

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño*Study of the sedimentation and erosion rates of the La Barra sector of the San Andrés de Tumaco navigable channel, Nariño*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.611> Fecha de recepción: 2023-02-01 / Fecha de aceptación: 2023-06-16Yessica Carolina Cantero Mosquera¹, Carlos A. Astaiza², Ángela M. Mesías³, Paola Andrea Quintero Rodríguez⁴**CITAR COMO:****Cantero, Y. C.; Astaiza, C. A.; Mesías A. M.; Quintero, P. A. (2023).** Estudio de la tasa de sedimentación y erosión en el sector La Barra del canal navegable en San Andrés de Tumaco, Nariño. *Bol. Cient. CIOH*, 42(1): 7-25. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.611>**RESUMEN**

El seguimiento de la evolución del fondo marino en canales navegables permite garantizar la navegación segura. En esta investigación se estimó la tasa de sedimentación y erosión a partir de datos batimétricos multihaz en el canal navegable de San Andrés de Tumaco (Nariño), específicamente en el sector denominado La Barra, para diferentes períodos entre 2019 y 2021. Además, se realizó el trazado de las líneas de costa para los años 2019, 2020 y 2021 con el objetivo de identificar la dinámica costera en la desembocadura de los esteros más cercanos al área de estudio y su relación como fuente de aportes de sedimentos. Por último, se analizaron datos de precipitación con el fin de relacionarlos como una variable forzante de transporte y aporte de sedimentos continentales en la bahía de Tumaco. Producto de estos análisis, en el sector La Barra se obtuvo el mayor volumen acumulado de sedimentación, con 188 881 m³ y de erosión con 150 245 m³, debido a que es el período más amplio observado. Adicionalmente, se calculó la tasa promedio de sedimentación de 24409 m³/mes, sin considerar el período más amplio. En el análisis espacio temporal de la línea de costa se evidenciaron sectores con cambios de acreción, retroceso y nulos o constantes; sin embargo, predominaron los procesos de acreción, asociados a acumulación de sedimentos continentales. Por otra parte, la relación entre la precipitación y el volumen acumulado de sedimentación en el sector La Barra se representó con la ecuación $S = 56.591p + 15529$, y con el volumen acumulado de erosión $E = 48.749p - 5263.6$. Basados en la estimación de la tasa de sedimentación/erosión, la dinámica costera y su correlación con la precipitación, como variable influyente en el transporte de sedimentos generadora de cambios morfológicos del fondo marino, las autoridades tomadoras de decisiones pueden proponer un ajuste en los procesos de remoción sobre el sector La Barra, que contribuya a una navegación segura en el canal de acceso al segundo puerto más importante del Pacífico colombiano.

PALABRAS CLAVE: batimetría, erosión, sedimentación, canal navegable, TIN, cambios morfológicos, transporte de sedimentos, Tumaco.

¹ Orcid: 0000-0003-4057-188X. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: y.carolmosquera@gmail.com

² Orcid: 0000-0003-0040-3902. Investigador Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: castaiza31@gmail.com

³ Orcid: 0000-0002-4129-0927. Investigadora Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Correo electrónico: amesias@dimar.mil.co

⁴ Orcid: 0000-0002-4559-2375. Investigadora Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (Ungrd). Correo electrónico: paoadri123@gmail.com



Publicado por la Dimar

ABSTRACT

Monitoring the evolution of the seafloor in navigable channels ensures safe navigation. In this research, the sedimentation and erosion rates were estimated using multibeam bathymetric data in the navigable channel of San Andrés de Tumaco - Nariño, specifically in the sector known as "La Barra," for different periods between 2019 and 2021. Additionally, the coastline was traced for the years 2019, 2020, and 2021 to identify coastal dynamics at the estuary mouths closest to the study area and their relationship as sediment sources. Lastly, precipitation data were analyzed to establish its correlation as a forcing variable for sediment transport and continental sediment input into Tumaco Bay. As a result of these analyses, the sector of La Barra exhibited the highest accumulated sedimentation volume of 188 881 m³ and erosion volume of 150 245 m³, attributed to the longest observed period. Additionally, the average sedimentation rate was calculated as 24409 m³/month, excluding the longest period. The spatiotemporal analysis of the coastline revealed sectors with accretion, retreat, or which are stable or constant, with accretion processes predominating due to continental sediment accumulation. Furthermore, the relationship between precipitation and the accumulated sedimentation volume in La Barra sector is represented by the equation $S = 56.591p + 15529$, and for the accumulated erosion volume, $E = 48.749p - 5263.6$. Based on the estimation of sedimentation/erosion rates, coastal dynamics, and their correlation with precipitation as an influential variable in sediment transport, which generates morphological changes in the seafloor, decision-making authorities can propose adjustments in removal processes in the La Barra sector to ensure safe navigation in the access channel to Colombia's second most important Pacific port.

KEYWORDS: Bathymetry, erosion, sedimentation, navigation channel, TIN, morphological changes, sediment transport, Tumaco.

INTRODUCCIÓN

Los océanos y mares son instrumentos económicos orientados a la operación de la navegación, donde la seguridad marítima tiene como propósito evitar accidentes, proteger la vida humana y el medio ambiente (Rojas *et al.* 2018). La región Pacífica tiene potencial para proyectarse a economías globales, lo que involucra mejorar el diseño en las rutas de navegación y garantizar la seguridad en las mismas, lo que exige estrategias e investigación que mitiguen riesgos antrópicos y naturales en el desarrollo de la actividad marítima.

Conocer las características geográficas, geológicas y geofísicas del fondo marino y litoral permite describir la dinámica en los canales de navegación y sectores aledaños, determinar factores que aceleran o retardan los procesos de sedimentación y/o erosión. Las fuentes principales de sedimentos marinos son de origen continental, los cuales son transportados como residuos al mar por los ríos. El propio océano ocasiona sedimentación debido a restos de organismos que viven en él, volcanes submarinos, a causa de corrientes y desintegración por acción química y gases procedentes de la atmósfera (Cifuentes, Torres y Frías, 1997).

El sistema económico basado en la actividad marítima ha tenido un aumento significativo, representado en el crecimiento del número de actividades comerciales y portuarias que incrementan el tráfico marítimo; pensar en un evento que implique retrasar o detener dichas actividades despierta un interés por los procesos que pueden afectar la navegabilidad (Cifuentes y Mejía, 2015). En la actualidad, con el desarrollo tecnológico, las actividades marítimas tienen más recursos a su alcance para garantizar la navegación segura. Las campañas de levantamiento hidrográfico se realizan cada vez más bajo estándares que propenden mayor precisión, dándole prioridad a la información de los canales navegables, que son parte del eje económico nacional; de allí que cuando se identifican procesos de sedimentación acelerados, procede un seguimiento para determinar la necesidad de hacer remoción de estos.

En el municipio de Tumaco se ubica el segundo puerto más importante de la costa Pacífica colombiana; en el cual se ha identificado un cambio en la morfología debido a la acumulación acelerada de sedimento en el sector denominado La Barra, que hace parte de su canal navegable (Tejada *et al.* 2003). Como medida de prevención

que garantice la navegabilidad, los entes encargados diseñaron una trampa de sedimentos para mitigar la afectación por la acumulación de estos sobre el canal (Barajas y García, 2014). Adicionalmente, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) realiza campañas de levantamiento hidrográfico periódico y el Instituto Nacional de Vías (Invias) realiza dragados de remoción de sedimentos en el sector.

Los datos proporcionados por las campañas de levantamiento hidrográfico son el insumo para actualizar la cartografía de todo el territorio colombiano en el ámbito marítimo y fluvial (Dimar, 2021). Los navegantes emplean la información suministrada en las cartas náuticas para definir sus rutas de acuerdo con sus necesidades y los requerimientos mismos de la embarcación. Para proporcionar seguridad a los navegantes, la periodicidad en la actualización de la información considera la incidencia de factores que aceleren el proceso de sedimentación. Debido a su ubicación geográfica, la dinámica morfológica de la bahía de Tumaco está influenciada por la cantidad de ríos y/o vertientes de estos que desembocan en la costa (Niño y Oviedo, 2018), relacionados también con variables atmosféricas como la precipitación (Gómez y Peñaranda, 2012). Las mareas semidiurnas, las corrientes y el oleaje que entra en la bahía provenientes del suroeste (SW) y el sur-suroeste (SSW), las cuales tienen afectación en el transporte de sedimentos (Restrepo, Otero y López, 2009), son los encargados de transportar los sedimentos que aporta el río Mira (con caudal medio anual de 868 m³/s y es la corriente más grande de agua cercana a la zona de estudio) durante la época de lluvias, período en el que presenta su mayor caudal (MADS-Inveimar, 2012. En Barajas y García, 2014).

De acuerdo con la información disponible, fue posible analizar y hacer seguimiento para determinar un valor aproximado de la tasa de sedimentación en el sector La Barra, en períodos entre 2019 y 2021; inspeccionar los cambios en la línea de costa de los esteros que desembocan próximos a la zona de estudio, con imágenes satélites, e identificar la incidencia de la precipitación en los procesos de sedimentación y erosión, determinando un factor de correlación entre las variables.

ÁREA DE ESTUDIO

El Pacífico colombiano actualmente cuenta con dos puertos marítimos, el puerto de Buenaventura y el puerto de Tumaco, siendo este último el segundo en importancia para el desarrollo de las actividades marítimas (Gómez y Peñaranda, 2012). Se encuentra ubicado geográficamente en la bahía de Tumaco (Nariño), rodeado de la desembocadura de los ríos Chagüí, Colorado, Curay, Imbipí, Llanaje, Rosario y Tablones (Niño y Oviedo, 2018). El área de estudio se localiza sobre el canal de acceso al puerto de Tumaco, el cual tiene una extensión aproximada de 8500 m (BAGGERWERKEN DECLOEDT y ZN|Colombia, 2020), específicamente en el sector denominado La Barra, con un área de 619 611 m² y una longitud de 1750 m. En el sector La Barra periódicamente se realizan dragados del fondo marino, con el propósito de mantener la profundidad de navegación requerida por el puerto. En la zona de dragado se diferencian tres partes: la barra longitudinal de sedimentos, la trampa de sedimentos y el canal navegable (Fig. 1).

