferentes, que están influenciadas por las intervenciones antropogénicas en su parte trasera (camellón) y los espolones. Esta sectorización permite establecer la relación entre el área total de la playa y los puntos a intervenir frente a una posible solución con rellenos de arena.

7 RECOMENDACIONES

- Para el análisis de densidad, se recomienda extraer el sedimento directamente del ambiente de depositación, en un recipiente de volumen definido (ej. Jeringa de 10 cm³). Una vez recolectado el sedimento se debe reportar inmediatamente, en la embarcación, el peso de esta fracción para conservar el arreglo y humedad de las partículas (se garantiza un valor más semejante a la densidad aparente saturada del sedimento). El cálculo de densidad aparente seca se puede realizar en el laboratorio.
- Determinar la concentración media para cada uno de los contaminantes cuantificables, siguiendo la directriz CIEM (2015), a partir del volumen a dragar representado por la muestra analizada.

8 BIBLIOGRAFÍA

Barnes, G. (2016). Soil Mechanics: Principles and Practice. Macmillan International Higher Education.

Blott, S.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.

Buchman, M. F. (2008). Screening Quick Reference Tables (SQiRTs).

Burgl, H. (1959). Resumen de la estratigrafía de Colombia. Ingeominas, Informe No 1248 (inédito), 12p, 3 tablas, Bogotá.

Carvajal-Arenas, L.C., Mann, P. (2018). Western Caribbean intraplate deformation: defining a continuous and active microplate boundary along the San Andres rift and Hess Escarpment fault zone, Colombian Caribbean Sea. *AAPG Bull.* 102 (8), pp. 1523–1563.

Case, J.E., MacDonald, W.D., Fox, P.J. (1990). Caribbean crustal provinces: seismic and gravity evidence. In: Dengo, G., Case, J.E. (Eds.), *The Geology of North America. The Geological Society of America, Vol. H: The Caribbean Region*, pp. 15–36.

Chapman, R. (1983) *Developments in Petroleum Science*. 16th ed. Elsevier, pp.41-46.

Christofferson, E. (1983). Plate model of the collapsing Caribbean continental slope of Nicaragua and the adjacent San Andres Island Trough. In: Paper presented at the 10th Caribbean Geological Conference at Cartagena, Colombia.

CIEM. (2015). Directrices para la caracterización del material dragado y su reubicación en aguas del dominio público marítimo terrestre. Comisión interministerial de estrategias marinas (CIEM). España. 173 p.

Coca-Domínguez, O., C. Ricaurte-Villota, D.F. Morales-Giraldo y K. Luna. (2019). Estado de las playas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (2015-2019). Santa Marta, INVEMAR. Serie de Publicaciones Generales No. 108. INVEMAR-CORALINA, Santa Marta, 48 p.

CONAMA (2009). Resolução N° 420, de 28 de dezembro de 2009. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. 18 p.

CONAMA (2012). Resolução N° 454, de 01 de novembro de 2012. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. 17 p.

CORALINA-INVEMAR, 2018. Levantamiento de información biofísica marino-costera para la gestión ambiental del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina CORALINA. Convenio Especial de Cooperación No. 002 de 2018. ITF. INVEMAR- CORALINA, Santa Marta, 318 p.

CORALINA-INVEMAR. (2012). Gómez- López, D. I., C. Segura-Quintero, P. C. Sierra-Correa y J. Garay-Tinoco (Eds). Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. INVEMAR y CORALINA. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 28.

Díaz, J.M., L.M. Barrios, M.H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. Lopez-Victoria, H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzon, B. Vargas-Angel, F. Zapata, y S. Zea. (2000). Areas coralinas de Colombia. Invemar, Santa Marta. Serie Publicaciones Especiales 5: 176p.

Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27(1), pp. 3-26.

Geister, J. (1992). Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). *Facies* 27, pp. 1-70.

Geister, J., Diaz, J.M. (2007). Reef environments and geology of an oceanic archipelago: San Andres, Old Providence and Sta. Catalina (Caribbean Sea, Colombia). In: *Boletín Geológico Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas Mineras de Colombia*, 142p.

