

# Dinámica Costera en la Isla Puná del Golfo de Guayaquil, a partir de imágenes satelitales y SIG, periodo 2003-2021



## Coastal Dynamics of the Puná Island in the Guayaquil Gulf, using remote sensing and GIS, from the period 2003- 2021

Bustos Oña, Angélica; Sanunga Loayza, Josseline; Martillo Bustamante, Carlos; Espinoza Villacís, Elvis

 **Angélica Bustos Oña** ambustos@espol.edu.ec  
ESPOL, Ecuador

 **Josseline Sanunga Loayza** josnisan@espol.edu.ec  
ESPOL, Ecuador

 **Carlos Martillo Bustamante**  
cmartill@espol.edu.ec  
ESPOL., Ecuador

 **Elvis Espinoza Villacís** eaespino@espol.edu.ec  
ESPOL., Ecuador

### ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO

Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, Ecuador

ISSN: 1390-129X

ISSN-e: 2806-5522

Periodicidad: Semestral

vol. 5, núm. 1, 2023

acta.oceanografica@inocar.mil

Recepción: 11 Noviembre 2022

Aprobación: 12 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/648/6483742003/>

DOI: <https://doi.org/10.54140/raop.v3i1.55>

**Resumen:** El presente estudio expone los resultados obtenidos del análisis de la dinámica costera de la Isla Puná, que se localiza en la zona central del Golfo de Guayaquil. Este estudio se lo realizó mediante el procesamiento de imágenes satelitales, la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como plataformas de modelamiento de olas (Delft 3D). A partir de imágenes satelitales, tanto ópticas como de radar, se realizó una clasificación supervisada del área de estudio, para identificar el uso de suelo, además de segmentar la franja costera de acuerdo con su morfología. Aplicando herramientas informáticas como los paquetes CoastSAT y DSAS, se determinaron las tasas anuales de erosión y/o acreción para toda la zona costera de la isla. Fue necesario sectorizar la isla, ya que la dinámica costera muestra un comportamiento diferencial alrededor de ella, los cuales han sido relacionados con los tipos de corrientes con los cuales está influenciada la Isla, i.e. al Norte y Este principalmente por corrientes de marea, y al Oeste por corrientes litorales. Así, los sectores Norte y Este de la Isla, tienen una tendencia a la acreción en el rango promedio de 1,8 a 5,8 m/año, respectivamente. Mientras que la zona central del lado Oeste, donde hay mayor influencia del oleaje, tiene una tendencia a la erosión con una tasa promedio entre -2.5 y -1,73 m/año. Los resultados obtenidos, son un aporte importante comprensión de la dinámica sedimentaria alrededor de la isla, así como para el manejo sostenible de los diferentes ambientes ecosistémicos y las actividades antropogénicas que se desarrollan en la zona marino-costera de Isla Puná, en donde pueden implementarse en las zonas erosivas algunas medidas de prevención y mitigación como soluciones basadas en la naturaleza.

**Palabras clave:** SIG, erosión, acreción, Delft 3D, refracción.

**Abstract:** This study presents the results obtained from the analysis of the coastal dynamics of Puná Island, located in the central area of the Gulf of Guayaquil. This study was carried out through the processing of satellite images, the application of Geographic Information Systems (GIS), as well as wave modeling platforms (Delft 3D). Based on satellite images, both optical and radar, a supervised classification of the study area was carried out to identify land use, in addition to segmenting the coastal

strip according to its morphology. Using computer tools such as CoastSAT and DSAS packages, annual erosion and/or accretion rates were determined for the entire coastal zone of the island. It was necessary to sectorize the island, since the coastal dynamics show a differential behavior around it, which have been related to the types of currents with which the island is influenced, i.e., to the north and east mainly by tidal currents, and to the west by littoral currents. Thus, the northern and eastern sectors of the island tend to accretion in the average range of 1.8 to 5.8 m/year, respectively. While the central zone on the west side, where there is greater influence of waves, tends to erosion with an average rate between -2.5 and -1.73 m/year. The results obtained are an important contribution to the understanding of the sediment dynamics around the island, as well as for the sustainable management of the different ecosystemic environments and the anthropogenic activities that are developed in the marine-coastal zone of Isla Puná, where some prevention and mitigation measures can be implemented in the erosive zones as nature-based solutions.

**Keywords:** GIS, erosion, accretion, Delft 3D, refraction.

## Introducción

Las zonas costeras se ven afectadas por procesos naturales, tales como los vientos, las mareas y el oleaje, así como también por actividades impulsadas por la intervención humana (i.e. asentamientos de poblaciones, construcciones turísticas o portuarias, camaroneras, operaciones de dragado) entre otras (Solomon & Forbes, 1999). Tanto los procesos naturales como las actividades antropogénicas tienen una incidencia directa en el balance sedimentario (i.e. transporte, depositación y erosión de sedimentos) (Cendrero et al., 2006).

En la actualidad, conociendo que existe un incremento del nivel del mar (incremento del nivel eustático) (Mathew et al., 2020) el estudio de las zonas costeras es de gran interés para prevenir o mitigar el riesgo, en el frente litoral, debido a actividades antropogénicas (Xu et al., 2016).

Considerando que Ecuador se localiza en un margen activo, de subducción de placas tectónicas, existen zonas con tendencia al levantamiento y otras con tendencia a la subsidencia (Blanco-Chao et al., 2014; Pedoja et al., 2006), dando como resultado costas bajas y altas, lo cual implica que la afectación debida al incremento del nivel del mar no es similar en todo el borde costero (Ayo#n & Zapata, 1988).

La Isla Puná representa uno de los ecosistemas más importantes de la costa ecuatoriana, delimitando al borde externo del delta-estuario del río Guayas (Benites Acosta, 1975). El presente trabajo de investigación busca evaluar la dinámica costera en Puná para discutirla, de manera general, con los procesos de erosión y acreción (Saltos-Andrade et al., 2020), que intervienen en los alrededores de la isla, para lo cual se utilizaron herramientas que van desde códigos desarrollados en algunos lenguajes de programación, aplicados en plataformas como Jupyter, que permiten analizar una base de datos extraídos a partir de imágenes de libre acceso como Earth Explorer del USGS y Copernicus Open Access Hub (Nativí-Merchán et al., 2021; Saltos-Andrade et al., 2020).

Los resultados de este estudio brindan un aporte importante al conocimiento de la dinámica costera en la zona del Golfo de Guayaquil, particularmente en la Isla Puná, y puede dar paso a múltiples estudios futuros que mejoren la resolución de los resultados aquí obtenidos.

## Área de estudio

La Isla Puná se localiza en el Golfo de Guayaquil que políticamente pertenece al cantón Guayaquil en la provincia del Guayas, Ecuador. Fue constituida como Parroquia el 13 de octubre de 1845 y declarada área protegida en el 2009, ya que está rodeada de pequeñas lagunas, marismas y manglares. Es reconocida como la isla más grande del Golfo, al poseer una extensión de aproximadamente 920 km., que comienza casi en el centro del Golfo e incorpora al Canal del Morro, de 4 km de ancho, en el borde Oeste, y al Canal de Jambelí, con un ancho entre 12 y 30 km, en el lado Este de la isla (Hamilton, 2020), ambos extendiéndose hacia el Océano Pacífico.

La isla es una zona muy rica en biodiversidad y es considerada como reserva ecológica por su gran variedad de avifauna (Empresa Pública Municipal de Turismo, 2020). La isla posee bosques de manglares, de los cuales el más grande está ubicado al suroeste, siendo un sistema estuarino que se extiende 15 km al interior de la isla desde el borde litoral frente al Canal de Jambelí, las mismas que actualmente han sido reemplazadas por camaroneras construidas desde la década de los años 80. Los bosques de manglares del norte están ubicados a lo largo de la costa y en la desembocadura de un puñado de ríos pequeños (Hamilton, 2020).

La topografía de la isla es producto de las acumulaciones de material sedimentario sobre un núcleo más antiguo de rocas volcánicas (Empresa Pública Municipal de Turismo, 2020). Su evolución geológica estaría ligada al movimiento transcurrerte del borde Sur del Bloque Norandino (Dumont et al., 2005), caracterizado por ser suave y con terrazas amplias conformadas por tablazos que varían desde los 0 a 80 m.s.n.m. (Cabrera & Romero, 2011). En el extremo noreste y suroeste, se localiza la Cordillera de Zambapala, seguida del cerro Yanzún, Ramón y Campo Alegre con una elevación de 101, 59 y 29 metros respectivamente, por lo que tiene acantilados de relativa suavidad con baja presencia de playas cuya longitud transversal no sobrepasa los 100 m en marea baja (Montalvo Puma, 2014).

