



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima Y Ciencias del Mar

“ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD ANTE LA EROSIÓN COSTERA POR MEDIO DE
CATEGORIZACIÓN DE VARIABLES GEOLÓGICAS Y OCEANOGRÁFICAS
UTILIZANDO SENSORES REMOTOS Y SIG.
CASO DE ESTUDIO: PUNTILLA DE SANTA ELENA HASTA POSORJA”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERA OCEANOGRÁFICA

Presentado por:

GUTIÉRREZ ZAMBRANO HELEN JOHANNA
ARMIJOS SALAZAR GREY SCARLET

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres quienes han sido y serán un pilar fundamental en mi vida, por siempre darme su apoyo incondicional, su amor, su paciencia y dedicación. Quienes forman parte este logro, porque sin ellos no lo hubiera logrado.

A mi hermana, quien siempre me ha apoyado en todo momento para seguir adelante y aconsejándome en todo mi camino universitario y personal.

A mi hermano, quien siempre ha soportado durante momentos difíciles en mi carrera universitaria y dándome apoyo durante todo este camino.

Helen Johanna Gutiérrez Zambrano

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi Tío Rubén por siempre apoyarme, confiar en mí y ayudarme a aprovechar cada oportunidad.

A mi mami Azucena por su amor incondicional, por las enseñanzas brindadas, por educarme y animarme a iniciar nuevas cosas.

A mi abuelita, hermanos, padrastro, y familia que han sido mi motivación y parte fundamental para la superarme cada día.

Este trabajo es el resultado de la confianza depositada por cada uno de ustedes.

Grey Escarlet Armijos Salazar

AGRADECIMIENTOS

Quiero iniciar agradeciendo a Dios por su guía y protección a lo largo de mi vida.

A ESPOL por recibirme, brindarme una serie de oportunidades incomparables y enriquecer mis conocimientos.

A mis tutores de tesis, MSc. Iván Saltos y Dr. Carlos Martillo, Ing. Elvis Espinoza quienes estuvieron prestos a ayudar a aclarar nuestras dudas, guiarnos. Gracias por su tiempo y dedicación

A cada uno de los docentes, por compartir sus conocimientos. A mis compañeros por mostrar su pasión a nuestra carrera que hizo que nos interesarnos y apasionarnos por ella también.

Helen Gutiérrez y Grey Armijos

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Helen Johanna Gutierrez Zambrano* y *Grey Escarlet Armijos Salazar* damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Helen Gutiérrez Zambrano



Grey Armijos Salazar

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
LUIS MIGUEL
ALTAMIRANO
PEREZ

Luis Miguel Altamirano Pérez, MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

IVAN
MARCELO
SALTOS
ANDRADE

Firmado
digitalmente por
IVAN MARCELO
SALTOS ANDRADE
Fecha: 2021.11.25
00:06:53 -05'00'

Iván Marcelo Saltos Andrade, MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El borde costero comprendido entre la Puntilla de Santa Elena hasta Posorja se encuentra altamente expuesto a los procesos de erosión. El presente trabajo evalúa la influencia de las variables geológicas y oceanográficas utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica para identificar la susceptibilidad de erosión a lo largo de la línea de costa. Para realizar este estudio se modificó la metodología propuesta por Gornitz (1991), en la cual determina un “Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI)” considerando variables como geomorfología, pendiente, tasa de erosión, cambio relativo del nivel medio del mar, altura de ola significativa y rango medio de marea. De acuerdo con los resultados obtenidos, las zonas donde se ha implementado estructuras de protección costera han modificado los patrones del transporte de sedimentos, así mismo identificamos que en las desembocaduras de ríos, las tasas de erosión son mayores. Se concluye que, basándose en los resultados de la categorización de variables, la mayor parte de la zona de estudio muestra susceptibilidad alta ante los procesos de erosión, ya que, el 48% de las zonas se encuentran expuestas a una altura de ola significativa máxima de 1.14, rangos de marea que varían de 2.60 m a 2.73 m, presentando geomorfologías como acantilados bajos y altos que poseen pendiente que fluctúan de 1,65 % a 13,95% con predominancia de areniscas y conglomerados. El presente estudio contribuye a la toma de decisiones respecto al ordenamiento territorial y manejo del espacio costero del país.

Palabras Clave: Sensores Remotos, Landsat, Sentinel, Erosión, Geomorfología.

ABSTRACT

The coastal border between Puntilla de Santa Elena to Posorja is highly exposed to erosion processes. This project evaluates the influence of geological and oceanographic variables using remote sensing and geographic information systems to identify the susceptibility to erosion along the coastline. To carry out this study, the methodology proposed by Gornitz (1991) was modified to determine a "Coastal Vulnerability Index (CVI)" considering variables such as geomorphology, slope, erosion rate, relative change in mean sea level, significant wave height and mean tidal range. According to the results obtained, the areas where coastal protection structures have been implemented have modified sediment transport patterns, and we also identified that erosion rates are higher at river mouths. It is concluded that, based on the results from the categorization of variables, most of the study area shows high susceptibility to erosion processes, since 48% of the areas are exposed to a maximum mean wave height of 1.14, tidal ranges that vary from 2.60 m to 2.73 m, presenting geomorphologies such as low and high cliffs with slopes that fluctuate from 1.65% to 13.95% with a predominance of sandstones and conglomerates. This study contributes to decision-making regarding land use planning and management of the country's coastal space.

Keywords: *Remote Sensing, Landsat, Sentinel, Erosion, Geomorphology.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE MAPAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Área de Estudio	4
1.3.1 Ubicación	4
1.3.2 Actividades económicas.....	5
1.3.3 Características oceanográficas:	6
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivos Específicos.....	7
1.5 Marco teórico	8
1.5.1 Estudios Previos relacionados con el Índice de Vulnerabilidad Costera ..	8
1.5.2 Herramientas:.....	9
CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología	13

2.1	Descripción de metodología	13
2.2	Criterio de selección:	13
2.3	Metodología de Gornitz.....	14
2.3.1	Selección de variables.	17
2.3.2	Recopilación de la información.	17
2.3.3	Procesamiento de la información.	20
2.3.4	Validación de datos.....	26
2.3.5	Categorización.	26
2.3.6	Cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI).....	27
CAPÍTULO 3.....		28
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
3.1	Categorización de variables.....	28
3.1.1	Altura de ola significativa.....	29
3.1.2	Nivel medio de marea	30
3.1.3	Aumento del nivel del mar.....	31
3.1.4	Litología.....	31
3.1.5	Geomorfología	32
3.1.6	Pendiente	33
3.1.7	Tasa de erosión.....	33
3.1.8	Índice de susceptibilidad costera.....	38
CAPÍTULO 4.....		40
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	40
4.1	Conclusiones:	40
4.2	Recomendaciones	42
BIBLIOGRAFÍA.....		44
APÉNDICES		48

ABREVIATURAS

SIG	Sistema de Información Geográfica
SNI	Sistema Nacional de Información.
INOCAR	Instituto Oceanográfico, Antártico de la Armada.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
CVI	Índice de Vulnerabilidad Costera.
NMM	Nivel Medio del Mar
MLWS	Mean Low Water Springs
MHWS	Mean High Water Springs
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
GLOSSIS	Global Storm Surge Information System
GLOSS	Global Sea Level Observing System