A nivel regional, geológicamente el Pacífico colombiano hace parte del bloque Norandino, el cual se encuentra dominado por un borde activo o convergente producto de la interacción entre las placas de Nazca y Suramericana, compuesto por la plataforma continental, el talud y la fosa Colombo-Ecuatoriana (Collot, Sallares y Pazmiño, 2009). Regionalmente, la bahía de Tumaco está condicionada por procesos tectónicos y geológicos que interviene en su dinámica geomorfológica; por ejemplo, sobre la bahía evidencia la continuidad de dos anticlinales y un sinclinal en dirección NE, también, hacia el SW de la bahía la presencia de la falla Tumaco en dirección N45W, y al N finaliza en la punta de Cascajal la falla Remo Lino-Charco (Correa y González, 1989).

Adicionalmente, la bahía de Tumaco está asociada a deltas desarrollados sobre un sustrato rocoso constituido por rocas sedimentarias neógenas, que afloran en el sector de costa acantilada y que condicionan el transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa, el cual sirve además de separación a dos sistemas deltaicos al norte el sistema deltaico del río Patía y al sur el sistema deltaico del río Mira (Nivia, Pérez y Sepúlveda, 2003). Localmente, se

generan geformas como islas, espigas y pilares, entre otras, con mayor predominancia de las planicies costeras, que a su vez se constituyen por

plataformas intermareales no vegetadas, planos de inundación y planos y llanuras con vegetación halófila (Bermúdez, Álvarez y Niño, 2014).

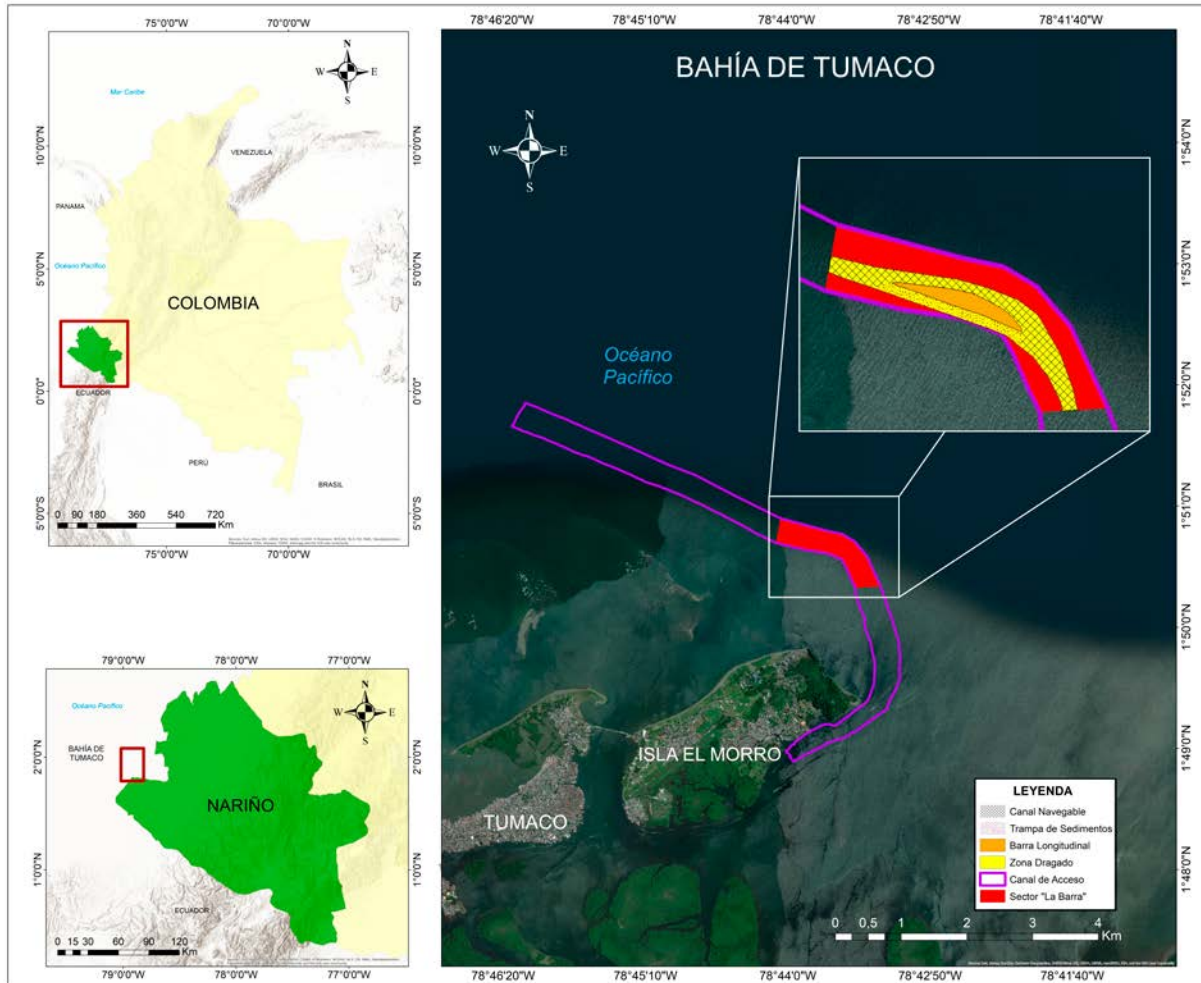


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

METODOLOGÍA

Cambios morfológicos del fondo

Se accedió a la base de datos disponible de batimetrías, entre los años 2019 a 2021, de la oficina de levantamientos hidrográficos del CCCP. La información batimétrica dentro de los espacios marítimos y fluviales bajo la jurisdicción de la Dirección General Marítima (Dimar) cumple las especificaciones técnicas durante la adquisición, procesamiento y cartografía, de acuerdo a la Resolución N°. 157 del 2011-Dimar, la cual se

rige bajo los estándares mínimos establecidos en las normas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) para los levantamientos hidrográficos, 5ª Edición de febrero del 2008 (Dimar, 2011).

Los levantamientos se realizaron a bordo de la unidad ARC "Isla Cascajal", empleando una ecosonda multihaz REASON SEABAT 7125 y el sistema global de navegación por satélite (GNSS) TRIMBLE R10, configurado en modo diferencial (utiliza dos equipos simultáneamente; una estación de referencia y una móvil) y RTK

(correcciones en tiempo real transmitidas por redes de estaciones permanentes). Todos los datos están referidos al datum vertical del nivel medio de las bajamares de sicigia (MLWS, por sus siglas en inglés), determinado por investigadores de los centros de investigaciones de la Dimar (Álvarez *et al.*, 2018; Pulido *et al.*, 2013).

Los archivos de batimetría analizados no son homogéneos espacialmente, por ello se definió un borde que permite extraer una zona común para todos los levantamientos y así tener la misma información batimétrica para la comparación espacio-temporal. Con las batimetrías se hizo un análisis mediante una comparación TIN, la cual es una representación de la geofirma por medio de redes irregulares de triángulos (ESRI, 2016). Este tipo de modelos es usado para el modelado de alta precisión de áreas pequeñas, por lo que es aplicado en la ingeniería, donde resultan útiles porque permiten realizar cálculos de área planimétrica, área superficial y volumen.

Se realizó una operación denominada diferencia TIN a TIN en el software Hypack® para determinar un valor aproximado de erosión y/o sedimentación acumulada entre las batimetrías contiguas. Con el objetivo de facilitar

su entendimiento, la información se presenta en unidades de volumen acumulado mensualmente; sin embargo, no se debe tomar como un valor de erosión y/o sedimentación mensual acumulada fija, debido a que mes a mes puede variar por factores oceanográficos y meteorológicos propios de la zona. También se definieron líneas transversales para hacer seguimiento de los cambios.

Dinámica de la línea de costa

Con el fin de identificar la relación existente entre los cambios morfodinámicos de la línea de costa en los esteros cercanos al área de interés, con los cambios morfológicos en el fondo marino del sector La Barra y su posible influencia de aportes de sedimentos continentales, se identificó y se digitalizó la línea de costa usando fotointerpretación de imágenes satelitales (Castañeda, 2017). Los esteros seleccionados fueron: Guandaraja, Natal, Aguacalara, Trapiche y Resurrección (Fig. 2), los cuales, en una escala regional, pertenecen a la zona hidrográfica río Mira Mataje, subzona río Mira y a una escala local, a la cuenca sistema de esteros del río Mira (Corponariño, 2007).

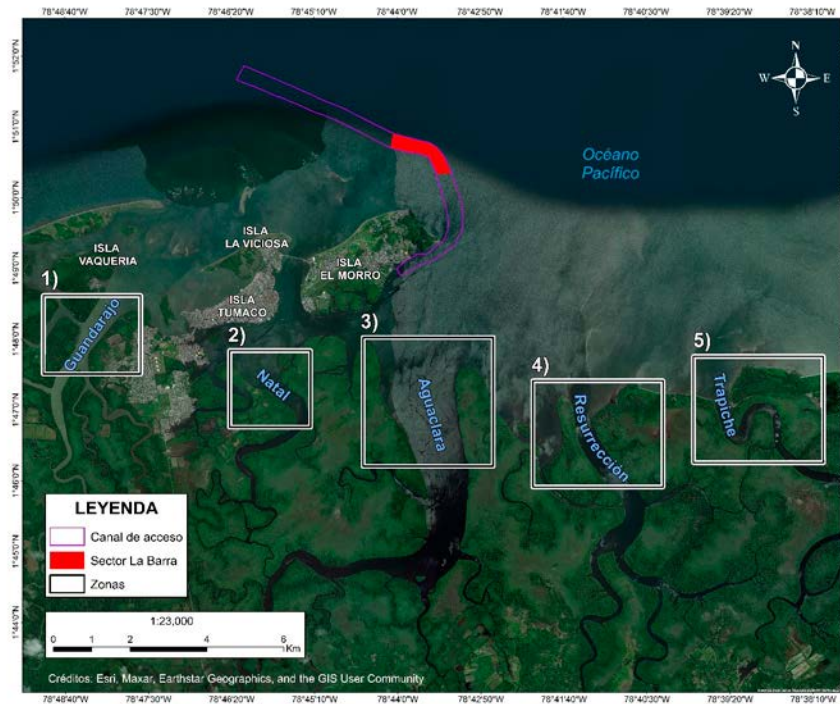


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio y zonas de análisis de dinámica de línea de costa en los esteros del sistema de esteros del río Mira.