Los sedimentos presentes en la zona tienden a ser bastante gruesos a lo largo del río Guayas mientras que los sedimentos más finos se localizan en el lado noroeste del Golfo y la Isla cruzando el canal del Morro (Barrera Crespo, 2016)

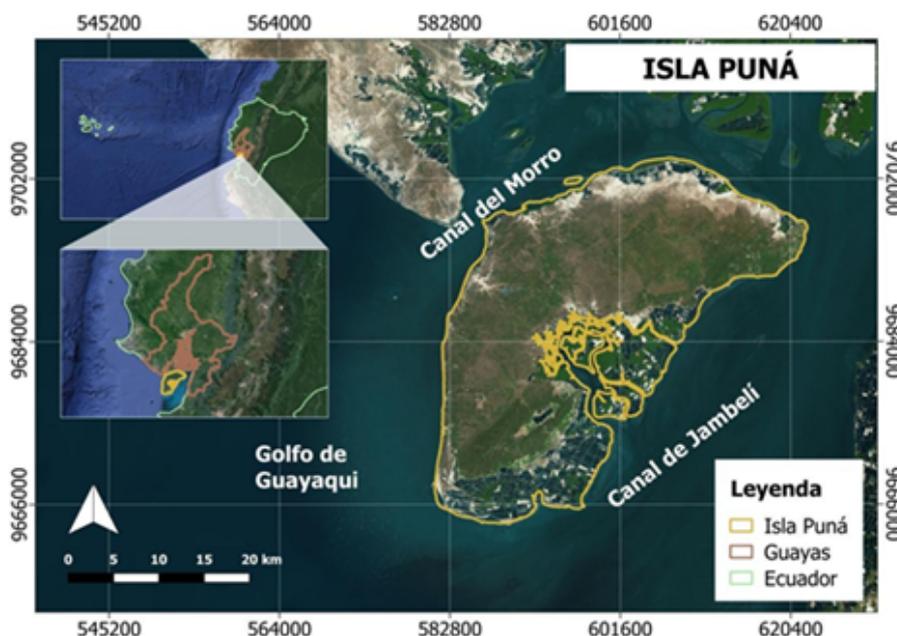


Figura 1

Study area: Puná Island. Image taken from Google Maps.

Las condiciones ambientales del área se ven influenciadas por la presencia de la corriente fría de Humboldt, dándole un clima tropical seco que entra en la categoría climática de Köppen-Geiger, ecuatorial y seca en invierno con precipitaciones limitadas y con un periodo de verano seco que dura entre 8 y 10 meses. Además, se considera que el clima es tropical con exuberante vegetación (Cruz-Orozco, 1978). Durante los meses de mayo a diciembre la isla experimenta poca lluvia, pero también tiene muy pocos días despejados. En cuanto a su temperatura ambiente, esta alcanza promedios diarios con valores alrededor de los 24,5 °C a finales de julio, y temperaturas máximas promedio de poco más de 27,1 °C a principios de abril. Por otra parte, la temperatura del mar varía entre 24,5°C y 26°C durante los meses de verano e invierno respectivamente, esto en base a mediciones tomadas en el canal de Jambelí (Hamilton, 2020).

Las mareas que se registran en la zona son de tipo semidiurnas irregulares (Alvarez & Abraham, 2020). Este tipo de mareas indican la existencia de dos pleamares y dos bajamares de manera diaria. De acuerdo con el estudio titulado: “Bosques de manglares y acuicultura” realizado por (Hamilton, 2020) la amplitud de las mareas en la Isla es de 1.8 m, lo cual es menor que el rango de mareas que se presentan en la ciudad de Guayaquil (Chavarria V., 1988). Donde se ha registrado una altura de marea de 3.3 m (Cruz-Orozco, 1978).

La Isla tiene influencia de olas transportadas generalmente desde el suroeste de ésta (Córdova Rugel & Menoscal Piana, 2020; Vargas Romero, 2022) modelando su costa rocosa (Ayoñ & Zapata, 1988), además el sistema de corrientes marinas que influyen la hidrodinámica en la Isla Puná es complejo pues se encuentra conformado por la Contracorriente Ecuatorial, y la Corriente Costanera Ecuatoriana, misma que altera su trayectoria hacia el norte a la altura de la desembocadura del Golfo de Guayaquil debido a la influencia de las mareas presentes en tal sistema estuarino (Allauca, 1990).

## Datos y Métodos

### *Clasificación del uso del suelo*

Se realizó la clasificación del uso del suelo por medio de una imagen satelital de Landsat 8, descargada desde la plataforma USGS Earth Explorer con fecha del 02/08/2020. La clasificación se realizó usando la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (Congedo, 2021) en el programa de QGIS. A partir de ello se identificaron áreas de entrenamiento considerando las zonas con el mismo valor de píxel, dividiéndose en 7 categorías de clasificación, obtenidas de un estudio realizado por la universidad de Azuay y el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (Alianza Jatun Sacha - CDC Ecuador, 2010), entre las cuales se consideraron: camaroneras, manglar, bosque natural, vegetación arbustiva, suelo descubierto, material sedimentario y nubes.

Para hacer una comparación con otras fuentes de datos satelitales, donde no hubiere influencia de las nubes, se consideró analizar también imágenes de radar, caracterizadas por su disponibilidad de ser obtenidas tanto en el día como en la noche, debido a su capacidad de usar su propia fuente de energía. Para lo cual se descargaron 2 imágenes Sentinel 1 con fechas del 06/11/2021 y 30/11/2021 de la plataforma Copernicus Open Access Hub. El procesamiento de la imagen radar requirió hacer un stack para poder trabajar con el programa de SNAP (Braun, 2020).

### *Identificación de pendientes por zonas*

A partir de los resultados obtenidos por medio de la clasificación se procedió a determinar las pendientes en las áreas costeras correspondientes a playa o material sedimentario. El primer paso fue determinar las pendientes, para lo cual se hizo uso de cartas náuticas del INOCAR a escala 1:100.000 (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada) (Tabla 4). El procesamiento de las cartas náuticas se realizó en QGIS, y comprendió: la georreferenciación, vectorización de las profundidades y veriles registrados, y la interpolación mediante la herramienta que considera la ponderación de distancia inversa de dichos datos (IDW).

Para la información topográfica de la Isla, se utilizaron los datos de la plataforma de MAGAP(<http://geoportal.agricultura.gob.ec/>), con los cuales se obtuvo un modelo digital del terreno (MDT), que fue compilada junto a la información batimétrica para los análisis posteriores (Figura 2). A partir del MDT de topografía y batimetría, se determinaron las pendientes más bajas calculadas desde la berma de la playa hasta la profundidad de cierre. La profundidad de cierre se consideró como la profundidad localizada en forma perpendicular a la línea de playa, donde el sedimento no se mueve significativamente debido a procesos cercanos a la costa (Peña Olivas et al., 2004). Para ello se empleó la siguiente ecuación definida por (Hallermeier, 1978):

$$h_{in} = 2.28H_s - 68.5 \left( \frac{H_s^2}{\alpha T^2} \right)$$

Donde el término  $h_{in}$  es la profundidad de cierre estimada a partir del cálculo analítico utilizando la teoría lineal de olas,  $H_s$  es la altura de ola significativa,  $T$  es el período de ola asociado a  $H_s$ , y  $g$  es la constante gravitacional. Con esta ecuación se estimó que la profundidad de cierre estaba ubicada en los 6 metros de profundidad aproximadamente para la zona de estudio.

A continuación (Figura 2) se muestra el mapa batimétrico y topográfico para la isla Puná. Los valores de profundidad máximos superan los 11 metros y se presentan en el extremo noroeste de la Isla a la altura de la entrada al Canal del Morro.