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
Km	Kilometro
m	Metro
s	Segundo
m/año	Metro por año
m/s	Metro por segundo
H_S	Altura de ola significativa
H_{S-max}	Altura de ola significativa máxima
$T (s)$	Periodo
V_{max}	Velocidad máxima
V_{prom}	Velocidad promedio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Procesos de erosión costera en Australia (MUNDO INFORMATICO, 2020).	2
Figura 1.2. Procesos de erosión en La Libertad – Ecuador (Portilla, 2021).	3
Figura 1.3. Actividades económicas desarrolladas en las parroquias de la zona de estudio (INEC, 2010).	5
Figura 2.1. Flujograma de las etapas del proyecto (Autores,2021).....	16
Figura 2.2. Niveles de referencia en el mar (Garro, 2021).....	21
Figura 3.1. Categorización de altura de ola significativa. (Autores,2021)	30
Figura 3.2. Categorización de rango medio de marea. (Autores,2021)	30
Figura 3.3. Categorización de aumento del nivel del mar. (Autores,2021)	31
Figura 3.4. Categorización de Litología. (Autores,2021).....	32
Figura 3.5. Categorización de geomorfología. (Autores,2021)	32
Figura 3.6. Categorización de pendiente. (Autores,2021).....	33
Figura 3.7. Tasas la zona AC1. (Autores,2021).....	34
Figura 3.8. Tasas de la zona PB1. (Autores,2021)	35
Figura 3.9. Tasas de la zona AC2. (Autores,2021)	36
Figura 3.10. Tasas de la zona PB2. (Autores,2021)	36
Figura 3.11. Tasas de la zona AC3. (Autores,2021)	37
Figura 3.12. Tasas y categorización de la zona PB3. (Autores,2021)	38
Figura 3.13. Índice de susceptibilidad a la erosión. (Autores,2021).....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Habitantes de la zona de estudio (INEC, 2010)	5
Tabla 1.2. Características oceanográficas (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009)	7
Tabla 1.3. Referencias de estudios realizados para identificación de zonas de susceptibilidad.	8
Tabla 2.1. Categorización de variables (Gornitz, 1991).	15
Tabla 2.2. Recopilación de información (Autores,2021)	18
Tabla 2.3. Ecuaciones para estimar la altura de marea.....	23
Tabla 3.1.Categorización de Gornitz adaptado a las características del Ecuador. (Autores,2021)	29

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1.1. Zona de Estudio. (Autores,2021)	4
Mapa 1.2. Circulación Superficial entre Punta del Morro y Puntilla de Santa Elena, mostrando velocidades máximas obtenidas (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009).....	6

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La zona costera de Ecuador es influenciada por factores oceanográficos y geológicos que varían a través del tiempo. La línea costera continental de Ecuador tiene una longitud de 5.271,1 km (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017) que se encuentra en constante cambio. Por este motivo, el estudio del borde costero ante procesos erosivos es el componente principal para la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial y Planes de Manejo de Recursos Costeros.

El estudio del perfil costero ecuatoriano demanda inversión de recursos económicos, tiempo y recolección de información. Por ende, se delimita espacialmente el área de estudio a la zona comprendida desde la Puntilla de Santa Elena hasta Posorja, que abarca las provincias de Guayas y Santa Elena.

Para estudiar la susceptibilidad de erosión en el filo costero utilizamos el “Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI)” (Gornitz, 1991) , es calculado a partir de 7 variables: geomorfología, litología, pendiente, cambio de la línea de costa, altura significativa de ola, rango intermareal y aumento del nivel relativo del mar. Es importante mencionar que es un índice de susceptibilidad, ya que considera variables cuantitativas del entorno costero y no incluye variables de vulnerabilidad socio – económica.

La información recopilada de las variables geológicas se obtiene mediante revisión bibliográfica, imágenes satelitales, cartas náuticas y ráster topográficos, mientras que, para las variables oceanográficas se obtuvieron datos de instituciones nacionales e internacionales por medio de sus páginas web.

1.1 Descripción del problema

Las zonas costeras se encuentran expuestas a distintas amenazas naturales. Una amenaza significativa es la erosión del borde costero, este proceso es consecuencia de la dinámica del litoral (Secretaría Nacional de Planificación y

Desarrollo, 2017). El Plan de Ordenamiento del Espacio Marino Costero (POEMC), 2017 considera a la erosión como “amenaza de carácter restringido y paulatino”.



Figura 1.1. Procesos de erosión costera en Australia (MUNDO INFORMATICO, 2020).

El grado de susceptibilidad de la costa ante la erosión difiere en función de las características geológicas y oceanográficas. El riesgo ante la erosión en la zona costera incrementa cuando se ubica infraestructura en áreas de acantilado, dunas o bermas de playa, los procesos erosivos socavan y exponen las cimentaciones de las estructuras (Secretaría Técnica Planifica Ecuador, 2020). En las zonas de acantilados, la erosión se da en la base y el frente, desprendiendo grandes rocas cuyo deslizamiento es impredecible y atenta contra la vida de los habitantes y turistas.

En la Parroquia de Chanduy, dos menores se encontraban caminando por la playa cuando fueron aplastados por el desprendimiento de rocas del acantilado, uno de los jóvenes sufrió graves heridas que causo su fallecimiento. Los problemas originados por los procesos erosivos en Chanduy aún no poseen solución, según el reportaje del estado de la franja costera realizada por (EL UNIVERSO, 2015) es:

“La carretera de acceso es intransitable, su recorrido es una prueba de habilidad para sortear los centenares de socavones que conviven con el asfalto. El Litoral urbano se ha convertido en un espectáculo apocalíptico, viviendas resquebrajadas y esparcidas por la playa, ya que, al no existir

un muro de contención, la fuerza del mar está erosionando el terreno hasta hacer derrumbar las casas". (EL UNIVERSO, 2015)

1.2 Justificación del problema

Las zonas costeras se encuentran muy expuestas a eventos naturales que tienen como resultado procesos de erosión o acreción, siendo los procesos hidrodinámicos los que definen las características sedimentológicas (rocosas o sedimentarias) (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017). Evidencia de estos procesos se pueden observar en los frentes de acantilados, las dunas y bermas de las playas (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017). Estas zonas están sometidas a una fuerte presión debido al desarrollo de numerosos usos, actividades e infraestructuras. (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017). Al momento de elaborar planes de manejo de recursos costeros, planes de ordenamiento territorial y evaluar los riesgos considerando los procesos erosivos en la costa; esto se convierte en un gran desafío, ya que, a nivel nacional son escasos los estudios ejecutados y no suelen ser de acceso público.

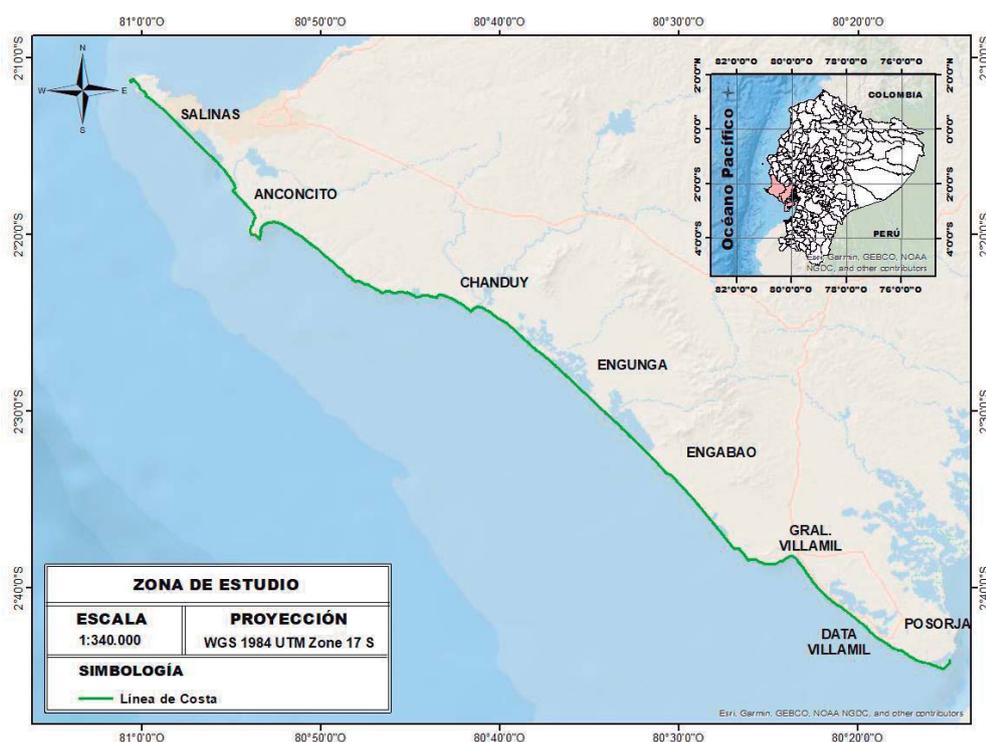


Figura 1.2. Procesos de erosión en La Libertad – Ecuador (Portilla, 2021).