Para determinar procesos de erosión y sedimentación en las zonas de los esteros se utilizaron las líneas de costa referentes a los años en que se ejecutaron los levantamientos batimétricos analizados en esta investigación. A través del portal de datos Earth Explorer del Servicio geológico de Estados Unidos (USGS,

por sus siglas en inglés) (Survey, 2021) se seleccionaron tres imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI/TIRS C1 LEVEL desde el 2019 hasta el 2021, procurando escoger aquellas con menor nubosidad para apreciar visualmente el límite costero (Guido *et al.*, 2009) (Tabla 1).

Tabla 1. Imágenes satelitales empleadas para trazar la línea de costa.

No.	Fecha	Nombre del archivo con las imágenes	Resolución
1	2019/03/02	LC08_L1TP_010059_20190302_20190309_01_T1	30 m
2	2020/03/04	LC08_L1TP_010059_20200304_20200314_01_T1	30 m
3	2021/03/23	LC08_L1TP_010059_20210323_20210402_02_T1	30 m

Las imágenes satelitales fueron procesadas en el software ArcMap, empleando las bandas RGB 6, 5, 4, con una escala de trabajo durante la digitalización de 1:60000. Una vez digitalizadas las líneas de costa, se calcularon las áreas de acreción o retroceso entre los periodos 2019-2020 y 2020-2021, con el fin de conocer el comportamiento costero de manera cuantitativa.

Comportamiento de la precipitación

Para el análisis de la precipitación en la zona de estudio, se consultaron los datos proporcionados por las estaciones cercanas pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Sin embargo, debido a la discontinuidad en los datos mensuales de estas estaciones, se optó por emplear aquellos medidos en la estación pluviométrica más cercana a la zona de estudio y perteneciente a la Dimar (Fig. 1). La elección de esta estación se basó en su ubicación geográfica dentro de las instalaciones del CCCP, lo que garantizó la continuidad de los datos en el periodo de tiempo comprendido entre 2019 y 2021, gracias al monitoreo constante y la calibración periódica de la estación.

Se evaluaron las precipitaciones acumuladas durante los mismos periodos en los que se realizaron los levantamientos batimétricos. El objetivo fue identificar si existe alguna relación entre los cambios morfológicos de sedimentación y erosión en el fondo marino del sector La Barra, y el posible aporte de sedimentos continentales transportados por los afluentes que desembocan en la zona.

Resultados y discusión

De acuerdo con los datos disponibles, se consideraron los valores extremos de cada una de las campañas para delimitar los rangos de variación (Tabla 2). Se observó la variación morfológica del fondo marino a través de las diferencias en las profundidades, haciendo un seguimiento correspondiente a cada una de las fechas (Fig. 3).

Tabla 2. Información general de las campañas de levantamiento hidrográfico.

Campaña de levantamiento	Profundidad mín. (m)	Profundidad máx. (m)
Febrero 2019	3.23	8.67
Septiembre 2019	3.42	8.51
Abril 2020	1.71	8.87
Julio 2020	3.62	9.35
Diciembre 2020	3.36	8.57
Marzo 2021	4.08	8.74
Junio 2021	3.94	8.58
Agosto 2021	3.90	10.05

Como se observa en la Figura 3, en febrero de 2019 el marco del canal navegable está bien definido; transcurrido un tiempo cambia la morfología, afectando inicialmente la trampa de sedimentos en septiembre de 2019; este proceso de acreción continua meses después, como se observa en abril de 2020, donde el valor mínimo de profundidad se ha reducido 1.52 m en 14 meses. En junio de 2020, Invias realizó una intervención de dragado de relimpia en el área donde cambia

de dirección el canal de acceso, principalmente en el canal navegable y la trampa de sedimentos (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020). Se restauró el diseño de canal con unas profundidades de tolerancia de 7.6 m, de acuerdo

con el informe de dragado (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020). Después de esa fecha las imágenes muestran la acumulación de sedimentos en el mismo sector.

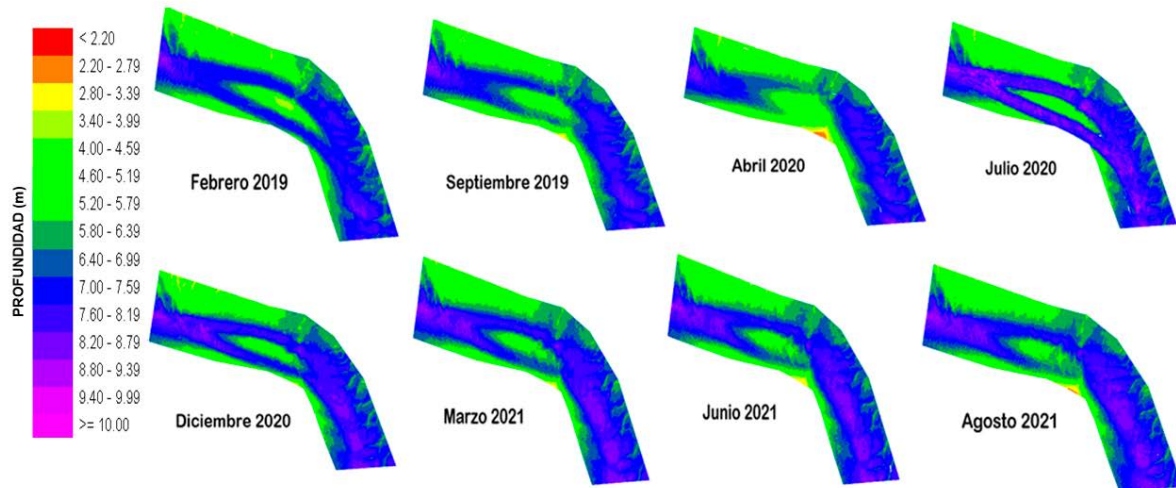


Figura 3. Batimetrías desde 2019 al 2021.

Tras realizar una comparación entre las batimetrías disponibles y de acuerdo con los resultados obtenidos en la operación diferencia TIN a TIN, se estableció que los valores positivos representan el proceso de sedimentación y los valores negativos el proceso de erosión (Fig. 4a).

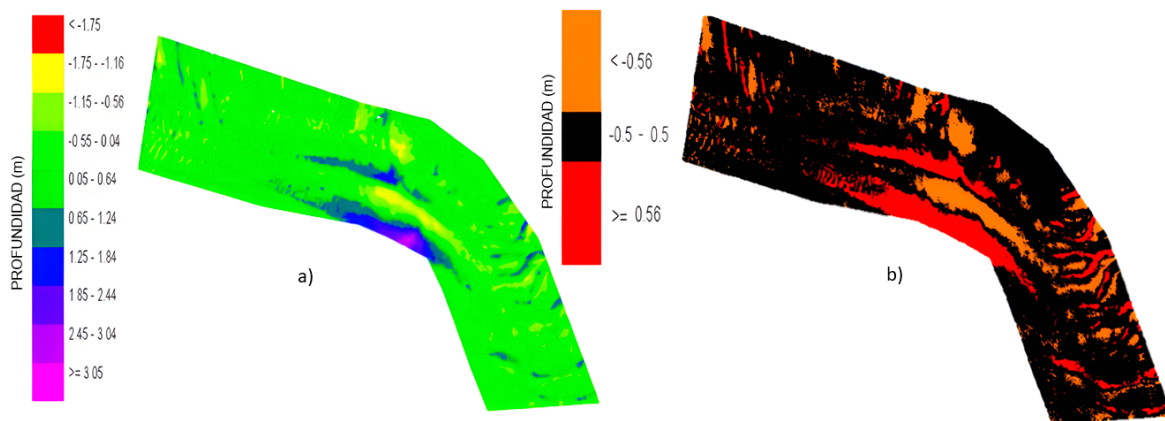


Figura 4. Diferencia TIN A TIN febrero 2019 - septiembre 2019 sector La Barra.

Para identificar las zonas de mayor afectación por alguno de los dos procesos se asignaron tres colores; de los cuales el color negro representa las zonas donde no se considera una variación

significativa en la morfología del fondo, con valores entre -0.5 m y 0.5 m, el aumento en la sedimentación o acreción se representa en color rojo y la erosión en un color naranja (Fig. 4b). Con

las consideraciones planteadas se observó que la afectación de sedimentación se da principalmente en el sector cóncavo del canal. Entre febrero y septiembre de 2019 la profundidad máxima de erosión y sedimentación fue de -1.73 m y de 3.32 m, respectivamente, con una tasa de erosión de 14310 m³/mes y una tasa de sedimentación de 17699 m³/mes.

Siguiendo el comportamiento entre septiembre de 2019 y abril de 2020 (Fig. 5) los valores máximos de erosión y sedimentación

fueron -1.80 m, con tasa de erosión de 8715 m³/mes y tasa de sedimentación de 20191 m³/mes. De acuerdo con lo observado en los mapas, la afectación de sedimentación es muy representativa en la trampa de sedimentos; esos valores tienen una incidencia sobre la seguridad en la navegación, por tal motivo la entidad externa encargada de realizar los dragados de limpiezas procede en el mes de junio a remover el material en este sector (BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia, 2020).