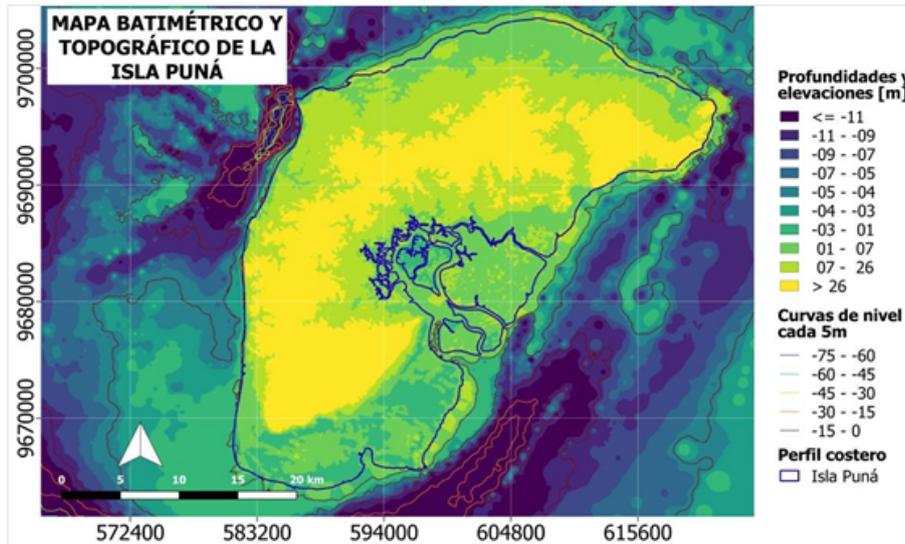


figura 2

Digital elevation model of the terrestrial and marine areas of Puná island. Source: Topography (MAGAP, 2018) Bathymetry (INOCAR, 2010, 2017, 2017, 2018).

Los datos de altura significativa efectiva y período asociado, utilizados en la ecuación mostrada anteriormente, se obtuvieron de WAVEWATCH III para una data histórica desde el año 2003 hasta el año 2018.

Una vez determinadas las pendientes de cada tramo se procedió a establecer rangos mareales para cada caso, por ejemplo, se determinó que la pendiente más baja para la Zona Oeste fue de 0.0442 y el tamaño de píxel más pequeño de las imágenes satelitales fue de 10 metros estableciendo por tanto un rango de mareas de 0,442 metros, así se establecieron los límites de marea que para esta zona variaban entre 1,39 y 1,83 metros, por tanto, se escogieron solo las imágenes satelitales que estuvieran dentro de este rango de mareas según el portal web del INOCAR ([www.inocar.mil.ec](http://www.inocar.mil.ec)).

El mismo procedimiento se llevó a cabo para la zona norte playa con límites diferentes, de esta manera se asegura que para cada zona se trabaje con imágenes que estén alineadas en cuanto a mareas para obtener los menores errores posibles. Algo importante a mencionar es que cada zona posee límites y rangos diferentes, lo ideal hubiera sido tener los mismos límites en cada zona de forma que se pueda realizar un análisis integrado de todas las áreas, sin embargo, debido a las

diferencias entre las pendientes y a la disponibilidad de las imágenes satelitales, que para las fechas escogidas presentaban mucha nubosidad o no abarcaban el área de estudio, se tuvo que realizar cada zona por separado ya que las imágenes no se encuentran dentro del mismo rango.

#### *Categorización de la línea de costa*

Para categorizar la costa de una playa se pueden utilizar una serie de variables importantes como son: su geomorfología, pendiente, mareas, variación del nivel del mar, altura de ola, litología y la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo, tal como lo han propuesto (Gornitz, 1990), (Kokot et al., 2004) y (Codignotto, 2005) a fin de determinar un índice de vulnerabilidad costera (IVC o CVI en inglés). Sin embargo, debido a que este estudio se concentra en cuantificar sólo una de las variables del IVC, i.e. la dinámica de la línea de costa, la categorización de la playa se realiza según su tasa de erosión tal y como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
Clasificación de las variables del índice de vulnerabilidad costera Fuente Gornitz 1990

Variable	Very low	Low	Average	High	Very high
Horizontal shoreline displacement (m/year)	≥ 2	1 to 2	-1.0 to 1.0	-1.1 to -2	<-2

#### *Tasas de erosión y acreción*

Se necesitó emplear programas como Anaconda y el paquete CoastSAT (Vos et al., 2019) para descargar imágenes satelitales y extraer la línea de costa del área de estudio. Sin embargo, para su identificación se segmentó la Isla Puná en tramos considerando que la Isla presenta tres tipos de morfología costera, i.e. playas, zonas con manglares y acantilados (Ayoñ & Zapata, 1988). Por lo que, la segmentación general consideró los cuatro lados de la Isla Puná, i.e. zonas: Norte, Sur, Este y Oeste. Luego a partir de los resultados del análisis de las imágenes satelitales, mediante clasificación supervisada, cada zona fue subdivida según su morfología, i.e. Zona Norte playa. Las tasas de erosión y acreción fueron calculadas para: Zona Norte, Zona Norte Playa, Zona Este y los 3 tramos de Zona Oeste. Debido a la complejidad de la Zona Sur no se consideró el cálculo del desplazamiento de la línea de costa.

Por otra parte, para obtener imágenes satelitales adecuadas de los diferentes sectores de la zona de estudio, fue necesario realizar una búsqueda de imágenes claras o sin mucha intervención de nubosidad, mismas que se muestran en la Tabla 2. Es necesario revisar la sección de resultados para la sectorización del borde costero (Figura 4), donde se explica con mayor detalle los criterios con los cuales fue realizada la clasificación de los tramos que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

Imágenes satelitales utilizadas para el presente estudio según las Zonas

<b>North Zone</b>	
Landsat 7: 06/06/2003	
Landsat 8: 05/12/2013, 03/05/2016, 02/08/2020	
<b>North Beach Zone</b>	
Landsat 7: 17/02/2003	
Landsat 8: 05/12/2013, 10/24/2013, 10/24/2015, 05/19/2016, 03/14/2021.	
<b>East Zone</b>	
Landsat 7: 06/06/2003	
Landsat 8: 05/12/2013, 03/05/2016, 02/08/2020	
<b>West Zone</b>	
<b>Section 1</b>	Landsat 7: 03/21/2003
	Landsat 8: 12/21/2013, 12/24/2013, 12/24/2014, 10/24/2015, 05/06/2017, 10/08/2021, Sentinel 2: 24/01/2022
<b>Section 2</b>	Landsat 7: 17/02/2003
	Landsat 8: 12/21/2013, 24/12/2014, 11/11/2016, 06/05/2017, 09/01/2021.
<b>Section 3</b>	Landsat 7: 17/02/2003
	Landsat 8: 22/03/2013, 30/05/2014, 14/03/2021

### *Refracción del oleaje*

El cambio de la dirección en la propagación de las olas a diferentes profundidades, por ejemplo, de aguas profundas a aguas someras, generan el llamado concepto de refracción; proceso que se ve afectado debido a la topografía del fondo oceánico e influye además en la altura de las olas, su fuerza y velocidad al momento de romper.

Con datos desde enero de 1997 hasta mayo del 2019, obtenidos desde WAVEWATCH III, se escogieron 3 escenarios que describirán el comportamiento del oleaje en condiciones normales (temporada seca y húmeda del año 2017) (Tabla 3), además de un caso extremo, correspondiente al que tuvo ocurrencia en el año 2015 analizando un día del mes de octubre debido a que según el Servicio Nacional Climatológico de los Estados Unidos (NOAA, 2022) fue en este mes en el que se presentó el índice ONI más elevado para el período analizado, mencionando que el índice ONI representa la media móvil trimestral de las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (NOAA, 2022). Los datos se obtuvieron en formato de tabla bi-variada desde Matlab para las respectivas fechas filtradas, que posteriormente serían usadas como condiciones de borde en el programa DELFT3D 4.04.02 módulo WAVE

**Tabla 3**  
Condiciones de oleaje y viento para tres casos de estudio de refracción

<b>First case: Wet season</b> Year: 2017 Direction: 220° Height: 1.6m Period: 13.5 Wind direction: 255° Wind direction: 255° Wind direction: 255° Wind direction: 255° Wind direction: 255° Wind direction: 255 Wind speed: 4.35m/s
<b>Second case: Dry season</b> Year: 2017 Direction: 220° Height: 1.95m Period: 13.5 Wind direction: 241.67° Wind speed: 5.92m/s
<b>Third case: Extreme event</b> Year: 2015 Direction: 315° Height: 2.5m Period: 15 Wind direction: 230° Wind direction: 230° Wind direction: 230° Wind direction: 230° Wind direction: 230° Wind direction: 230 Wind speed: 6.35 m/s

Con ello, de acuerdo con la Tabla 3 que resume los datos obtenidos de la tabla bi-variada de Matlab, la temporada húmeda, correspondiente a los meses de diciembre a mayo, presentaría registros similares en dirección y periodo de la ola con relación a la temporada seca, correspondiente a los meses de junio a noviembre. Contrario al tercer caso, de evento extremo, en donde la magnitud de las variables que describen las condiciones del oleaje es mayor, similar a la velocidad del viento.