Este proyecto tiene como objetivo identificar las zonas de muy alta susceptibilidad a la erosión, considerando las características geológicas como: la geomorfología, litología, pendiente, cambio de línea de costa y características oceanográficas como: rango medio de marea, altura significativa de ola y aumento del nivel relativo del mar, que describen el entorno físico del borde costero. Con la finalidad de establecer un estudio para la evaluación de las tasas de erosión, que servirá como referencia metodológica replicable a lo largo de la costa. El aporte tecnológico de la investigación está constituido por el uso de información obtenida de sensores remotos y sistemas de información geográfica.

1.3 Área de Estudio

1.3.1 Ubicación



Mapa 1.1. Zona de Estudio. (Autores,2021)

El área de estudio (Mapa1.1) abarca las provincias de Santa Elena y Guayas. En estas 2 provincias, las parroquias localizadas en el borde costero son 8, entre urbanas y rurales. La población ubicada en cada parroquia es:

Tabla 1.1. Habitantes de la zona de estudio (INEC, 2010)

Parroquias	Habitantes
Salinas	28650
José Luis Tamayo (Muey)	3085
Anconcito	11822
José de Ancón	6877
Atahualpa	4025
Chanduy	18648
Playas	41935
Posorja	24136

1.3.2 Actividades económicas

Las poblaciones ubicadas en esta zona se dedican a actividades económicas desarrolladas en la franja costera como: la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca, actividades de alojamiento, servicio de comidas, comercio al por mayor y menor, entre otros. A continuación, se muestra las actividades economías desarrolladas en la zona costera o influenciada por ésta.

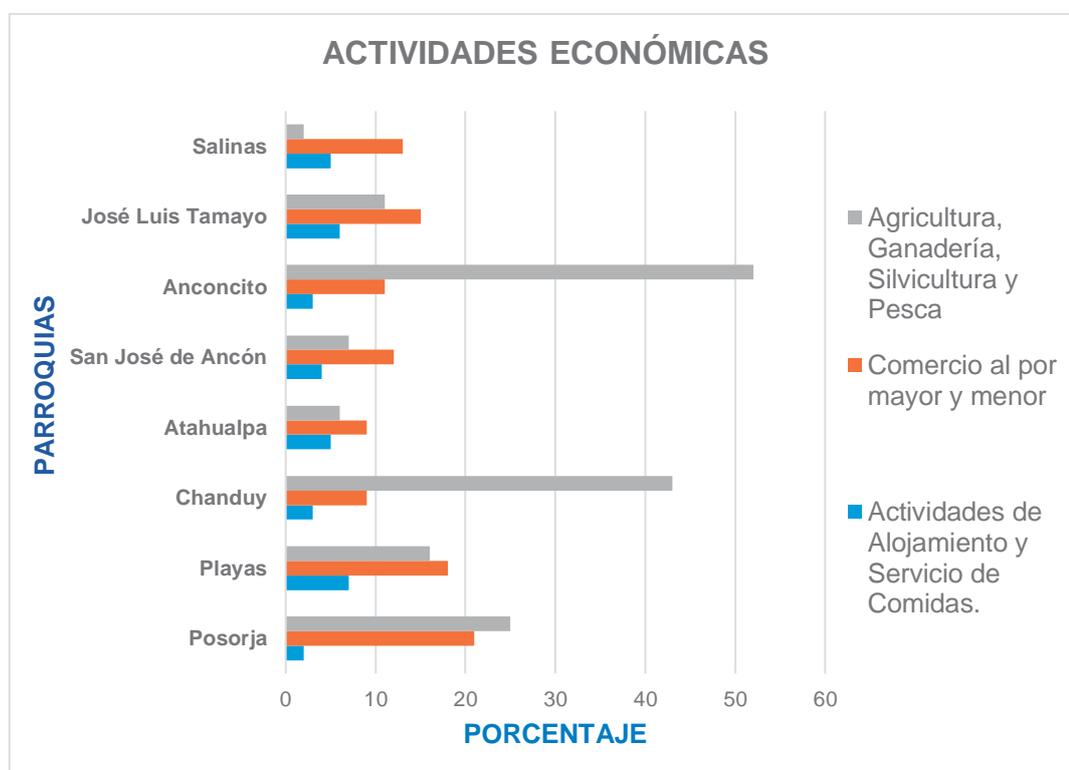
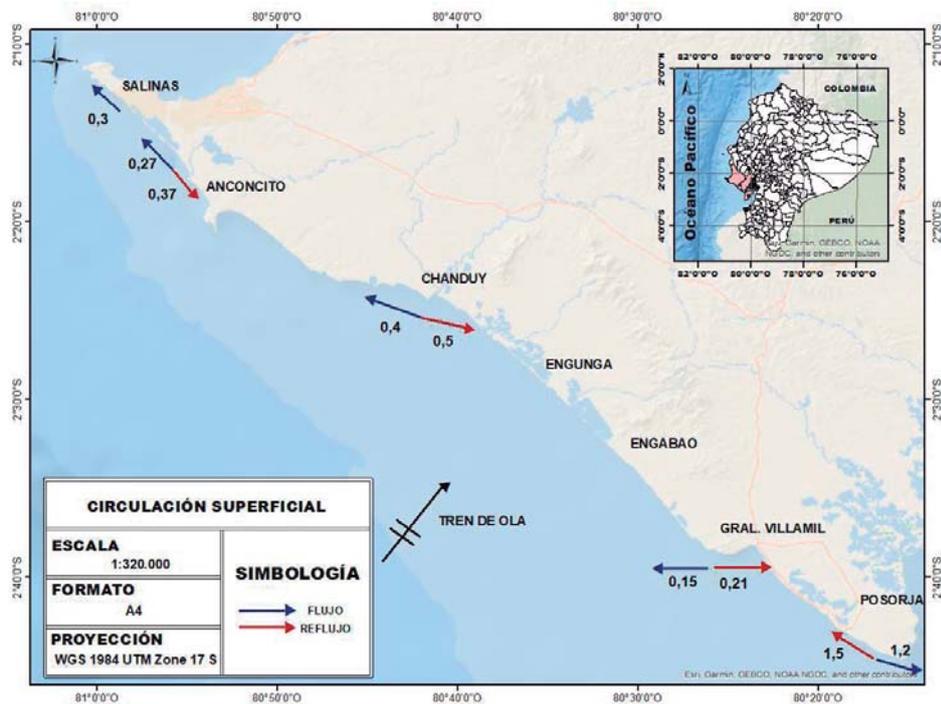


Figura 1.3. Actividades económicas desarrolladas en las parroquias de la zona de estudio (INEC, 2010).

En la Figura 1.3, se observa que, el 52% de la población de Anconcito se dedica a la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca, seguido de aproximadamente el 43% de la población de Chanduy, mientras que, la población de Playas y José Luis Tamayo se dedican en su mayoría al comercio con un 18% y 15% respectivamente.

1.3.3 Características oceanográficas:



Mapa 1.2. Circulación Superficial entre Punta del Morro y Puntilla de Santa Elena, mostrando velocidades máximas obtenidas (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009)

La zona de estudio (Mapa 1.2) presenta diferentes condiciones oceanográficas, ya que, es una zona que abarca 117,15 km de línea de costa con orientación Noroeste-Sureste, y las olas que llegan a la costa provienen del Pacífico Sur, entrando directamente hacia esta región de forma perpendicular con dirección suroeste, siendo una zona de altamente energética con un notable arrastre de sedimentos (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009).