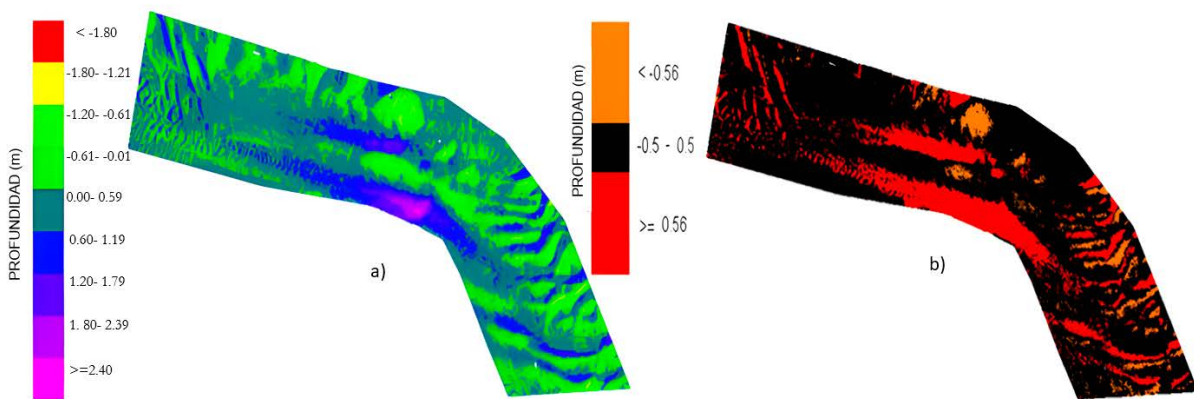


Figura 5. Diferencia TIN A TIN septiembre 2019 - abril 2020 sector La Barra.

Tras el dragado de limpieza del sector La Barra se realizó la comparación entre la batimetría posterior al dragado y la inmediatamente anterior levantada en abril del 2020; en esta comparación se observó el diseño del canal definido (Fig. 6).

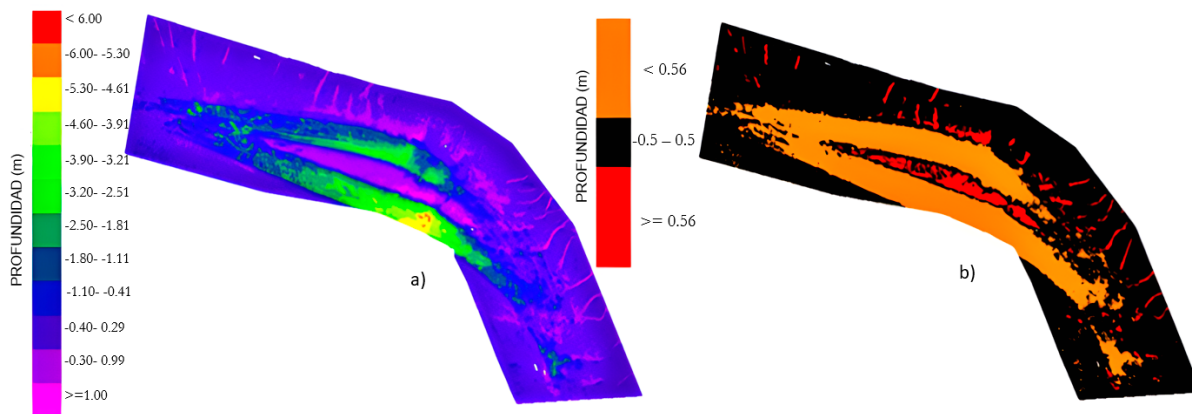


Figura 6. Diferencia TIN A TIN abril 2020 - julio 2020 sector La Barra.

Los valores máximos entre abril y julio del 2020 fueron -6.04 m y 1.65 m, los cuales se podrían interpretar como procesos de erosión y sedimentación, respectivamente; sin embargo, no es apropiada dicha afirmación, teniendo en cuenta que se realizó una intervención antrópica que afecta la morfología del fondo marino. Razón por la cual tampoco se considera prudente expresar los valores de tasas de sedimentación y erosión.

En el tiempo transcurrido entre julio y diciembre de 2020 (Fig. 7) en la zona de erosión se presentó un valor máximo en -2.10 m y en la de sedimentación en 3.92 m; las tasas de variación en el mismo orden fueron 17795 m³/mes y 29208 m³/mes, siendo consecuente con las tasas dadas entre septiembre de 2019 y abril de 2020. A partir de diciembre de 2020 se inician levantamientos batimétricos más consecutivos, con el propósito de hacer seguimiento a la tasa de cambio de los procesos.

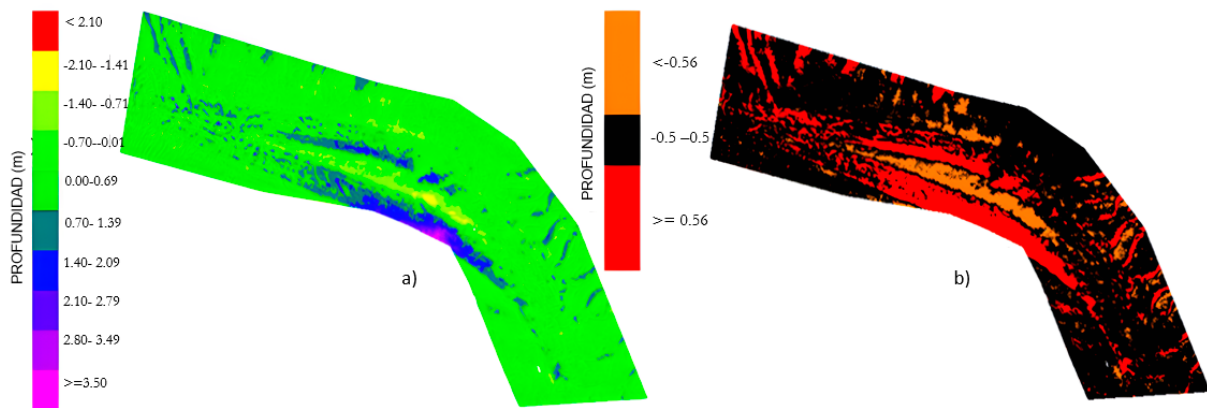


Figura 7. Diferencia TIN A TIN julio 2020– diciembre 2020 sector La Barra.

Tres meses después (Fig. 8) la tasa de erosión fue de 16266 m³/mes, con una profundidad máxima de -1.11 m. Por otro lado, la tasa de sedimentación continuó siendo superior con respecto a la de erosión, presentando un valor de 28045 m³/mes y un valor máximo de 1.75 m. Sin embargo, estos datos son inferiores a los registrados anteriormente debido a que se reduce la temporalidad.

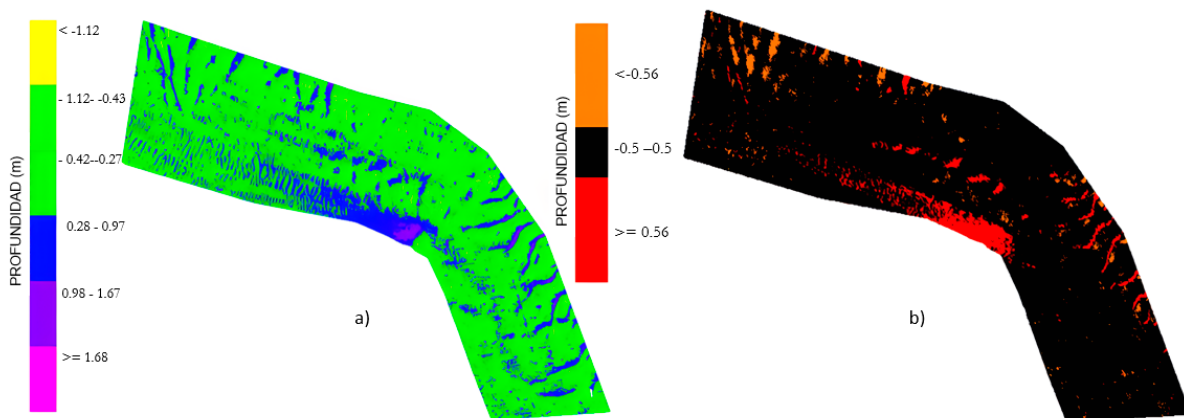


Figura 8. Diferencia TIN A TIN diciembre 2020 - marzo 2021 sector La Barra.

Manteniendo la temporalidad de tres meses, se realizó la comparación entre la batimetría de marzo y junio del 2021 (Fig. 9), de la cual se obtuvieron los valores máximos de -1.08 m y 1.81 m; además tasas de 16789 m³/mes y 23718 m³/mes para la erosión y sedimentación, respectivamente. De acuerdo con estos resultados se observó una proporcionalidad en los valores para cambios de tres meses.

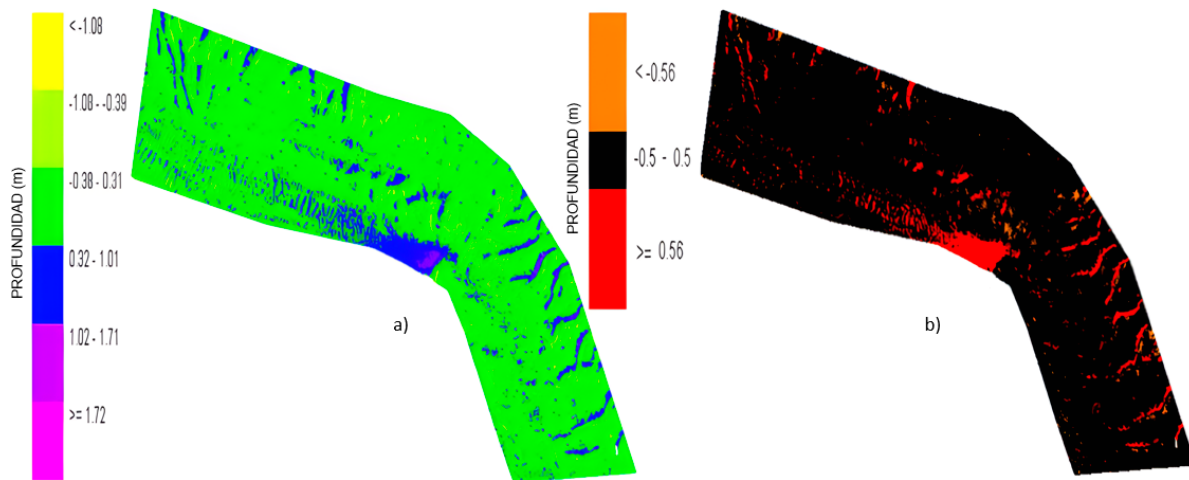


Figura 9. Diferencia TIN a TIN marzo - junio 2021 sector La Barra.

Reduciendo la relación de temporalidad a dos meses (Fig. 10) se obtuvieron los valores máximos en -0.93 m y 1.37 m, con tasa de erosión de 21586 m³/mes y tasa de sedimentación de 27593 m³/mes.