Bajo este concepto, en la siguiente tabla se muestra un compendio de los metadatos de la información utilizada (Tabla 4).

**Tabla 4**  
Matriz general de datos para el estudio

Variables	Information	Features	Source	Author		
Ranking	Satellite images	B1-B7	1:30	Landsat 8	USGS	
		B8	02/08/2020			1:15
		B9				1:30
Pending	Radar image	C-Band	06/11/2021	5x20m	Sentinel 1	Sentinel 1
			30/11/2021			USGS
Tides	Bathymetry	IOA 107	2018	1:100 000	INOCAR	INOCAR
		IOA 108	2017	1:100 000		
		IOA 1082	2010	1:50 000		
Shoreline Change	Topography	Guayaquil	26/05/2011	1:4	SIGTIERRAS	MAGAP
Refraction	Tide Tables	Puná Island	2003-2021	1:6	INOCAR	INOCAR
Shoreline Change	Satellite images	B1-B6	1:30	Google Earth Engine	Landsat 7 Landsat 8 Sentinel 2	
		B8	2003 - 2022			1:15
		B1				1:60
Refraction	Swell data	B2-B4	1:10			
Refraction	Winds	Puná Island	2015/2017	1:8	WAVEWATCH III	NOAA
Refraction	Winds	Puná Island	2015/2017	1:55 660	EARTH NULLSCHOOL	NATURAL EARTH

## Resultados

### Clasificación supervisada

Usando la herramienta *Informe de valores únicos de capa ráster* desde el programa QGIS, se obtienen los siguientes resultados (Tabla 5) para las zonas identificadas tanto para la imagen satelital como la imagen de radar.

**Tabla 5**  
Resultados de Clasificación Supervisada para Landsat 8 y Sentinel 1

Zone	Kilometers [km <sup>2</sup> ]		Percentage [%]	
	Landast 8	Sentinel 2	Landast 8	Sentinel 1
Shrimp trawlers	99.8	56.2	11.1	6.3
Mangrove	91.3	160.1	10.2	17.8
Natural forest	179.2	193.7	19.9	21.6
Shrub vegetation	348.8	286.6	38.8	31.9
Uncovered floor	79.9	88.4	8.9	9.8
Sedimentary material	90.1	113.5	10.0	12.6
Clouds	10.0	-	1.1	-
<b>Total</b>	<b>899.1</b>	<b>898.5</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Indicando, que el área en kilómetros y porcentaje total de la zona para las nubes sólo corresponderá a la imagen satelital de Landsat 8 que es la que se muestra en la Figura 3 a continuación.

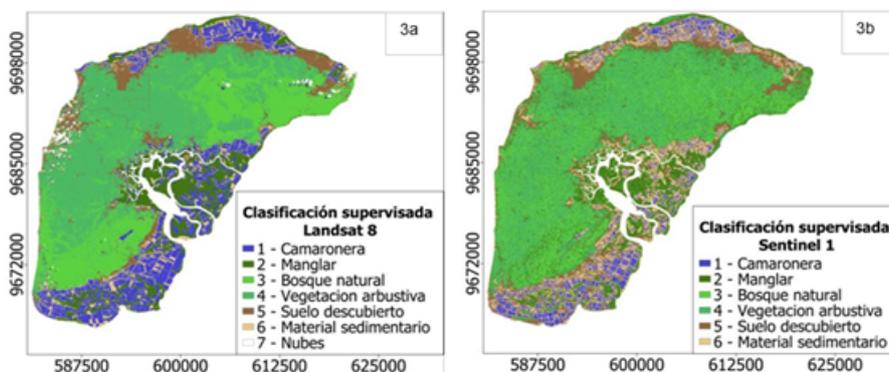


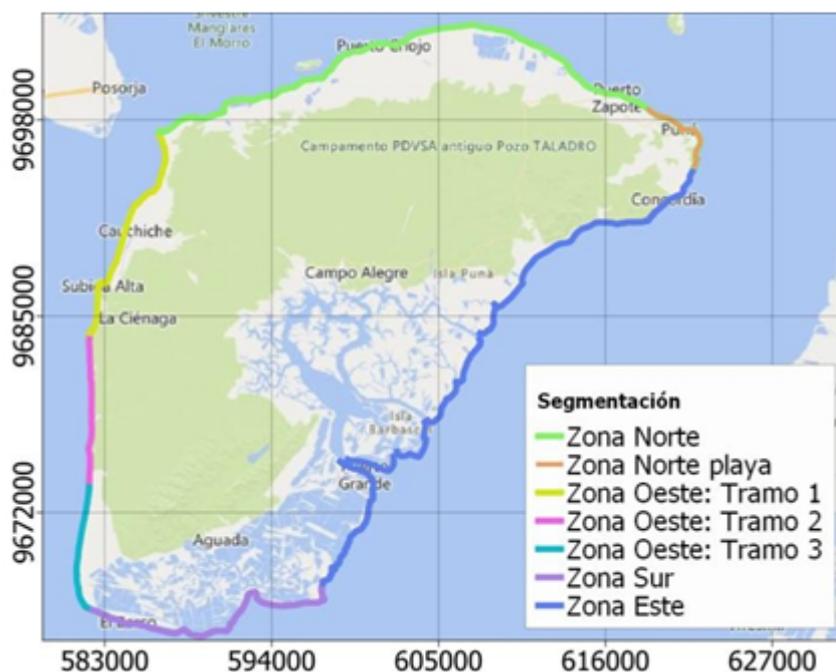
Figure 3a. Supervised classification of Landsat 8 image. 3b Supervised classification of Sentinel 1 image.

### figura 3

3a. Supervised classification of Landsat 8 image. Figure 3b. Supervised classification of Sentinel 1 image.

Siguiendo los resultados de la clasificación del uso del suelo para la isla (Figura 3a -3b) y otros criterios como la observación de imágenes satelitales, se obtuvo una clasificación del borde costero (Figura 4). De este modo la zona oeste se dividió en 3 tramos: Oeste 1, Oeste 2 y Oeste 3, mismos que se identificaron como zonas de playa.

Se determinó también que el tramo Este corresponde mayormente a manglares. La zona norte a pesar de tener áreas con suelo descubierto, pequeños acantilados y zonas de camaronerías fue clasificada en sus bordes mayormente como manglar, exceptuando una pequeña área ubicada al noreste identificada como zona de playa. El sur de la Isla es un caso particular, pues tal como se observa (Figura 3a-3b), está compuesto por una serie de elementos como camaronerías, manglares, y zonas de bajos, por tanto, la identificación del borde costero resultó compleja, ya que no se observó una continuidad para todo el tramo. En la Figura 4 se puede apreciar lo descrito en el párrafo anterior, de donde se dividió al borde costero de Puná en 7 tramos diferentes para su correspondiente análisis individual.



**Figura 4**  
Sectorization of the coastal border of Puná Island.

*Tasas de erosión y acreción*

Acorde con la metodología descrita para la identificación de las pendientes se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 6). En la Tabla 6 se muestran las pendientes calculadas para los tramos identificados como áreas costeras de playas con material sedimentario. Las pendientes más bajas fueron halladas al suroeste con valores dentro del rango de los 0,0002 a 0,0005, por otro lado, las pendientes mayores se encontraron al norte con valores de hasta 0,05. En general las pendientes descienden a medida que se aproximan al sur de la isla.