Tabla 1.2. Características oceanográficas (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009)

SECTOR	H_S (m)	H_{S-max} (m)	T (s)	Dirección	V_{max} (m/s)	V_{prom} (m/s)
CHANDUY	0,9	2,6	14	Suroeste	0,52	0,08 – 0,34
MAR BRAVO	1,92	2,43	13	Suroeste	---	---
PUNTA CARNERO	---	---	---	Norte-Noroeste	0,37	0,06 – 0,2
PLAYAS	---	---	---	Este, Oeste	---	0,21 - 0,15

En la Tabla 1.2, se indica que en el borde costero del sector de Chanduy se presenta una altura de ola significativa de 0,9 m mientras que, en Mar Bravo existen alturas olas significativas máximas de 2,43 m. Sin embargo, en ambos sectores posee la misma dirección suroeste. En Punta Carnero, la magnitud promedio de corrientes frente a Punta Carnero oscila entre 0.06 m/s a 0.2 m/s, consiguiendo velocidades máximas de 0.37 m/s con dirección al norte-noroeste en el flujo y al sur-sureste en el reflujó, mientras que, Playas posee corrientes con magnitudes de velocidades que alcanzan 0.21 m/s con orientación este en el flujo y velocidades aproximadas de 0.15 m/s con dirección hacia el oeste en el estado de reflujó.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de las variables geológicas y oceanográficas empleando sensores remotos y sistemas de información geográfica en la zona comprendida entre la Puntilla de Santa Elena hasta Posorja para la identificación de las zonas de alta susceptibilidad ante procesos de erosión.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Emplear información de sensores remotos para la obtención de datos de altura significativa de ola, rango de marea, aumento del nivel relativo del mar, cambio espacial y temporal de la línea de costa.
2. Cuantificar el cambio espacial de la línea de costa para la estimación de las tasas de los procesos erosivos, neutro y de acreción.

3. Identificar los distintos parámetros geológicos y oceanográficos en la zona de estudio para la categorización de las variables en función del criterio de Gornitz.

1.5 Marco teórico

Este estudio se basa en determinar los sectores que poseen un alto grado de susceptibilidad ante los procesos de erosión para posteriormente generar un mapa de identificación de estos sectores. Por ello, es necesario revisar estudios y proyectos que emplearon SIG e imágenes satelitales para la obtención de información:

Tabla 1.3. Referencias de estudios realizados para identificación de zonas de susceptibilidad.

AUTORES	TÍTULO DEL PROYECTO
Ojeda Zújar, José; Álvarez Franco, José; Martín Cajaraville y Fraile Jurado, Pablo. 2009	Uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ante una potencial subida del Nivel del Mar en la costa Andaluza (España)
(Nuñez Gómez, Ramos Reyes, Barba Macías, & Espinoza Tenorio, 2016)	Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México
Rangel Buitrago, Nelson; Posada Posada, Blanca. 2013	Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio

1.5.1 Estudios Previos relacionados con el Índice de Vulnerabilidad Costera

En el estudio realizado por (Ojeda Zújar, Álvarez Franco, Cajaraville, & Fraile Jurado, 2009):

- El CVI es una aproximación del cálculo de la vulnerabilidad ante la potencial subida del mar. El índice es calculado considerando 6 variables

(geomorfología, pendiente, tasas de erosión costera, altura de oleaje significativo, cambios del nivel relativo del mar y rango mareal medio). Los resultados de este estudio muestran la vulnerabilidad asociada a la sensibilidad del ecosistema, es decir; analizando la vulnerabilidad del medio natural y no la vulnerabilidad socio – económica.

- Los datos para las variables son obtenidos mediante la revisión de bibliografía de estudios previos, en la caracterización de la geomorfología utilizan base de datos nacionales, fotografías de campo y videos georreferenciados con GPS. En la pendiente debido a la escasa información es sustituida por el índice topográfico. En el cálculo de tasas de erosión se recopiló los mapas de diversos estudios de geomorfología costera, para su posterior digitalización, en el proceso de digitalización y cálculo se utilizó la extensión “DSAS” de ArcGIS.

En el Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México aplica la metodología del Índice de vulnerabilidad Costera utilizando Sistemas de Información Geográfica. Recalcando que este índice solo estima la vulnerabilidad relativa de la costa, ya que, la vulnerabilidad considera la exposición y su capacidad de adaptación.

- Consideran 6 variables: geomorfología/geología, erosión, pendiente costera, cambio nivel del mar, oleaje medio significativo y rango mareal. Los datos de cada variable provienen de diversas fuentes, realizan una homogeneización de las variables a través del análisis geográfico en GIS, rasterizando todos los archivos vectoriales de cada variable.

1.5.2 Herramientas:

Para la obtención de información se emplearon los siguientes recursos, softwares y para su procesamiento se emplea los sistemas de información geográfica:

1.5.2.1 Sensores Remotos

Los sensores remotos son equipos que se emplean para obtener información de un área o fenómeno mediante el análisis de datos adquiridos de un dispositivo que no se encuentran en el lugar de estudio. Los datos registrados por los sensores pueden guardarse a través de imágenes fotográficas o digitales (Pérez, 2007). Existe sensores remotos como:

Landsat 7:

Landsat-7 posee la capacidad de recopilar información y transmitir hasta 532 imágenes por día (Referencia). Este satélite se encuentra en una órbita Heliosincrónica, es decir; pasa un determinado lugar a la misma hora. Este satélite ha provisto de imágenes desde el 15 abril de 1999 hasta la actualidad. El instrumento esencial a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, 2018)

Landsat 8:

Landsat 8 ha recopilado información desde el 11 de febrero del 2013 hasta la actualidad. El equipo instalado es el LCDM incluye un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (Thermal Infrared Sensor) y suministra imágenes con resolución espacial máxima de 15m (Earth Observing System, 2021).

Sentinel 2:

Sentinel 2 fue diseñado para suministrar datos e imágenes al programa Copernicus con una resolución espacial máxima de 10 m. Este satélite fue lanzado el 23 de junio del 2015, tiene incorporado una innovadora cámara multiespectral de alta resolución, que contiene 13 bandas espectrales que contribuyen a una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación. Se emplea para vigilar el crecimiento de las plantas y mapear el estado y los cambios de la superficie terrestre (ESA, 2015).

1.5.2.2 CoastSat

CoastSat es un conjunto de herramientas de software de código abierto en lenguaje Python que permite a los usuarios conseguir series de tiempo de la posición de la costa en cualquier región costera del mundo a partir de imágenes satelitales disponibles públicamente a través de Google Earth Engine (Vos, y otros, 2021).

1.5.2.3 Google Earth Engine

Google Earth Engine es una plataforma de varios petabytes que tiene imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Estos se encuentran a disposición de científicos, investigadores y desarrolladores para detectar cambios, mapear tendencias y estimar de forma cuantitativa las diferencias en la superficie de la Tierra (Google Earth Engine, 2021).

1.5.2.4 Blue Earth Data

BlueEarth Data es una plataforma de datos abiertos iniciada por Deltares, que suministra datos globales de forma gratuita. Estos datos o información pueden ser utilizada para estudiar, comparar y descargar información relevante. Entre los datos suministrados se encuentra: la altura de las olas, el nivel del agua, la descarga (histórica y pronosticada), el clima de las olas, la erosión costera, los datos meteorológicos y los datos batimétrico (Deltares, 2020).

1.5.2.5 Sistemas de Información Geográfica:

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un marco de trabajo para reunir, gestionar y analizar datos. Adaptado a la ciencia geográfica, SIG incorpora distintos tipos de datos. Considera la localización espacial y establece capas de información para su visualización, usando mapas y escenas 3D. SIG sirven para visualizar patrones, relaciones y situaciones, ayudando a los usuarios en la toma de decisiones (ESRI, 2021).

Arcmap

ArcMap es una aplicación de SIG que se emplea para la visualización y exploración de dataset del área de estudio, donde crean mapa para imprimir o publicar. Además, se usa para crear y editar datasets (ESRI, 2019).

QGIS

QGIS es una aplicación de SIG que está construida sobre un Software Libre y de Código Abierto (FOSS) (QGIS, 2021).