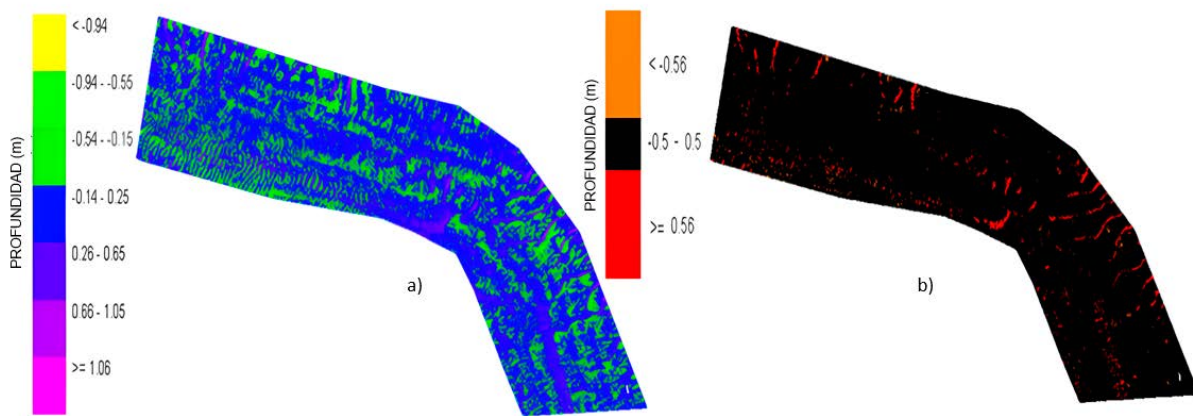


Figura 10. Diferencia TIN A TIN junio - agosto 2021 sector La Barra.

De acuerdo con los cambios morfológicos del fondo durante el transcurso de tiempo analizado, el sector La Barra tiene una mayor tendencia a la sedimentación que a la erosión. Considerando una temporalidad más amplia, desde julio del 2020 a agosto de 2021 (Fig. 11), la tasa de sedimentación es de 16694 m³/mes y la de erosión

20098 m³/mes; donde la sedimentación alcanza una altura de 4.97 m en un área de 257 093 m² y la erosión -2.37 m en 362 369 m². Siguiendo un patrón de mayor diferencia volumétrica asociada a sedimentación en una menor área, representado en mayores alturas que reducen la profundidad de navegación.

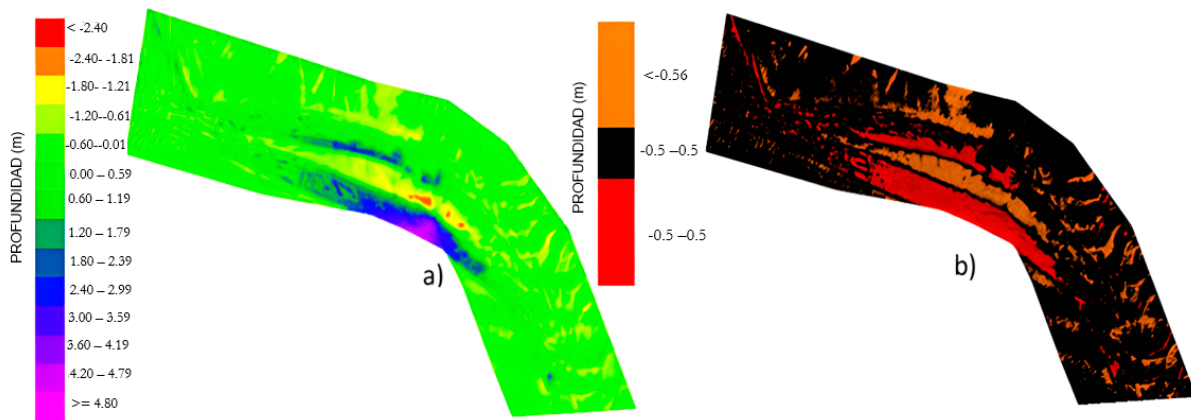


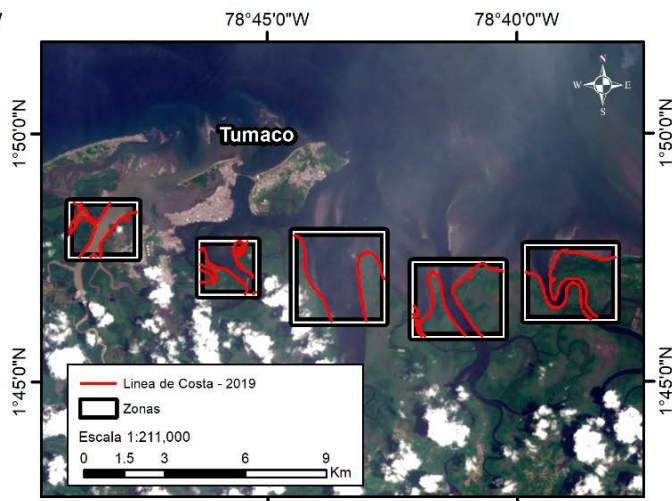
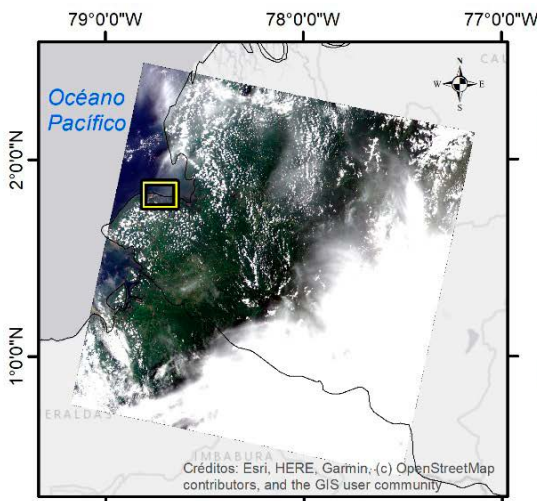
Figura 11. Diferencia TIN a TIN julio 2020 - agosto 2021 sector La Barra.

De acuerdo con los datos de tasas de sedimentación y exceptuando los correspondientes al dragado de relimpia del canal, se ratifica la acumulación de sedimentos ajustada a una tendencia lineal de $17562 \text{ m}^3/\text{mes}$. Por otro lado, la tasa de erosión presenta una tendencia de $12453 \text{ m}^3/\text{mes}$, lo que continúa corroborando la predominación del proceso de sedimentación para el sector.

Se considera que el diseño que tiene el canal navegable en el sector de La Barra es homologable a un meandro, donde la dinámica de su movimiento se manifiesta mediante procesos de erosión y sedimentación actuando simultáneamente. La velocidad de flujo en la curva exterior es significativamente mayor, lo que implica erosión, y en la curva interior sedimentación (Ceballos, 2011), evidenciado en el comportamiento de acumulación de sedimentos en la zona interna

o trampa de sedimentos, que progresivamente aumenta hasta saturarla y sobrepasar la barra longitudinal, lo que conlleva a la afectación del canal navegable.

Por otro lado, para relacionar variables que influyen en el fenómeno de sedimentación y erosión del sector La Barra se identificó la cuenca continental que desemboca cerca de este, teniendo en cuenta que los aportes de sedimentos continentales están condicionados a factores como el área de la cuenca de drenaje, balance hidrológico entre precipitación y evaporación, geología, relieve e hidrología (Restrepo, 2005). Enmarcando la línea de costa en las desembocaduras del sistema de esteros del río Mira (Fig. 12) se compararon los cambios de retroceso o acreción, asociados a procesos de erosión o sedimentación, respectivamente.



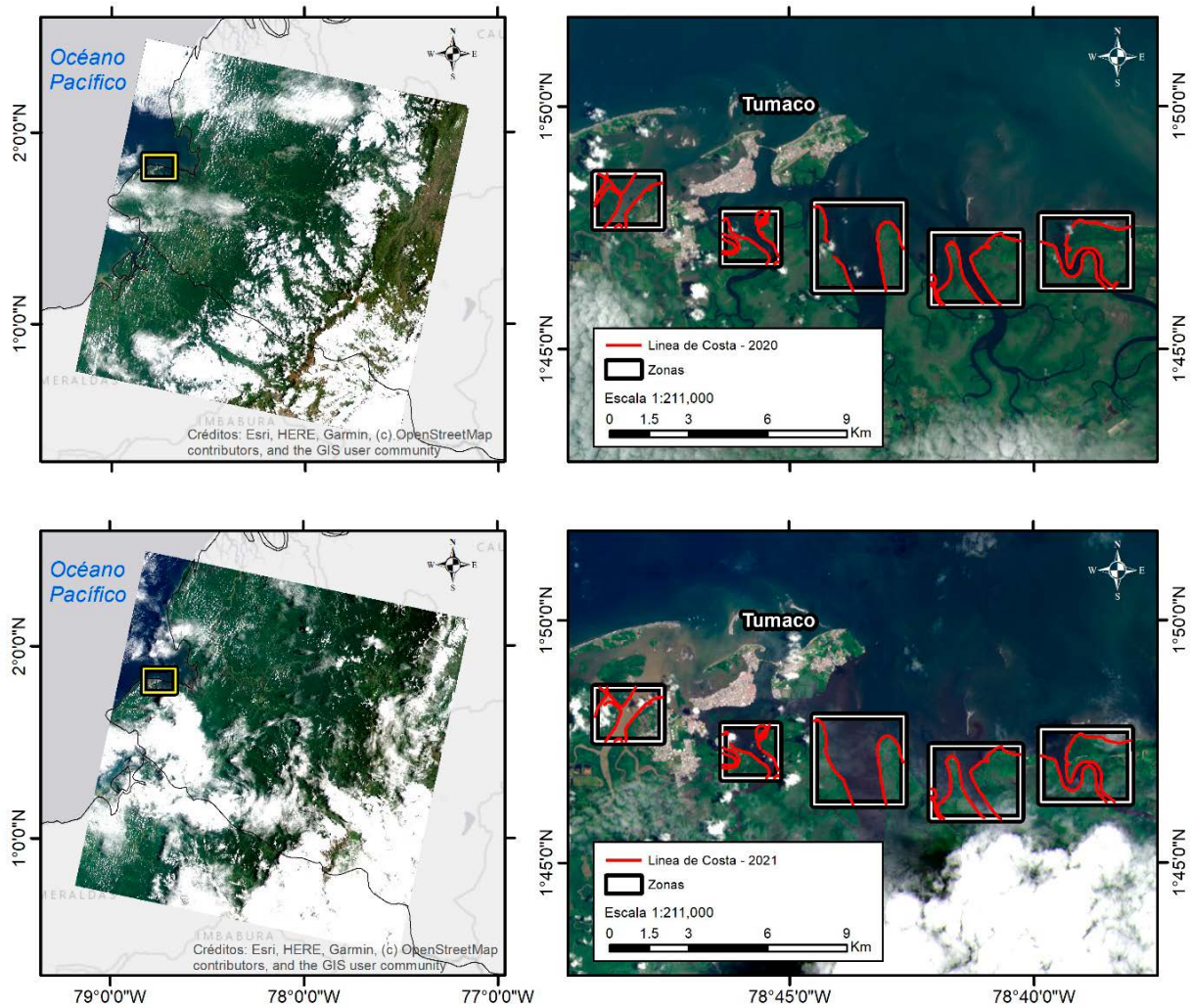


Figura 12. (Izq.) Visualización de las imágenes satelitales utilizadas. (Der.) Trazado de la línea de costa con respecto a cada imagen satelital.