**Tabla 6**  
Pendientes de playa en la Isla Puná

<b>Section</b>	<b>Slope found</b>
<b>West 1</b>	0,004 - 0,05
<b>West 2</b>	0,0014 - 0,03
<b>West 3</b>	0,0002 - 0,0005
<b>North Beach</b>	0,0076 - 0,0112

La batimetría (Figura 2) también muestra la presencia de zonas más someras al sur del área de estudio. Para los tramos costeros considerados como manglar (Figura 4) (i.e. Tramo Este y Tramo Norte) no se realizó una discretización por pendientes debido a que la influencia de las mareas en dichos tramos no

representó un problema para la obtención de las tasas de erosión/acreción de los manglares.

Las tasas promedio y máximas encontradas muestran los resultados resumidos en la Tabla 7. Los valores más grandes de erosión se identificaron en el tramo oeste 3 al suroeste de la isla los cuales alcanzaron un máximo de -57 m/año, sin embargo, resulta más adecuado determinar los valores netos de erosión y acreción (NSM) desde el 2003 al 2021 que corresponden a un retroceso de línea de playa de 980 metros, en el tramo norte, y un avance de 373 metros aproximadamente, en el tramo sur. Este avance y retroceso neto de la línea de playa se puede observar claramente en las figuras 6 y 7.

Los valores de erosión más bajos fueron reportados en el tramo de playa comprendido para la zona noreste de la isla con tasas máximas de hasta -1.32 m/año. Los tramos con un avance significativo en su línea de costa se registraron en el tramo este para el sector “La Esperanza” (Figura 8) con tasas máximas que alcanzaron valores de 29 metros por año, así como también el tramo oeste 3 presentó valores grandes de acreción para el período estudiado.

**Tabla 7**

Tasas anuales de erosión/acreción calculadas a partir de la regresión lineal ponderada de la línea de costa por medio de Dsas en la Isla Puná.

Zone	Rate found [m/year].				Transects		
	Maximum erosion	Maximum crediting	Average erosion	Average credit	% of transects with erosion	% of transects with accretion	
Beach areas	West Section 1	-6.67	6.02	-2.50	2.21	46.64	53.35
	West Section 2	-4.04	0.29	-1.73	0.15	95.74	4.25
	West Section 3	-57.62	23.17	-21.95	6.03	28.57	71.42
Mangrove areas	North Beach Section	-1.32	1.96	-0.46	0.46	43.15	56.84
	Northern Section	-3.59	12.17	-0.72	1.88	47.80	52.19
	East Section	-11.5	29.73	-0.96	5.86	15.31	84.69

Considerando los valores promedios obtenidos (Tabla 7) se procedió a clasificar la erosión según lo propuesto anteriormente (Tabla 1). En la Tabla 8 se expone dicha categorización para cada área estudiada.

Tabla 8

Categorización de la línea de costa en la Isla Puná.

Zone	Categorization
Tamo West 1	-2.50 m/year = Very high
Tamo West 2	-1.73 m/year = High
Tamo West 3	-21.85 m/year = Very high
Tamo Norte Beach	-0.46 m/year = Average
Tamo North	-0.72 m/year = Average
Tamo East	-0.96 m/year = Average

En concordancia con los resultados de categorización (Tabla 8) de forma general se tiene que los tramos correspondientes a los bordes de manglares presentan tasas de erosión estables no menores a -1 metro por año. Por otra parte, las zonas de playa ubicadas al oeste fueron clasificadas como zonas con erosión muy alta, los valores máximos de erosión para el tramo oeste 1 se detectaron en la zona costera que corresponde a la comunidad de Subida Alta alcanzando valores de casi -7 metros por año en el retroceso en su línea de costa.

*Graphical representation of erosion/accretion rates in beach areas.*

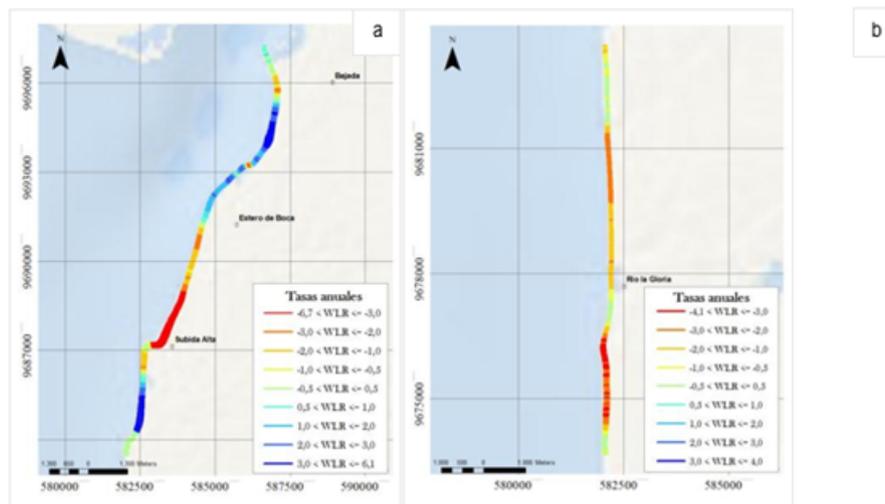


figura 5

Annual rates for the coastal edge of the West 1 (a) and West 2 (b) zones of Puná Island.

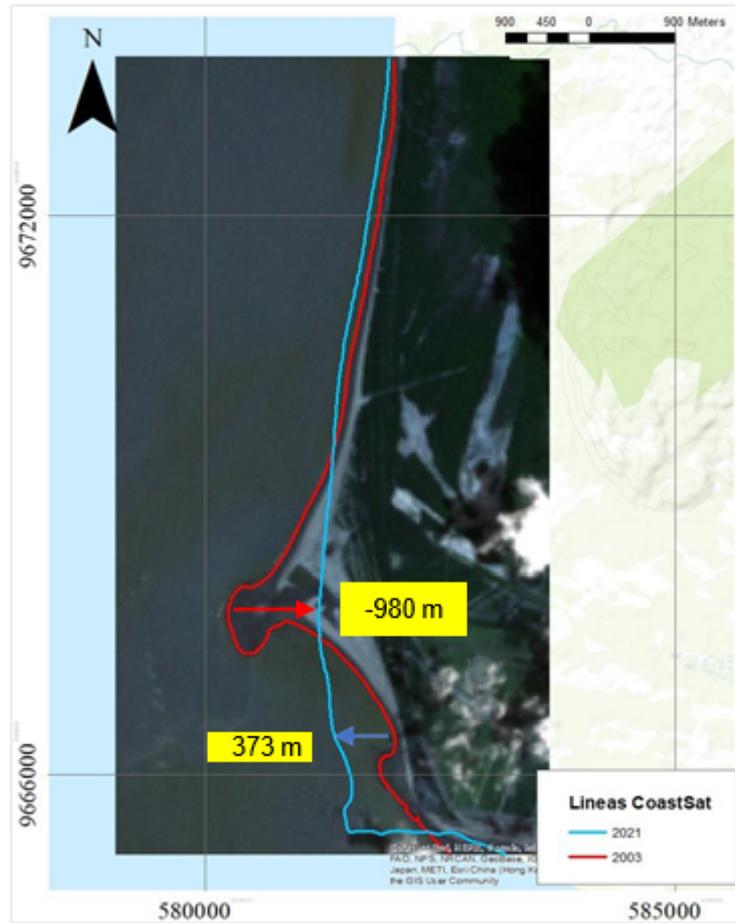
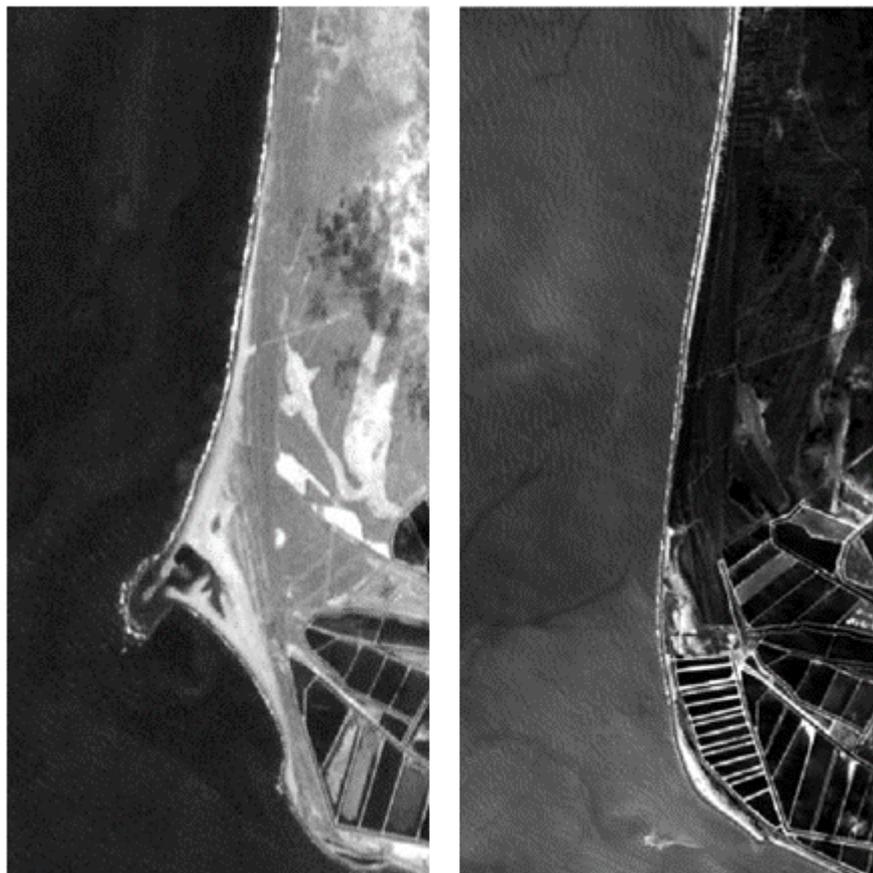