Hernández, J. P. E., & Rocha, L. M. (2013). Descripción fisiográfica de la Isla de San Andres: aproximación inicial al entendimiento integral de la problemática erosiva. *Boletín Científico CIOH*, 31, pp. 49-72.

Hillis-Colinvaux, L. (1980). Ecology and taxonomy of *Halimeda*: primary producer of coral reefs. *Advances in Marine Biology*, 17, pp. 1-327

Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. *updated for version 4.3. Trenhiale, A. 1987. *The Geomorphology of Rocks Coasts*. Claredon Press, Oxford

Idárraga-García, J., García-Varón, J., & León, H. (2021). Submarine geomorphology, tectonic features and mass wasting processes in the archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (western Caribbean). *Marine Geology*, 435p (March). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106458>

INVEMAR-CORALINA. (2018). Actualización del conocimiento sobre los ecosistemas sumergidos de San Andrés Isla para la gestión ambiental del Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Convenio Especial de Cooperación No. 007 de 2017. ITF. 96p.

INVEMAR-GEO. (2015). Erosión costera en la isla de San Andrés. Informe técnico final. Actividad GEO -BPIN INVEMAR. Santa Marta. 71p.

INVEMAR. (2005). Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2005. (Serie de publicaciones periódicas/INVEMAR; No.8) Santa Marta. 360p.

INVEMAR. (2011). Informe final de investigación para el proyecto BPIN Erosión Costera: Año 2011. Santa Marta. 21p.

INVEMAR. (2014). Evaluación de la vulnerabilidad por ascenso en el nivel del mar (ANM) y propuesta de lineamientos de adaptación en las islas de San Andrés Providencia y Santa Catalina. Código: SAI-VA-003. Informe técnico final. Convenio Interadministrativo de asociación No. 003 de 2013 INVEMAR-CORALINA. Santa Marta. 359 p.

Martín-Prieto J.A., Roig-Munar, F.X., Pons G.X., Rodríguez-Perea A., Alvarado, M. and Mir-Gual M. (2013). Description of erosion processes in Spratt Bight (San Andrés Island, Colombia) using Sequential End Point Rates (EPR). In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 997-1002, ISSN 0749-0208.

Mauffret, A., Leroy, S.M. (1997). Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province. Tectonophysics 283, pp. 61-104.

Ossa I, J.M. (2004). Evaluación de la influencia antrópica en los cambios de la línea de costa e infralitoral de San Andrés, Caribe colombiano. Tesis de grado, Facultad de Geología. Eafit. Medellín. 120p

Posada, B. O.; D. Morales-G. y W. Henao P. (2011). Diagnóstico de la erosión costera del territorio insular colombiano, INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. 24, Santa Marta. 112 p.

Sáenz, H.F., J.M. Betancourt, B.O. Posada, I. Restrepo, D.F. Morales, M.P. Bolaño, D. Vega, L.A. Mejía, A. Merchán, L.A. Gómez Y L.C. Gámez. (2009). Diagnóstico geológico, geofísico, biótico y de caracterización de la calidad de las aguas y sedimentos del proyecto de definición del diseño de las playas entre el hoyo soplador y San Luis en San Andrés Isla. INVEMAR, Coordinación de Servicios Científicos. Informe Técnico Final (ITF), para la Universidad del Norte. Santa Marta. 478p.

Thieler E., Himmelstoss E., Zichichi J., y Ergul, A. (2010). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0; an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278 v 4.2.

Unda, S. B., Alava, A. C., Espinoza, M. U., Leon, J. B., & Gorotiza, A. C. (2020). EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE IGNICIÓN PARA DETERMINAR MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS DE LA PROVINCIA EL ORO-ECUADOR. FAVE: Sección Ciencias Agrarias, 19(2), pp. 25-36.



ADAPTACIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA MITIGAR
LA EROSIÓN COSTERA EN SAN ANDRÉS ISLA, CARIBE
COLOMBIANO

Vargas, G. 2004. Geología y aspectos geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. Geología Colombiana, 29, pp. 73-89.