La Zona 1, ubicada en el estero Guandarajo, presenta áreas de acreción y retroceso a lo largo del borde costero; sin embargo, predomina el proceso de sedimentación durante los dos periodos analizados, con un total de 44850 m² de acreción con relación a 28578 m² de retroceso. En general, es una zona dinámica que puede variar de erosión a sedimentación, o viceversa (figuras 13A y 13B). En la Figura 13C se evidenciaron, durante el periodo 2019-2020, procesos de tipo sedimentario; en el periodo 2020-2021 este patrón cambió su comportamiento a tipo erosivo. Caso contrario sucede en la Figura 13D, en la cual se presenta una alternancia a lo largo de la línea de costa entre procesos de sedimentación y

erosión durante el periodo 2019-2020, y cambia totalmente a sedimentación en el periodo 2020-2021.

La Zona 2 se localiza el estero Natal, al igual que en la zona anterior se evidencia que el proceso predominante es la sedimentación (figuras 14A y 14B). En términos generales, presentó 27765 m² de acreción y 23602 m² de retroceso durante los dos periodos analizados. En la Figura 14C se observa que, en el periodo 2019-2020, hubo una mayor incidencia en la sedimentación en comparación con el periodo 2020-2021, ya que en este último se generaron nuevas áreas de erosión. Otro ejemplo de esta dinámica se muestra en

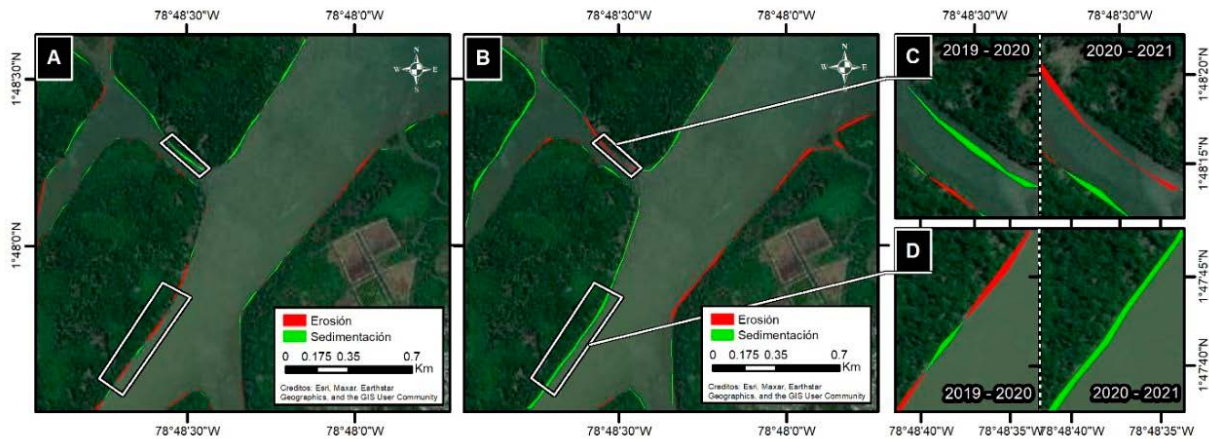


Figura 13. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 1. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación a detalle en un área específica para mejor visualización.

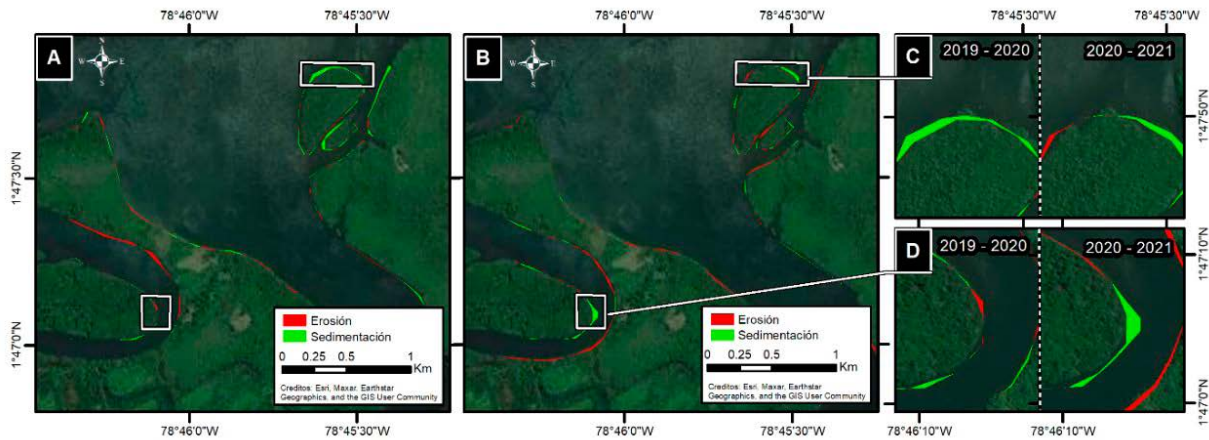


Figura 14. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 2. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

la curva de un meandro de la zona (Fig. 14D), donde acumuló sedimentos en el borde convexo y erosionó en el borde cóncavo.

La Zona 3, ubicada en el estero Aguaclara, se caracteriza por ser la zona con una mayor razón entre sedimentación y erosión en comparación a las otras cuatro zonas, debido a que evidenció en total 41015 m² de acreción y 15948 m² de retroceso durante los dos periodos analizados, siendo el proceso de sedimentación el más relevante (figuras 15A y 15B). A lo largo del borde costero se identificó un área con sedimentación durante el periodo 2019-2020 y para el año siguiente cambió la dinámica a erosión (Fig.

15C); sin embargo, en la Figura 15D se muestra lo contrario con áreas de erosión y sedimentación durante el periodo 2019-2020, y un aumento únicamente de sedimentación en el periodo 2020-2021.

La Zona 4, localizada en el estero Resurrección, se diferencia de las otras zonas debido a que presentó principalmente procesos de tipo erosivo durante el periodo 2019-2020, con 31828 m² de retroceso y 10880 m² de acreción, y durante el periodo 2020-2021 aumentó la sedimentación y disminuyó la erosión, con 35440 m² de acreción y de 23572 m² de retroceso (figuras 16A y 16B). Puntualmente, en las figuras 16A y 16B se

observa con mayor detalle la dinámica mencionada, donde los polígonos de color verde, asociados a sedimentación, aumentan en tamaño y longitud en comparación a los polígonos rojos asociados a erosión, desde el periodo 2019-2020 hasta el periodo 2020-2021.

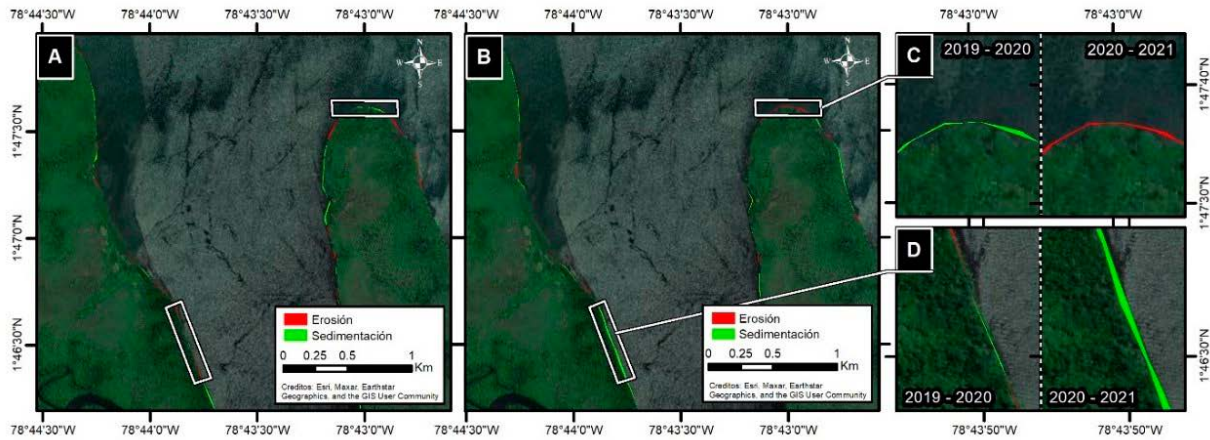


Figura 15. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 3. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C) y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

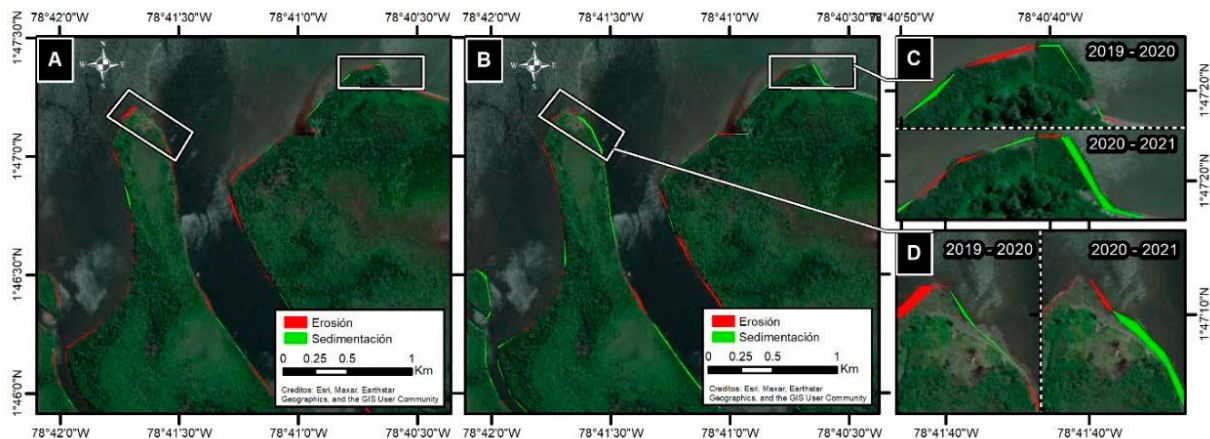


Figura 16. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 4. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C) y D) Ampliación de un área específica para mejor visualización.