figura 6

Variation over time of the shoreline due to erosion and accretion processes for western section 3.



**figura 7**

Landsat 7-2003 (left) and Sentinel 2-2019 (right) satellite images for the West 3 section of Puná Island showing the change in the coastline. Source: Landsat, 2003; Sentinel, 2019.

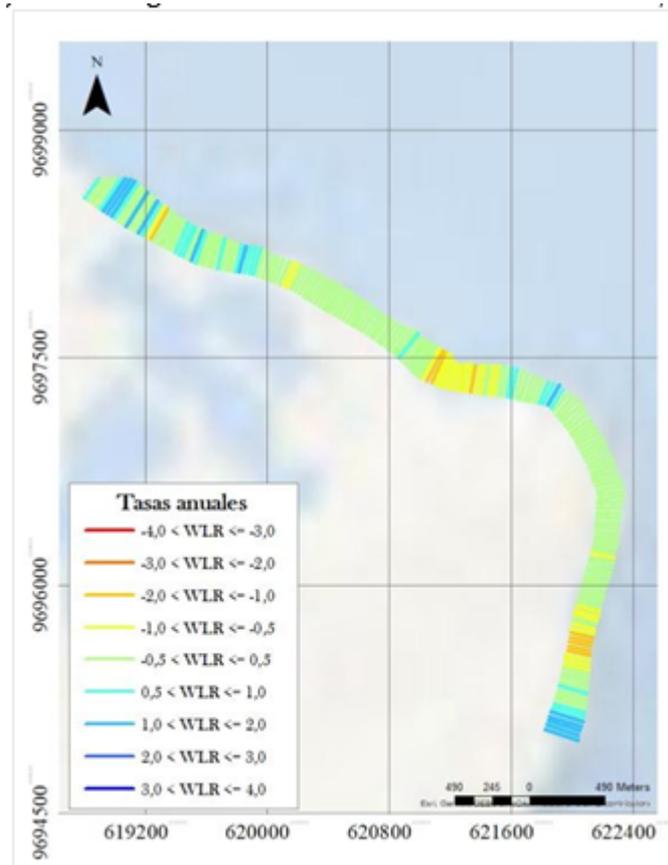


figura 8

Annual rates for the coastal edge of the North Beach section of Puná Island.

*Graphical representation of erosion/accretion rates in mangrove areas*

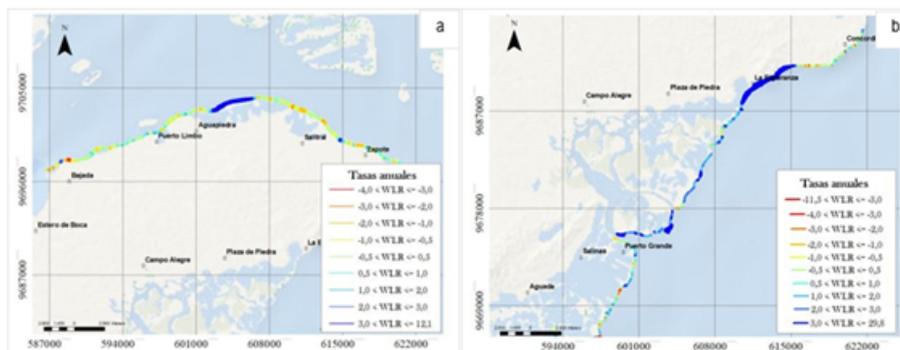


Figure 9 Annual erosion and accretion rates for the North Section (a) and East Section (b) of Puná Island.

figura 9

Annual erosion and accretion rates for the North Section (a) and East Section (b) of Puná Island.

### Refracción

El modelo (Figura 10) muestra el comportamiento de las olas a lo largo de la franja costera de la isla (lado Oeste), y del estuario del río Guayas (lado Este). Los resultados denotan que, en condiciones normales, considerando una

dirección de  $220^\circ$ , la altura significativa es de 1.6m en temporada húmeda y 1.95m en temporada seca, además de un periodo de 13.5 segundos con diferentes condiciones de viento (Tabla 3). Los vectores del modelo de refracción de olas muestran un arribo ortogonal a la zona costera en el Sector Oeste de la Isla, donde se ubica la población de Subida Alta, para luego derivar hacia el Noreste, pero en el sector Noroeste, desde Estero de Boca hacia el Norte el arribo del oleaje se muestra sub-paralelo a la costa.

En los sectores Norte y Este de la Isla, a lo largo de los canales del Morro (Zona Norte), y Jambelí (Zona Este y Sur), el oleaje se muestra también sub- paralelo a la línea de costa, prácticamente siguiendo la morfología principal de ambos canales, seguramente influenciado por el caudal y las corrientes de marea que dominan el sector.

Por otra parte, bajo condiciones extremas, los vectores de refracción de olas en el año 2015 provienen predominantemente desde el Noroeste, tras considerarse una dirección de  $315^\circ$  (Tabla 3) en el modelo, cuyo sentido cambia al acercarse a la costa, encontrándose vectores de mayor magnitud sub-paralelos a la costa desde Río la Gloria hacia el Norte, es decir que hay un cambio de tendencia de Noroeste a Suroeste, contrario a las gráficas de refracción del oleaje (Figura 10) generadas para condiciones normales, cuya tendencia predominante es proveniente del Suroeste.

Así también, en un plano general, el modelo presenta magnitudes de altura significativa de ola mayor para la condición extrema (octubre 2015, Figura 10) en comparación a las condiciones normales (2017, Figura 10). Sin embargo, el modelo muestra que la temporada seca difiere de la húmeda en condición normal, en especial en la zona del Sector Oeste 3, que, a pesar de tener un arribo nulo de oleaje, hay vectores de pequeña magnitud que se acercan a la costa.