DSAS

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) v5.0 es un software complementario de Esri ArcGIS Desktop que permite estimar de forma estadística las tasas de cambio de línea de costa a mediante la ubicación históricas de la costa. Suministra un método computarizado para definir las ubicaciones de medición, calcula las tasas, facilita los datos estadísticos necesarios para analizar la solidez de las tasas (USGS, 2018).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de metodología

La metodología utilizada se basó en el criterio de Gornitz. Este proceso categoriza las variables geológicas y oceanográficas de forma cuantitativa y cualitativa para identificar zonas de mayor susceptibilidad ante procesos de erosión, lo cual, facilitó el desarrollo del presente estudio. El proyecto inició con la recopilación de información para estimar el índice de vulnerabilidad costera, la información recopilada se adquirió de estudios bibliográficos realizados en el Ecuador y de distintas fuentes de datos globales y nacionales. SIG es el principal criterio de selección empleado para procesar de manera correcta la data obtenida.

2.2 Criterio de selección:

Dentro de los criterios de selección o restricciones establecidos para facilitar la aplicación de la metodología son:

- Aplicación de la metodología del índice de vulnerabilidad costera propuesta por Gornitz (1991) provista por parte del Grupo de Investigación GEMAC.
- La región escogida para aplicar el proyecto es la zona comprendida entre la Puntilla de Santa Elena hasta Posorja, debido a la falta de información acerca de los procesos erosivos actuando en la zona.
- La información elegida para desarrollar el proyecto será a partir de estudios bibliográficos para la geomorfología y datos provistos por sensores remotos de fuentes confiables.
- Se utilizaron las bases de datos del Sistema Nacional de Información (SNI), Instituto Oceanográfico, Antártico de la Armada (INOCAR), NOAA's Tides and Currents, Blue Earth Data Y Google Earth Engine, debido al prestigio de las instituciones que suministra información a estas páginas web.
- La búsqueda de los datos se realizó desde el 2003 hasta la actualidad, ya que, estos son los datos antiguos registrados.
- Uso de sensores remotos para el análisis del cambio de la línea de costa, dado a que, posee una amplia serie de tiempo y abarca zonas extensas

2.3 Metodología de Gornitz

La metodología propuesta por Gornitz (1991), establece siete variables físicas para estimar la susceptibilidad del medio ante procesos erosivos y el aumento del nivel relativo del mar mediante el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI). Las variables definidas mediante esta metodología son:

1. Pendiente.
2. Litología.
3. Geomorfología.
4. Cambio de línea de Costa.
5. Aumento del nivel relativo del mar.
6. Nivel medio de marea.
7. Altura de ola significativa.

La metodología estableció que la recopilación de información para cada variable se realizó mediante mediciones in situ y datos globales. Esta metodología categoriza cada variable física mediante la asignación de valores entre los rangos de 1 a 5, indicando una baja susceptibilidad (1) hasta la más alta susceptibilidad (5), dependiendo de las características de la zona de estudio y empleando el SIG para el procesamiento de variables. En la Tabla 2.1, se presenta la categorización por variable:

Tabla 2.1. Categorización de variables (Gornitz, 1991).

VARIABLE	RANGO				
	1	2	3	4	5
	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
PENDIENTE	≥30.1	20.1-30.0	10.1-20.0	5.1-10.0	0-5.0
LITOLOGÍA	Plutónico Volcánica (lava) Metamórficos de grado medio-alto	Metamórficos de grado bajo. Areniscas y conglomerados	Rocas sedimentarias	Sedimentos gruesos y/o mal clasificado no consolidado	Sedimentos finos no consolidado Ceniza volcánica
GEOMORFOLOGÍA	Rocosas Acantilado	Acantilados medios	Acantilados bajos	Playas Estuarios Lagunas Planicies aluviales	Playas de Barrera Playas (arena) Fango Deltas
CAMBIO DE LÍNEA DE COSTA	≤2.1	1.0-2.0	-1.0- +1.0	-1.1-(-2.0)	≥4.1
AUMENTO DEL NIVEL DE MAR	≤-1.1	-1.0-0.99	1.0-2.0	2.1-4.0	≤-2.0
NIVEL DE MAREA MEDIO	≤0.99	1.0-1.9	2.0- 4.0	4.1-6.0	≥6.1
ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA	0-2.9	3.0- 4.9	5.0-5.9	6.0- 6.9	≥7.0

La metodología empleada consta de 6 etapas principales:

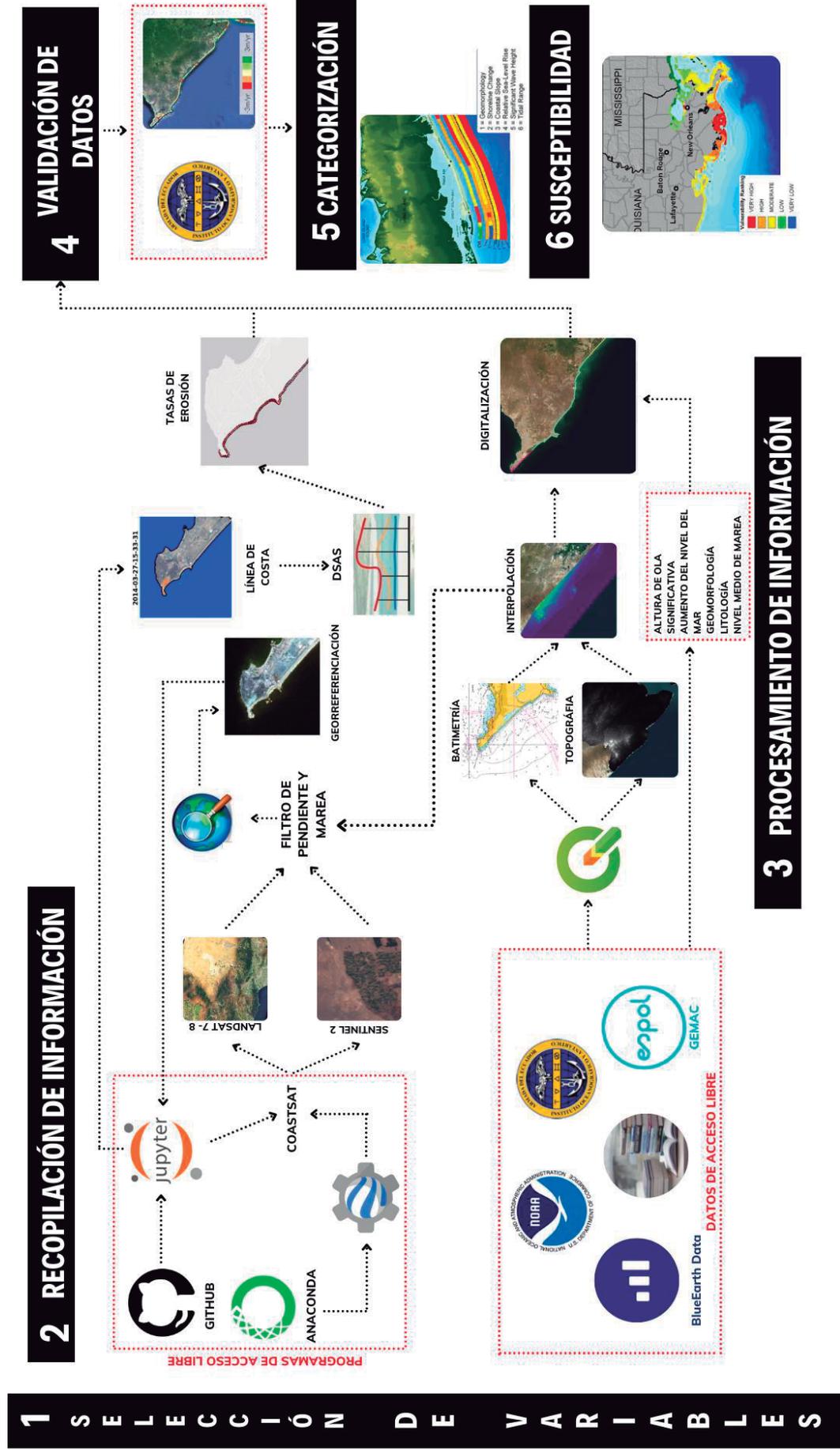


Figura 2.1. Flujoograma de las etapas del proyecto (Autores,2021)

A continuación, se describe de forma clara y precisa la metodología empleada en cada etapa (Figura 2.1):

2.3.1 Selección de variables.

La selección de variables se realizó por medio de reuniones con el cliente y tutor. En las reuniones, se planteó inicialmente la posibilidad de realizar el estudio con tres variables físicas del medio (geomorfología, pendiente y línea de costa). Este proyecto de investigación puede ser utilizado como un estudio base en posteriores trabajos de investigación. Por ello, se produjo la necesidad de trabajar con las siete variables establecidas por (Gornitz, 1991).