La Zona 5 corresponde a la desembocadura del estero Trapiche, en el cual se generaron áreas de acreción y retroceso a lo largo línea de costa; sin embargo, predominó el proceso de sedimentación durante los dos periodos analizados, con un total de 48457 m² de acreción y 28519 m² de retroceso (figuras 17A y 17B). En las figuras 17C y 17D se observa en el borde convexo de las curvas de dos meandros un cambio de procesos entre los dos

periodos analizados, inicialmente de tipo erosivo y finaliza con procesos de sedimentación para el periodo 2020-2021.

Producto de la interacción entre el mar y el sistema de esteros del río Mira, se puede describir la bahía de Tumaco con un comportamiento típico de zonas deltaicas, donde se evidenciaron sectores con cambios de acreción, retroceso y

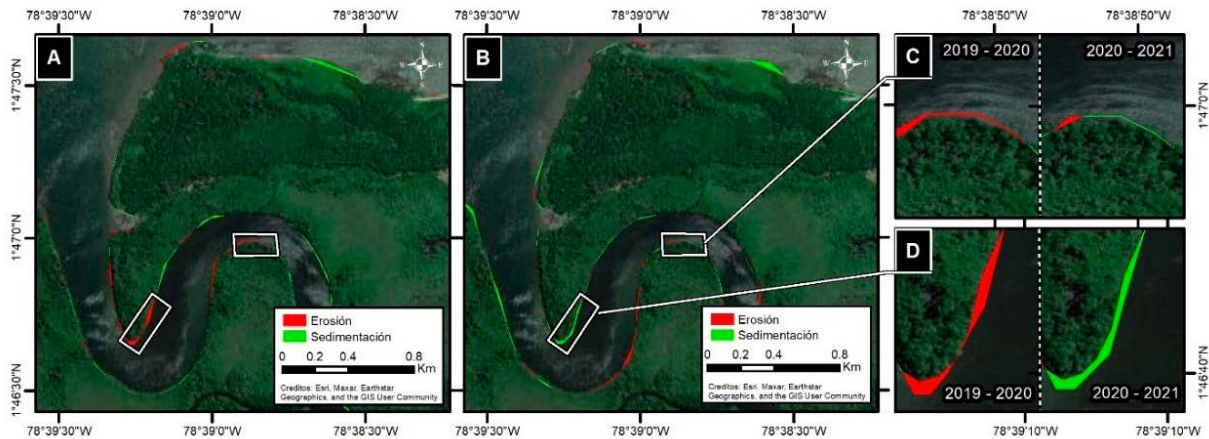


Figura 17. Áreas de erosión y sedimentación en la Zona 5. A) Periodo 2019-2020. B) Periodo 2020-2021. C y D) Ampliación de en un área específica para mejor visualización.

nulos o constantes, predominando los cambios ligados a la acumulación de sedimentos (Niño y Oviedo, 2018). En general, en las cinco zonas de estudio predominó el proceso de sedimentación, en las cuales el total de estas áreas fue de 80051 m² para el primer periodo y 128 356 m² para el segundo, con excepción de la Zona 4, en la cual durante el periodo 2019-2020 tomaron

fuerza los procesos erosivos y disminuyeron los de sedimentación (Tabla 3).

El comportamiento de los esteros fue similar al exhibido en La Barra, en la medida que avanzó el tiempo aumentó la cantidad de sedimentos depositados; probablemente debido al transporte de origen continental, como una de las fuentes aportantes en este sector.

Tabla 3. Datos de erosión y sedimentación en las cinco áreas de estudio.

Zona	Periodo 2019 - 2020		Periodo 2020 - 2021	
	Sedimentación (m ²)	Erosión (m ²)	Sedimentación (m ²)	Erosión (m ²)
1	15816	13003	29034	15575
2	16446	10002	11319	13600
3	16170	10027	24845	5921
4	10880	31828	35440	23572
5	20739	17595	27718	10560

Finalmente, se analizaron los datos de precipitación de la estación CCCP, teniendo en cuenta que el radio de acción de una estación pluviométrica es de 10 km aproximadamente y esta cubre la zona de estudio, ubicada a 2856 m y las desembocaduras de los diferentes esteros que convergen en la zona. Según el análisis presentado en Tejada *et al.* (2003), el fondo de la bahía de Tumaco está compuesto, principalmente, por sedimentos finos que varían entre arenas y lodos, de origen litoclástico (origen continental). La dinámica marina propone un

transporte de sedimentos en dirección al este, desde la desembocadura del río Mira hasta las islas de Tumaco, destacando los aportes que hace el río sobre la bahía como la fuente principal de sedimentos.

El transporte de sedimentos proveniente de la desembocadura del río Mira sigue afectando a las islas de Tumaco, modificando su morfología y, a su vez, el patrón de corrientes en sus alrededores, siendo este un sistema muy activo (Tejada, 2003). También se aprecia que, tanto en marea alta

como en baja, existe una tendencia a depositar sedimentos en la zona donde anteriormente se encontraba ubicada la isla del Guano (Tejada *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta la dinámica de la bahía de Tumaco, pueden generarse cambios en la sedimentación y/o erosión sobre el canal de

acceso al puerto de Tumaco. En este sentido, se agruparon las precipitaciones mensuales en los mismos periodos en los que se hicieron las comparaciones batimétricas y se analizó la relación entre la precipitación mensual, la sedimentación y erosión acumulada. La Tabla 4 presenta los valores acumulados para cada variable analizada en un periodo determinado.

Tabla 4. Periodos evaluados y acumulados de precipitación (estación CCCP), sedimentación y erosión.

Periodos	Precipitación acumulada (mm)	Sedimentación acumulada (m³)	Erosión acumulada (m³)
Feb. 2019-Sep. 2019	1604.9	123 894.0	100 172.0
Sep. 2019-Abr. 2020	1767.4	141 335.5	61007.5
Jul. 2020-Dic. 2020	442.2	146 038.2	88973.2
Dic. 2020-Mar. 2021	1325.9	84135.6	48796.4
Mar. 2021-Jun.2021	1473.6	71155.1	50368.2
Jun. 2021-Ago. 2021	728.3	55186.5	43172.4
Jul. 2020-Ago. 2021	3055.8	180 881.1	150 244.8

La relación entre la precipitación y la sedimentación acumulada en los periodos analizados mostró una tendencia positiva en la zona de estudio (Fig. 18) y una correlación entre las variables dada por R², que indica una influencia de la precipitación con el incremento de los sedimentos.

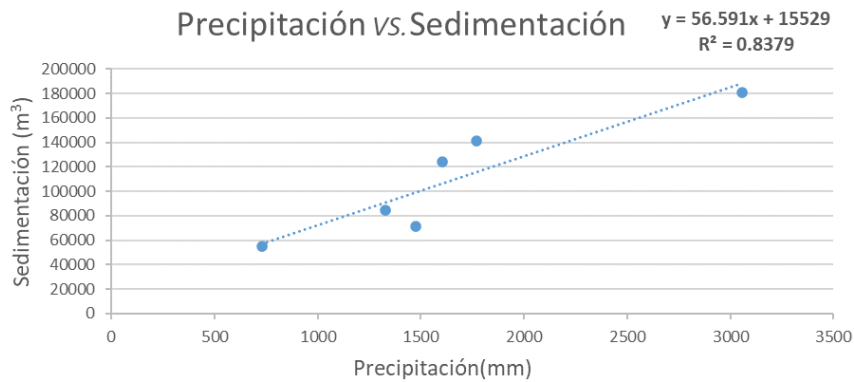


Figura 18. Precipitación acumulada (mm) vs. sedimentación acumulada (m³).

Se decidió excluir los valores de precipitación, erosión y sedimentación correspondientes al periodo de julio a diciembre de 2020 del análisis, debido a que presentaron un comportamiento anormal en comparación con los demás periodos. Durante estos cinco meses se observaron valores de sedimentación y erosión que fueron iguales o superiores a periodos más extensos. Este

comportamiento puede atribuirse al aumento en la velocidad de las corrientes en el canal de acceso, causado por la acción humana de la relimpia. Por lo tanto, se recomienda considerar la hidrodinámica y la variabilidad de las corrientes en la zona de estudio para futuras investigaciones, teniendo en cuenta este comportamiento antropogénico.

Al relacionar la precipitación y la erosión acumulada se observa un crecimiento positivo, la correlación entre las variables, dado por el valor R^2 , indica también una correspondencia alta entre las dos variables (Fig. 19). La correlación observada entre la precipitación con el incremento de sedimentación y la erosión permite describir

un factor influyente en la dinámica presente sobre la bahía de Tumaco; siendo la precipitación un componente significativo en la variación de la sedimentación sobre la bahía, pero también sobre un sitio crítico y de alto interés dentro del canal de acceso al puerto de Tumaco como es el sector de La Barra.