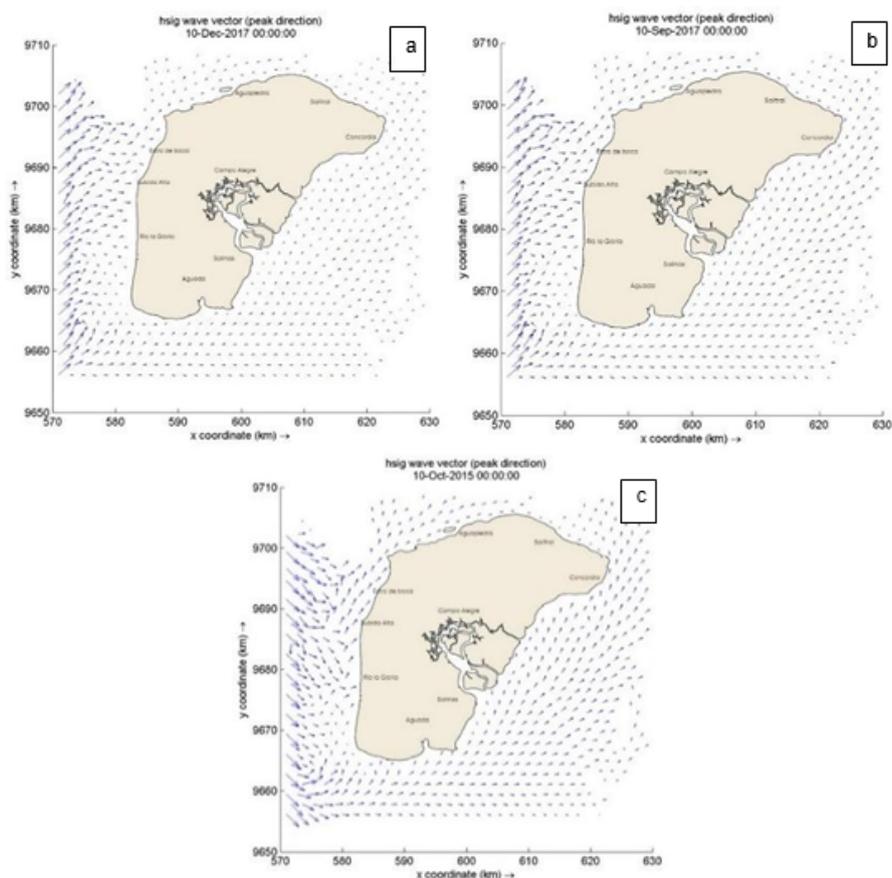


Figure 10. Refraction in wet season (a), dry season (b) (2017) and for an extreme case (c) (2015).

### figura 10

Refraction in wet season (a), dry season (b) (2017) and for an extreme case (c) (2015).

## Discusión

La Isla Puná al encontrarse en la zona central del Golfo de Guayaquil, donde se encuentra influenciada por procesos costeros diferenciales, i.e.: corrientes de marea en su lado Oriental y Septentrional, y corrientes costeras con olas en su lado Occidental, presenta una dinámica de línea de costa muy disímil. Adicionalmente, considerando sus características geomorfológicas, así como el tipo de cobertura vegetal que posee la isla, sugiere que el análisis de su evolución sedimentaria litoral sea evaluado considerando diferentes sectores.

La clasificación supervisada realizada utilizando imágenes ópticas y de radar, a pesar de la limitación de la resolución espacial, permitió realizar una categorización del borde costero, considerando su morfología, así como su uso del suelo y cobertura vegetal. La mayor cantidad de zona de manglar se encuentra en las zonas Norte y Este de la Isla, donde se tiene mayor influencia de las mareas. Sin embargo, son estas zonas, con la zona Sur de la Isla Puná, las que han tenido una gran intervención antropogénica por la construcción de camaroneras. De acuerdo con el análisis de variabilidad de línea de costa, las zonas Norte y Este se presentan estables, i.e. sin mayor variación en los procesos erosivos y acrecionarios, en el periodo de tiempo analizado.

Sin embargo, hay ciertos sectores de las zonas Norte y Este, donde se observan valores de acreción mayores a 3 m/año (Borde de color azul en Figuras, 9a y 9b). Esta acreción estaría siendo generada por los aportes sedimentarios hacia la zona externa del Golfo de Guayaquil (Barrera Crespo, 2016; Barrera Crespo et al., 2019) que se generan a través de los canales de El Morro y Jambelí, que constituyen los dos elementos morfológicos más destacables del delta-estuario del Guayas (Benites Acosta, 1975).

El tramo Oeste y parte del tramo Sur están siendo modificadas por corrientes costeras (Córdova Rugel & Menoscal Piana, 2020), generando un proceso erosivo importante (Figura 5), sobre todo en el sector de la comunidad de Subida Alta (Vargas Romero, 2022). Sin embargo, el sector de Oeste 3, hay un comportamiento diferente. Allí se identificaron pendientes muy bajas, cuyo orden alcanza un máximo de  $5 \times 10^{-4}$ , mientras que en los tramos Oeste 1 y Oeste 2 las pendientes tienen un valor máximo de  $5 \times 10^{-2}$ . Además, el particular caso del tramo Oeste 3 donde se presentan los valores netos máximos de erosión y acreción puede estar indicando la influencia de actividades antropogénicas en el área (i.e. rellenos hidráulicos, colocación de piscinas, etc.).

La altura significativa de la ola también decae notablemente en su arribo a la costa del tramo Oeste 3, con una dirección predominante de  $220^\circ$  en condiciones normales, y de  $315^\circ$  para un caso extremo (evento El Niño, por ejemplo).

Este cambio en el comportamiento de la dinámica costera y clima oceanográfico podría estar influenciado por el gran aporte sedimentario, que se genera por el Canal de Jambelí, que alcanza a depositarse en el tramo Oeste 3 (borde Suroccidental de la Isla Puná), donde incluso se están desarrollando zonas con manglares. Podría también tener algún grado de influencia la gran actividad antropogénica que se está desarrollando en ese sector, al haber generado infraestructuras para el desarrollo de actividades acuícolas, lo cual sería importante evaluar.

Los vectores obtenidos con los modelos de refracción muestran mayor dinámica y ortogonalidad en el lado Oeste de la Isla Puná, sobre todo en los Sectores 1 y 2, mientras que en los lados Norte y Este, los vectores se muestran sub-paralelos a la línea de costa, lo cual estarían en coherencia o correlación con los resultados de la dinámica litoral analizados en el presente proyecto. Es importante resaltar que, con los modelos de refracción obtenidos, para periodos de eventos extremos, tales como El Niño, la magnitud de los vectores de refracción muestra un incremento, lo cual podría variar el transporte sedimentario.

## Conclusiones

El presente estudio nos ha permitido evaluar algunas características físicas de la Isla Puná, así como su dinámica costera en relación con los procesos de refracción de oleaje, que existe en las diferentes zonas de la Isla. Las conclusiones principales que se obtuvieron en este estudio son:

La clasificación supervisada, mediante imagen satelital y de radar, hace una identificación muy aproximada en las áreas cubiertas por vegetación, específicamente de Vegetación arbustiva, Bosque natural y Manglar, con una diferencia mínima de 1.7% para el Bosque natural y una máxima de 7.6% en

la zona de Manglar; sin embargo, probablemente al ser imágenes tomadas de diferentes fechas (2020 para la imagen de Landsat 8 y 2021 para Sentinel 1), y bajo las características de cada una de estas las áreas cubiertas por camaroneras y manglar llegan a tener valores muy diferentes, puesto que en las imágenes satelitales se requiere de energía solar mientras que los radares emiten su propia fuente de energía.

Los bordes Norte y Este de la isla tienen una marcada tendencia a acrecer con el paso de tiempo con valores promedios de 1.88 y 5.86 m/año respectivamente, además de acreciones máximas como 12.17 m/año, para el Tramo Norte y 29.73 m/año, en el tramo Este, encontrando los mayores valores de acreción al este de la isla. Esta influencia podría estar relacionada a los aportes sedimentarios de la cuenca del Río Guayas hacia el Golfo de Guayaquil, a través de los canales de El Morro y Jambelí.

El borde Oeste de la isla Puná, en los Sectores 1 y 2, muestra una tendencia preferencial a la erosión, teniendo su zona más crítica en los alrededores de la población de Subida Alta, donde alcanza tasas de erosión superiores a 4 m/año. Así también, el Tramo Oeste 3 presentó valores máximos tanto de erosión como de acreción a lo largo de su extensión de línea de playa.

El estudio de refracción muestra una coherencia con la sectorización erosión/acreción obtenidos con los resultados de la dinámica costera, mostrando que el oleaje arriba perpendicularmente a la costa en el sector Oeste de la Isla, para luego derivar para el Noreste, mientras que en el resto de la isla el oleaje llega de manera sub-paralela, esto en épocas secas o lluviosas. En periodos de eventos extremos, como El Niño, la magnitud de los vectores de refracción se muestran un incremento, lo cual podría variar el transporte sedimentario.

Los resultados obtenidos en el presente estudio resultan de utilidad para la posterior toma de decisiones enfocadas en prevenir y/o mitigar los efectos negativos que pudiesen ocasionar los procesos erosivos a las poblaciones costeras de la isla Puná. Se recomienda considerar la implementación de soluciones ingenieriles basadas en la naturaleza, ya que estas son más amigables y se pueden adaptar mejor al sistema dinámico natural propio de la isla, se puede buscar aprovechar las zonas de manglares, las zonas de bajas pendientes y las flechas litorales que presumiblemente se encuentran en la zona oeste del área de estudio.