2.3.2 Recopilación de la información.

La recopilación de la información se obtuvo de información de páginas web de instituciones nacionales e internacionales.

A continuación, se muestra la información recopilada para cada variable:

Tabla 2.2. Recopilación de información (Autores,2021)

VARIABLES	INFORMACIÓN	CARACTERÍSTICA			FUENTE DE DATOS	AUTOR	ENLACE
		CARTA NAÚTICA, CAPA O SECTOR	RESOLUCIÓN	AÑO			
Geomorfología	Salinas				Reporte		
	Punta Carnero				“Características de la línea costera del Ecuador y recomendaciones para su manejo: Shoreline characteristics and management recommendations for the coast of Ecuador”	Ayón, Hector Boothroyd, Jon	https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opa_c_css/index.php?l=notice_display&id=3153
	Anconcito						
	Chanduy						
	Rio de la Rita						
	Playas		1:1000	1994			
	Playas - Posorja						
	Posorja						
Litología	Tipo de Sedimentos	Puntilla de Santa Elena hasta Posorja	1:100000	2005	Sistema Nacional de Información	MAGAP	https://sni.gob.ec/coberturas
		IOA 1052	1:25000	2017			
		IOA 10521	1:12500				
		IOA 10600	1:12500	2006			
	Batimetría	IOA 106	1:100000	2012	Grupo de Investigación Geociencias Marinas y Costeras (GEMAC)	INOCAR	https://www.inocar.mil.ec/cartografialista.php
		IOA 10601	1:7500				
		IOA 107	1:100000	2018			
		IOA 1070	1:30000				
		IOA 10700	1:10000	2020			
		IOA 10701	1:12500				
	Salinas_2403	1:3					
Topografía	Santa_Elena_2401	1:3	1995	SIGTIERRAS	MAGAP	----- -----	
	PLAYAS	1:4					
	GUAYAQUIL	1:4					
Marea	Tablas de Marea	Estación Data Posorja	1:6	2003 - 2021	INOCAR	INOCAR	https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/ta-bla-mareas
	Cambio de Línea de Costa	Imágenes Satelitales	AC1 PB1	1:10	2003 - 2021	Google Earth	Landsat 7

Como se detalla en la Tabla 2.2, el levantamiento de información geomorfológica se realizó por revisión bibliográfica del reporte técnico “Características de la línea costera del Ecuador y recomendaciones para su manejo” (Boothroyd & Ayón, 1994), mientras que, la información litológica se adquirió del Sistema Nacional de Información (SNI), provisto por la institución MAGAP en 2005 y actualizada en el 2014 (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION, 2014).

Para obtener información de las pendientes del área de estudio, se requirió obtener información batimétrica de las cartas náuticas y datos topográficos de rásters provistos por MAGAP especificados en la Tabla 2-2.

Para la variable de marea se obtuvo datos del 2003 -2021 de la estación Data Posorja del sitio web de INOCAR. Además, el cambio de la Línea de Costa se realizó mediante la información provista por las imágenes satelitales descargadas por el programa Anaconda junto a Jupyter Notebook vinculados con Google Earth Engine. El set de imágenes satelitales proviene de los sensores remotos de Landsat 7-8 y Sentinel 2, obteniendo imágenes desde el año 2003 al 2021. Se requirió seccionar nuestra área de estudio en nueve zonas. (Apéndice A).

El dato del aumento del nivel relativo del mar se adquirió del análisis de los datos registrados de la estación La Libertad mediante una tendencia lineal realizada por NOAA's Tides and Currents. Sin embargo, la información del nivel medio de marea fue adquirida de los datos globales de Blue Earth Data como los datos de altura de ola significativa.

2.3.3 Procesamiento de la información.

2.3.3.1 Pendiente.

Para calcular la pendiente nos basamos en el concepto de perfil de playa, el cual, se encuentra definido como un corte transversal realizado en la cara de playa partiendo como referencia el inicio de la berma hasta la bajamar de sicigia (Rondón, 2011)

El sistema de información geográfico empleado fue QGIS, por lo cual, se tomó la información batimétrica y topográfica de la zona. Se digitalizó la información suministrada por las cartas náuticas mencionadas en la Tabla 2.2, mediante una capa vectorial (Línea) del veril 0, esta capa se convirtió de Línea a Punto con el complemento QChainage.

Para el procesamiento de los datos topográficos se inició con la creación de un polígono en el área de estudio y se crearon puntos aleatorios con la herramienta "Puntos aleatorios en los límites de la capa". Después, se extrajo la información de la capa ráster mediante la herramienta "Point sampling tool". Los datos topográficos estaban referenciados al NMM y los datos batimétricos se encontraban referenciados al MLWS, se seleccionó como sistema de referencia NMM y se realizó la corrección de los datos batimétricos mediante el siguiente procedimiento:

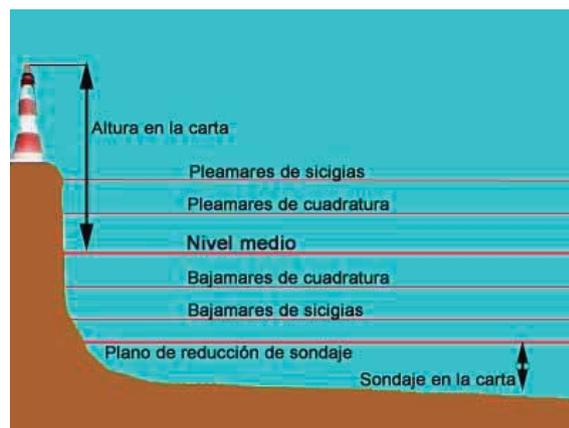


Figura 2.2. Niveles de referencia en el mar (Garro, 2021).

Se examinó la información suministrada por las cartas náuticas, donde el nivel de reducción de sondaje se encontraba referido al MLWS, lo significaba que, la distancia entre estos dos puntos era cero. Por esta razón, se realizó la diferencia entre MHWS y MLWS, dividiendo este resultado para dos. Este procedimiento se efectuó para cada carta náutica. Los valores obtenidos, se restaron a los datos batimétricos de cada carta náutica respectivamente. Finalmente, se unió la capa vectorial de los datos batimétricos y topográficos por la herramienta Unir capas vectoriales y se realizó la interpolación con resolución espacial de 4 m mediante

la herramienta Interpolación, dado a la menor resolución espacial de los datos topográficos.

2.3.3.2 Geomorfología.

La información geomorfológica se digitalizo mediante QGIS. Esta información estaba contenida en un documento (.pdf) que se convirtió a formato de imagen (.png). Luego, se seleccionó las imágenes (.png) de los mapas geomorfológicos y se convirtieron en imágenes de formato (.TIFF). Estos mapas geomorfológicos en formato TIFF fueron georreferenciados por medio de cuatro puntos de control mediante la opción Añadir Punto agregando las coordenadas del punto escogido en el mapa. Este procedimiento se realizó para cada mapa geomorfológico de la zona de estudio. Posteriormente, se creó una capa vectorial (Línea) con el sistema de coordenadas WGS84/UTM zone 17S donde se colocó como base los mapas geomorfológicos georreferenciados para delimitar el tramo de las distintas geoformas mediante la opción Conmutar edición y Añadir Línea.