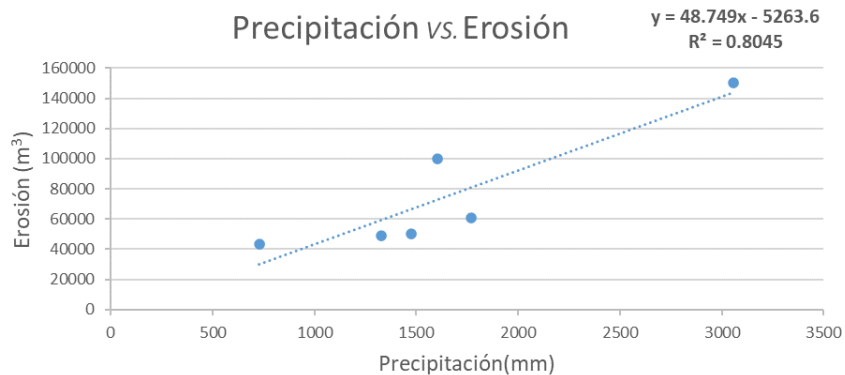


Figura 19. Precipitación acumulada (mm) vs. erosión (m³).

CONCLUSIONES

De acuerdo con la disponibilidad de datos batimétricos desde febrero del 2019 hasta agosto del 2021 se consideraron siete diferentes periodos de análisis, los cuales variaron entre dos, tres, cinco, siete y hasta trece meses, obteniendo valores estimados de sedimentación-erosión acumulada de 71155 m³- 50368 m³, 55187 m³ - 43172 m³, 84136 m³ -48796 m³, 146 038 m³ - 88973 m³, 123 894 m³ -100 172 m³, 141 336 m³ - 61008 m³ y 180 881 m³ -150 245 m³.

La relación estimada de los meses considerados 'X', con la tasa de sedimentación fue $Y = 17562X$ con un $R^2 = 0.9262$, la cual muestra una tasa de acumulación de sedimento que se incrementa con el transcurrir del tiempo. Además, se identifica que en el período más amplio, de trece meses, se alcanza una altura de 4.97 m sobre el diseño del canal que se considera un peligro para la navegación.

En relación con la tasa de erosión se obtuvo $Y = 12453X$ con un $R^2 = 0.9542$, siendo también proporcional en el tiempo, pero con una tasa de crecimiento menor al proceso de sedimentación.

Se identificó que el mayor valor de erosión sin intervención fue de 2.37 m, para el período más amplio considerado y este no afecta la navegación.

Al hacer un análisis cuantitativo de la sedimentación, sin considerar el período abril de 2020 a julio de 2020, en el cual hubo una intervención antrópica al comportamiento propio y natural del canal (proceso de dragado de relimpia), se estimó la sedimentación mensual para cada período y al promediarlas se obtuvo una tasa de 24409.0 m³/mes, sin considerar el período más amplio.

El trazado de las líneas de costa en diferentes temporalidades permitió reconocer cambios de erosión, sedimentación y estabilidad costera en las desembocaduras de los esteros cercanos al área de estudio. Esto permitió identificar sectores adicionales con influencia en procesos de sedimentación, producto del aporte de sedimentos continentales, típicos de la dinámica natural de un sistema deltaico, los cuales probablemente también se depositen sobre el canal de acceso al puerto. Sin embargo, se recomienda utilizar imágenes satelitales o fotografías aéreas con resolución de detalle y una mayor temporalidad para calcular la correlación numérica entre los

volúmenes acumulados de sedimentación y erosión del sector La Barra, las precipitaciones y las tasas de erosión y sedimentación en los esteros.

Según fuentes consultadas, la dinámica sedimentológica sobre la bahía de Tumaco depende de factores como el oleaje, las corrientes y la morfología del lugar, entre otros. Este análisis permitió adicionar la precipitación a la lista de variables que producen un cambio en la sedimentación y erosión sobre la zona de estudio en el canal de acceso al puerto de Tumaco, observándose una relación aproximadamente lineal entre la acumulación de sedimentos y la precipitación dada por $S = 56.591p + 15529$, y una relación entre la erosión acumulada y la precipitación dada por $E = 48.749P - 5263.6$, ambas con un $R^2 = 0.8$. Esto indica que con el incremento de las precipitaciones aumenta el flujo en las vertientes y también los sedimentos en suspensión que arrastran los ríos y que, finalmente, convergen cerca de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los integrantes del Área de Manejo Integrado de Zona Costera – Sección de Levantamientos Batimétricos del CCCP; especialmente a Carlos Ruz, Laureano Sarmiento, Juan Sanabria, José Munir de la Rosa y los tripulantes de la ARC "Cascajal", por su acompañamiento y apoyo durante la fase de campo para la adquisición de datos batimétricos; a David Padilla por su apoyo durante la fase de procesamiento.

FUENTE FINANCIADORA

Este trabajo fue realizado con aportes financieros del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP) de la Dirección General Marítima (Dimar).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; metodología: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; software: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; validación: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; análisis: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; investigación: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; curación de datos: Y. C. C., C. A. A., A. M. M.

y P. A. Q.; redacción-preparación del borrador original: Y. C. C., C. A. A. y A. M. M.; redacción-revisión y edición: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q.; visualización: Y. C. C., C. A. A., A. M. M. y P. A. Q. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, M.; Pulido, D.; Solano, L.; Oviedo, F. (2018). Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 36: 53-69. <https://doi.org/10.26640/22159045.438>
- BAGGERWERKEN DECLOEDT & ZN|Colombia. (2020). *Dagrado de mantenimiento del Canal de Acceso al Puerto de Tumaco, en el departamento de Nariño*. Zoon N.V Sucursal Colombia: DEME, Creating land for the future.
- Barajas, S.; García, M. (2014). *Variación decadal de batimetrías dentro del canal de tránsito marítimo de Tumaco y su relación con parámetros oceanográficos*. Cartagena de Indias: Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".
- Bermúdez, C.; Álvarez, M.; Niño, D. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Bol. Cient. CIOH*, 32: 27-46. <https://doi.org/10.26640/22159045.262>
- Castañeda, D. J. (2017). Análisis de la línea de costa en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ceballos, J. D. (2011). Modelación hidráulica y morfodinámica de cauces sinuosos aplicación a la quebrada La Marinilla (ANT). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30: 107-118.
- Cifuentes, J. L.; Torres, M. P.; Frías, M. (1997). *El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química. 2ª Edición*. México, D. F.: Fondo de cultura económica.
- Cifuentes, C.; Mejía, G. (2015). Sedimentación en la bahía de Cartagena un impacto

- socioeconómico. *Dictamen Libre, Barranquilla Colombia*. <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.16.3065>
- Collot, J.; Sallares, V.; Pazmiño, N. (2009). Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la Consta Continental hasta las Isalas Galápagos. París: IRD – Institut de Recherche pour le Développement /INOCAR – Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño. (2007). Zonificación y codificación de cuencas hidrográficas en el departamento de Nariño. Corponariño.
- Correa, I.; González, J. (1989). Geomorfología general y sedimentología de la bahía de Tumaco. Instituto Nacional de Investigaciones Geología y Minería. Convenio Ingeominas-CCCP-Progog.
- Dirección General Marítima. (2011). Resolución No 157 de 2011 de Dimar. Por la cual se fijan las especificaciones técnicas para la realización de levantamientos hidrográficos y generación de información batimétrica en los espacios marítimos y fluviales colombianos bajo la jurisdicción de Dimar. https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/res_1572011.pdf
- Dirección General Marítima. (2021). Resolución No 0693-2021 MD-Dimar-Subdemar-Ginsem-Arinv 3 de agosto de 2021. (pág. 2). Bogotá.
- ESRI. (2016). ¿Qué es una superficie TIN?. ArcGIS Desktop. Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>
- Gómez, J.; Peñaranda, J. (2012). Descripción del comportamiento de variables atmosféricas y oleaje en el Puerto de Tumaco a partir de observación de datos. *Bol. Cient. CIOH*, 30: 75-92. <https://doi.org/10.26640/22159045.244>
- Guido, P.; Ramírez, A.; Godínez-Orta, L.; Cruz-León, S.; Juárez-León, A. (2009). Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, México. *Avances en recursos hidráulicos*, 20: 41-55.
- Niño, D.; Oviedo, F. (2018). Determinación de la variación morfológica costera de la Bahía de Tumaco, a partir de análisis multitemporal de sensores remotos. *Bol. Cient. CIOH*, 36:71-86. <https://doi.org/10.26640/22159045.439>
- Nivia, A.; Pérez, C.; Sepúlveda, J. (2003). Geomorfología y geología de la Plancha 383 Tumaco. Cali: Ingeominas.
- Pulido, D.; De Lisa, A.; David; D.; Guzmán, R. (2013). Determinación de los datums de referencia vertical con fines hidrográficos para la Bahía de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH*, 31: 175-190. <https://doi.org/10.26640/22159045.258>
- Restrepo, J. D. (2005). *Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. C.; Otero, L.; López, S. (2009). Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: Comparaciones estadísticas y aplicaciones a procesos costeros. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 33: 339-357.
- Rojas, D.; Rodríguez, H.; Uribe, S.; Osorio, L.; Iregui, P.; Pérez, N.; Pedroza, W.; Vega-Barbosa, G.; León, H.; Monroy, J.; Grisales, C.; Delgado, N.; Medina, O.; Rivera-Páez, S. (2018). *Intereses de Colombia en el mar: reflexiones y propuestas para la construcción de un país marítimo*. Bogotá: Escuela Superior de Guerra: Samuel Rivera Páez.
- Survey, U. S. (2021). Earth Explorer. Obtenido de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Tejada, C. (2003). *Clima marítimo y dinámica litoral de la bahía de Tumaco, datos básicos para la evaluación de riesgos ambientales marinos*. *Bol. Cient. CCCP*, 10: 67-76. https://doi.org/10.26640/01213423.10.67_76
- Tejada, C.; Otero, L.; Castro, L.; Afanador, F.; Devis, A.; Solano, J.; Fonseca, A. (2003). *Aportes al entendimiento de la bahía de Tumaco*. Entorno oceanográfico, Costero y de Riesgos. Colombia: Dimar.