## Referencias

- Alianza Jatun Sacha - CDC Ecuador. (2010). *Cobertura vegetal y uso actual del suelo*. [http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/c-uso\\_de\\_suelo.doc](http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/c-uso_de_suelo.doc)
- Allauca, S. (1990). Presencia de la Corriente Costanera Ecuatoriana. *Acta Oceanográfica Del Pacífico*, 6(1), 10–17.
- Alvarez, S., & Abraham, J. (2020). *Caracterización costera de la zona de playa de la casa de prácticos de autoridad portuaria de Guayaquil (apg) en época seca, ubicado en data Posorja, provincia del Guayas* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.u.g.edu.ec/bitstream/redug/51542/1/BMAT-H 38-2020-Ing. CIVIL - SADAKA ALVAREZ JOSUE ABRAHAM.pdf>
- Ayo#, H., & Zapata, Bernardo. (1988). Grandes rasgos geomorfológicos de la costa ecuatoriana. In *Diagnóstico del sector pesquero y camaronero*.

- Barrera Crespo, P. D. (2016). *Delft3D Flexible Mesh modelling of the Guayas River and Estuary system in Ecuador* [National University of Singapore]. <http://repository.tudelft.nl/>.
- Barrera Crespo, P. D., Mosselman, E., Giardino, A., Becker, A., Ottevanger, W., Nabi, M., & Arias-Hidalgo, M. (2019). Sediment budget analysis of the Guayas River using a process-based model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2763–2778. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2763-2019>
- Benites Acosta, S. B. (1975). *Morfología y sedimentos de la plataforma continental del Golfo de Guayaquil* [Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)]. <https://dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/32475/1/D-1317.pdf>
- Blanco-Chao, R., Pedoja, K., Witt, C., Martinod, J., Husson, L., Regard, V., Audin, L., Nexer, M., Delcaillau, B., Saillard, M., Melnick, D., Dumont, J. F., Santana, E., Navarrete, E., Martillo, C., Pappalardo, M., Ayala, L., Araya, J. F., Feal-Pérez, A., ... Arozarena-Llopis, I. (2014). The rock coast of South and Central America. In *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis* (pp. 155–191). <https://doi.org/10.1144/M40.10>
- Braun, A. (2020). *Sentinel-1 Toolbox SAR-based landcover classification with Sentinel-1 GRD products SAR-based land cover classification*. October, 1–32. <https://skywatches.ch>
- Cabrera, E. J., & Romero, P. (2011). Estudio hidrogeológico de la Isla Puná (Ecuador).
- Cendrero, A., Remondo, J., Bonachea, J., Rivas, V., & Soto, J. (2006). Acción humana y procesos geológicos superficiales ¿qué le estamos haciendo a la faz de la tierra? *Cienc.Exact.Fis.Nat. (Esp)*, 100(1), 187–209.
- Chavarría V., J. (1988). *Estudio comparativo de los niveles y fases de las mareas en el sistema Río Guayas - Estero Salado*. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Codignotto, J. O. (2005). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y cambio climático en la costa Argentina. *Asociación Argentina de Geología Aplicada A La Ingeniería*, 21, 25–28. [https://www.researchgate.net/publication/283362386\\_Vulnerabilidad\\_al\\_ascenso\\_del\\_nivel\\_del\\_mar\\_y\\_cambio\\_climatico\\_en\\_la\\_costa\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/283362386_Vulnerabilidad_al_ascenso_del_nivel_del_mar_y_cambio_climatico_en_la_costa_Argentina)
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Córdova Rugel, K. K., & Menoscal Piana, S. (2020). *Engineering solutions for the rehabilitation of a tourist and community dock in Subida Alta, Puná* [Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52380>
- Cruz-Orozco, R. (1978). ARCILLAS Y MINERALES DEL DELTA DEL RÍO GUAYAS Y ÁREA ADYACENTE DEL GOLFO DE GUAYAQUIL, ECUADOR. *Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias Del Mar y Limnología*. <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/centro/1980-1/articulo81.html>
- Dumont, J. F., Santana, E., Vilema, W., Pedoja, K., Ordóñez, M., Cruz, M., Jiménez, N., & Zambrano, I. (2005). Morphological and microtectonic analysis of Quaternary deformation from Puná and Santa Clara Islands, Gulf of Guayaquil, Ecuador (South America). *Tectonophysics*, 399(1-4 SPEC. ISS.), 331–350. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.12.029>
- Empresa Pública Municipal de Turismo, P. C. y R. I. de G. (2020). *Isla Puná*. <https://www.guayaquilesmidestino.com/es/content/isla-puna>

- Gornitz, V. (1990). Vulnerability of the East coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, 9, 201–237. <https://www.jstor.org/stable/44868636>
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a Calculated Limit Depth To Beach Erosion. In *Proceedings of the Coastal Engineering Conference* (Vol. 2, Issue 1977, pp. 1493–1512). <https://doi.org/10.9753/icce.v16.88>
- Hamilton, S. E. (2020). *Mangroves and aquaculture A five decade remote sensing analysis of Ecuador's estuarine environments*. Springer Nature Switzerland AG. <https://www.researchgate.net/project/Mangrove-Forests-and-Aquaculture-A-Five-Decade-Remote-Sensing-Analysis-of-Ecuadors-Estuarine-Environment>
- INOCAR. (2010). *Cartas Náuticas vigentes*. <https://www.inocar.mil.ec/cartografia/listado.php>
- INOCAR. (2017). *Cartas Náuticas vigentes*. <https://www.inocar.mil.ec/cartografia/listado.php>
- Kokot, R. R., Codignotto, J. O., & Elissondo, M. (2004). Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 59(3), 477–487. <https://revista.geologica.org.ar/raga/articulo/view/1429>
- MAGAP. (2018). *Geoportel del Agro Ecuatoriano*.
- Mathew, M. J., Sautter, B., Ariffin, E. H., Menier, D., Ramkumar, M., Siddiqui, N. A., Delanoe, H., del Estal, N., Traoré, K., & Gensac, E. (2020). Total vulnerability of the littoral zone to climate change-driven natural hazards in north Brittany, France. *Science of the Total Environment*, 706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135963>
- Montalvo Puma, P. A. (2014). *Caracterización hidrogeológica de la Isla Puná* [UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR]. <http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>
- Nativí-Merchán, S., Caiza-Quinga, R., Saltos-Andrade, I., Martillo-Bustamante, C., Andrade-García, G., Quiñonez, M., Cervantes, E., & Cedeño, J. (2021). Coastal erosion assessment using remote sensing and computational numerical model. Case of study: Libertador Bolívar, Ecuador. *Ocean and Coastal Management*, 214(September). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105894>
- NOAA. (2022). *Cold & Warm Episodes by Season*. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Pedoja, K., Ortlieb, L., Dumont, J. F., Lamothe, M., Ghaleb, B., Auclair, M., & Labrousse, B. (2006). Quaternary coastal uplift along the Talara Arc (Ecuador, Northern Peru) from new marine terrace data. *Marine Geology*, 228(1–4), 73–91. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.01.004>
- Peña Olivas, J. M., Sánchez Rojas, V., & Saiz, J. A. (2004). Concepto de la profundidad de cierre. Aplicación a la costa del Maresme. *Revista Digital Del Cedex*, 37, 134. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2111>
- Saltos-Andrade, I., Andrade-Bowen, G., Maquilón-Muñoz, B., Martillo-Bustamante, C., Andrade-García, G., Cedeño-Oviedo, J., & Cervantes-Bernabe, E. (2020). Evaluation of alternatives for coastal protection, a traditional engineering infrastructure and a nature-based solution, using numerical models. Case Study: San Pedro, Ecuador. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.310>

- Solomon, S. M., & Forbes, D. L. (1999). Coastal hazards and associated management issues on South Pacific Islands. *Ocean and Coastal Management*, 42(6-7), 523-554. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(99\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(99)00029-0)
- Vargas Romero, N. A. (2022). *Evaluación del Proceso erosivo en Subida Alta, Puná y sensibilización de la amenaza ante la comunidad* [Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/53156/1/T-76777TesisVargas21-abr-2022signed-signed.pdf>