2.3.3.3 Litología

La información Litológica se procesó en QGIS mediante la creación de una capa vectorial (Línea) con el sistema de coordenadas WGS84/UTM zone 17S, digitalizando la información litológica cercana a la costa para delimitar los tramos de las diferentes formas geológicas mediante la opción Conmutar edición y Añadir Línea.

2.3.3.4 Línea de costa.

Primeramente, se definió la línea de costa se define la línea de contacto entre la tierra y la masa de agua (Winarso & Budhiman, 2001). Por ello, para el cambio temporal de la línea de costa se aplicó el filtro de nubosidad de forma manual empleando QGIS, mediante la visualización de cada imagen adquirida y descartando las imágenes que contenían una alta nubosidad, impidiendo observar de manera clara el área de estudio. Las imágenes satelitales que pasaron el filtro de nubosidad fueron registradas en una hoja de Excel. El nombre de las imágenes contenía información de fecha, hora y satélite. Esta información se separó en Excel mediante la opción Texto en columna. Luego, se digito los valores de marea obtenidos de la estación Data Posorja, a partir de las fechas

de las imágenes satelitales con la hora de pleamar y bajamar junto a sus respectivas alturas de marea. Debido a que, las imágenes no son captada por los satélites en la hora exacta de la pleamar y bajamar, se necesitó establecer la altura de marea en las imágenes mediante las ecuaciones (Kun Yu, 2011):

Tabla 2.3. Ecuaciones para estimar la altura de marea.

PARÁMETRO	VARIABLE	Caso 1	Caso 2
		Si H_p se encuentra próximo a H_{IS}	Si H_B se encuentra próximo a H_{IS} ;
Duración de la marea (D_t)	H_p = Hora de la pleamar H_B = Hora de la bajamar		$D_t = H_p - H_B$
Diferencia temporal (D)	H_{IS} = Hora de la imagen satelital.	$D = H_p - H_{IS}$	$D = H_{IS} - H_B$
Amplitud (A)	A_p = Altura de marea en pleamar (m). A_B = Altura de marea en bajamar (m).		$A = A_p - A_B$
Factor de Corrección (C)		$C = \left A * \frac{1}{2} * \left[1 - \cos \left(\pi * \frac{D}{D_t} \right) \right] \right $	
Altura de Marea de la Imágen Satelital (A_{IS})		$A_{IS} = A_p - C$	$A_{IS} = A_B - C$

Para aplicar el filtro por pendiente se usó la pendiente más baja por cada tipo de geomorfología. Además, seleccionamos la mayor resolución espacial entre las imágenes satelitales, es decir, el menor tamaño del pixel (10 m).

Posteriormente, para filtrar las imágenes por marea, se estableció un valor de altura de marea como referencia. Esta referencia se basó en la altura de marea de la imagen 2003, permitiéndonos calcular el rango de marea mediante la fórmula:

$$Rango = \frac{Pediente(\%)}{Resolucion\ espacial\ (m)} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

El resultado de la formula (1) se utilizó para calcular el límite inferior de la altura de marea permitido para las imágenes mediante la ecuación:

$$Limite\ Inferior = Referencia - Rango \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Las imágenes satelitales con valores de altura de marea entre el valor de referencia y el límite inferior fueron utilizadas para la georreferenciación en el programa ArcMap. Para la georreferenciación se seleccionó como base una imagen del satélite Sentinel 2 en cada zona, empleando puntos de control y aplicando la transformación de Polinomio Cero. Posteriormente, se extrajo la línea de costa de las imágenes georreferenciadas mediante el código en Júpiter Notebook en una capa vectorial (Línea) por zona. Esta capa se editó en el programa ArcMap, eliminando y cortando las líneas ubicadas fuera la línea de costa. Además, se creó una línea de referencia con respecto al set de líneas de costa. Las capas vectoriales contenían las líneas de costa temporales y junto a la línea de referencia se suavizaron mediante la herramienta Suavizar Líneas. Después, se crearon geodatabases para guardar las líneas de costa temporales y la línea de referencia suavizadas para cada zona.

Posteriormente, se crearon transectas equidistantes cada 50 m tomando como punto de partida la línea de referencia, estimando las tasas de erosión o acreción basándose en las líneas de costa temporales mediante la herramienta DSAS. Previo, a la estimación de las tasas se incluyó el valor de error total en cada imagen mediante la ecuación (Karim Nassar, 2018):

$$E_T = \sqrt{E_M^2 + E_G^2 + E_P^2} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Donde:

E_T = Error total

E_M = Error por pendiente y marea.

E_G = Error por georreferenciación.

E_P = Error por tamaño del pixel.

2.3.3.5 Aumento del nivel relativo del mar.

El valor para esta variable fue adquirido mediante el sitio web Tides and Currents propiedad de la NOAA, el cual, utiliza los datos mensuales de diferentes estaciones mareográficas y realiza una tendencia lineal a largo plazo de cada estación con un intervalo de confianza del 95%. Para digitalizar el aumento del nivel relativo del mar se empleó QGIS. Por ello, se creó una capa vectorial (Línea) con el sistema de coordenadas WGS84/UTM zone 17S. Para iniciar a trazar la línea se utilizó la opción Conmutar edición y Añadir Línea colocado como base el mapa de Google Satélite para identificar el inicio de la berma.

2.3.3.6 Nivel de medio de marea.

Los datos del nivel medio de marea fueron extraídos del sitio web BLUE EARTH DATA y suministrados por el GLOSSIS que provee pronósticos del nivel del agua con cobertura global mediante el Modelo Global de Mareas y Marejadas (GTSM).

El modelo GTSM se desarrolla con delft3D Flexible Mesh Suite (Delft3D FM), y usa una rejilla esférica no estructurada, para incorporar las zonas costeras con más detalle (aprox. de 5 km de resolución), que los océanos abiertos (resolución de 50 km). Este modelo fue calibrado y validado con 300 mareógrafos costeros y altímetro satelital.

En la digitalización del nivel medio de marea se dividió la zona de estudio en tres secciones, situando las estaciones mareográficas como eje central en cada división mediante la creación de una capa vectorial (Línea), siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

2.3.3.7 Altura de ola significativa.

Los datos de altura significativa de las olas fueron obtenidos del modelo WaveWatch III de la NOAA a través de la página web de BLUE EARTH DATA.

Este modelo resuelve la ecuación de equilibrio de densidad utiliza los datos provistos por las diferentes boyas. Por ello, los datos de altura de ola significativa poseen una resolución espacial aproximadamente de 20 km y la digitalización de esta información se efectuó mediante la creación de una capa vectorial (Línea), siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en el ítem 2.3.3.5.

2.3.4 Validación de datos.

La validación de datos se realizó para las variables: tasas de erosión o acreción, altura significativa de ola y rango medio de marea. Debido a que, los datos proporcionados para la geomorfología, litología, pendiente y aumento del nivel relativo del mar han sido posteriormente validados por mediciones in situ o han sido productos de modelos calibrados y validados.

Para la validación de las tasas de erosión se utilizó AQUAMONITOR: (<https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline>). Esta página muestra transectos cada 500 m a lo largo de la costa durante el período 1984-2016. Debido a que, el estudio está basado durante el periodo 2003-2021 existe una discrepancia entre los valores de tasa de erosión y acreción. Sin embargo, se mantiene la tendencia de las zonas que muestran erosión o acreción, es decir; tanto en AQUAMONITOR como en las tasas obtenidas en este estudio poseen erosión o acreción en las mismas áreas.

Para la validación de la altura de ola significativa y el rango medio de marea se empleó los informes elaborados por el INOCAR. En el acta oceanográfica “Caracterización oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la Punta del Morro y Jaramijó, Ecuador”, se muestra los datos obtenidos in situ en diferentes áreas de la zona de estudio, estos valores son próximos a los datos globales adquiridos. El rango medio de marea obtenido de datos globales posee valores cercanos a los valores obtenidos por las estaciones mareográficas ubicadas en la zona de estudio.

2.3.5 Categorización.

El proceso de categorización de variables se realizó mediante el criterio de Gornitz (1991), para la información recopilada de las distintas variables del área de

estudio. Categorizando cada variable mediante los valores entre los rangos de 1 a 5, indicando una baja susceptibilidad (1) hasta la más alta susceptibilidad (5), dependiendo de las características de la zona de estudio.

2.3.6 Cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI).

Para calcular el índice de vulnerabilidad costera se utilizaron los valores de categorización de cada variable establecidos en el ítem 2.3.6., empleando la ecuación siguiente (Paola, Aucelli, Benassai, & Rodriguez, 2014):

$$CVI = \sqrt{\frac{a * b * c * d * e * f * g}{7}} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Donde:

CVI = Índice de Susceptibilidad Costera.

a = Pendiente.

b = Litología.

c = Geomorfología.

d = Cambio de la Línea de Costa.

e = Aumento del nivel relativo del mar.

f = Nivel medio de marea.

g = Altura de ola significativa.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La zona de estudio abarca el borde costero de las provincias de Santa Elena y Guayas, iniciando en la puntilla de Santa Elena hasta Posorja con una longitud aproximada de 117,15 km. La geomorfología predominante cubre el 67.2% del borde costero correspondiente a acantilados altos y bajos. Respecto a los procesos litorales, el 61,6% del perfil costero existen procesos de erosión con tasa máximas de 5,16 m/año. En el resto del borde costero, la dinámica litoral ha originado zonas neutras y de acreción. El máximo valor del índice de susceptibilidad costera corresponde a zonas de playas de barrera y playas de barrera levantada alcanzando el 1,24% de la línea de costa. De acuerdo, con las características geológicas y oceanográficas, el 25,5% del borde costero es de muy alta susceptibilidad a la erosión.

3.1 Categorización de variables

Según el criterio de Gornitz, los datos registrados en la costa ecuatoriana se ubican en las categorías de moderado, bajo y muy bajo. Por este motivo, se redefinió las categorías en la Tabla 3.1 para adaptarlas a las condiciones geológicas y oceanográficas de la costa ecuatoriana.

**Tabla 3.1. Categorización de Gornitz adaptado a las características del Ecuador.
(Autores,2021)**

VARIABLE	RANGO				
	1 MUY BAJO	2 BAJO	3 MODERADO	4 ALTO	5 MUY ALTO
PENDIENTE	≥18	13.5 - 18	9.0 - 13.5	4.5 -9.0	0- 4.5
LITOLOGIA	Plutónico Volcánica (lava) Metamórficos de grado medio-alto	Metamórficos de grado bajo. Areniscas y conglomerados de Formación Ancón y Grupo Azúcar	Rocas sedimentarias Areniscas de Formación Tablazo	Sedimentos gruesos y/o mal clasificado no consolidado	Sedimentos finos no consolidado Ceniza volcánica
GEOMORFOLOGIA	Rocosas Acantilado	Acantilados medios	Acantilados bajos	Playas, Estuarios, Lagunas, Planicies aluviales	Playas de Barrera, Playas (arena), Fango, Deltas
CAMBIO DE LINEA DE COSTA	≤2.1	1.0-2.0	-1.0- +1.0	-1.1-(-2.0)	≥4.1
AUMENTO DEL NIVEL DE MAR	≤-1.1	-1.0-0.99	1.0-2.0	2.1-4.0	≤-2.0
NIVEL DE MAREA MEDIO	≤2.5	2.5 -2.6	2.6 – 2.7	2.7 - 2.8	≥ 2.8
ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA	0 - 0.9	0.9 – 1.0	1.0 - 1.1	1.1 - 1.2	≥ 1.2

3.1.1 Altura de ola significativa

En el 29,7% de la zona de estudio se registraron alturas de ola de 1,27 m ubicándose en susceptibilidad muy alta. Dentro de la categoría de susceptibilidad moderada se encontró al 9,3% del borde costero. La mayor parte de la línea de costa se situó en susceptibilidad muy bajo, teniendo una cobertura del 55,8%.

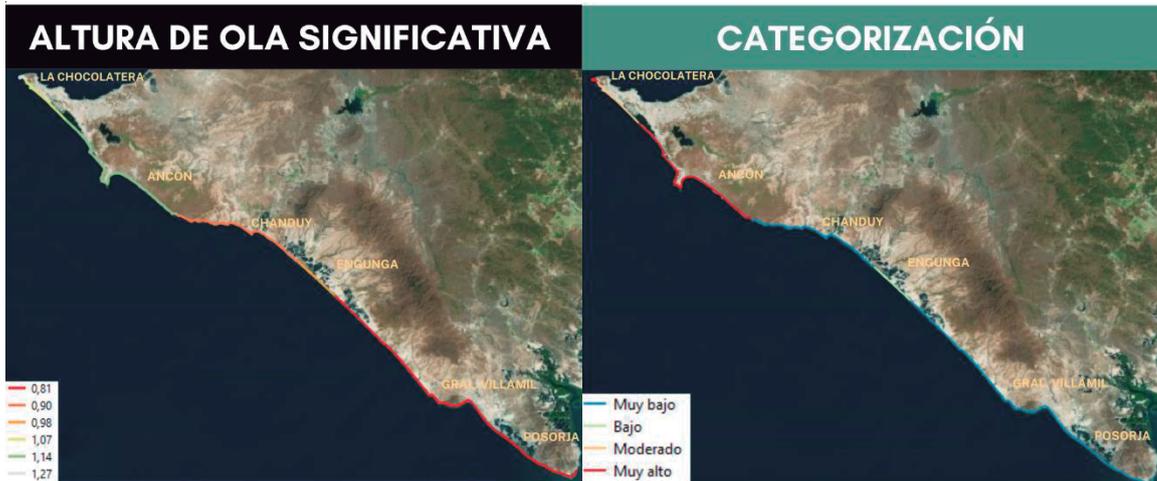


Figura 3.1. Categorización de altura de ola significativa. (Autores,2021)

3.1.2 Nivel medio de marea

El nivel medio de marea se dividió en tres clases: Alto, moderado y bajo (Figura 3.2). El 39% del perfil costero se encuentra en la categoría alta con un valor de 2,73 m desde la Chocollatera hasta aproximadamente Santa Paula. La zona de susceptibilidad baja situada en la zona San Rafael hasta Posorja cubre el 48,6% de la línea de costa con rango de marea de 2,60 m. El 12,4% restante de la línea de costa se ubicó en la categoría moderada abarcando los sectores El Tambo hasta Chanduy.



Figura 3.2. Categorización de rango medio de marea. (Autores,2021)

3.1.3 Aumento del nivel del mar

El cambio relativo del nivel medio del mar fue igual a lo largo de la zona de estudio. La información recopilada por los sensores remotos estimó un cambio de 1,22 mm/año, con respecto a la susceptibilidad se categoriza a esta variable como moderada indicado en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Categorización de aumento del nivel del mar. (Autores,2021)

3.1.4 Litología

Los resultados señalaron que la litología predominante son las areniscas de diferentes formaciones. Dentro de la zona de análisis, se encuentran las formaciones Tablazo, Tosagua, Cayo, Grupo Ancón y Grupo Azúcar. La clasificación de la susceptibilidad observada en la Figura 3.4, se encuentra en función de la litología considerando a que formación pertenece y el grado de consolidación. Las areniscas del grupo Tablazo son menos consolidadas situándolas en susceptibilidad alta. En las zonas de areniscas de formación Tosagua, se estableció la susceptibilidad modera, para el resto de las formaciones su grado de consolidación es mayor ubicándose como susceptibilidad baja.

Las zonas litológicas de arenas y depósitos aluviales se consideraron de alta susceptibilidad. Las zonas de arcillas, limos y areniscas se definieron como áreas de muy alta susceptibilidad. Por ende, el 5,9% del borde costero fue de muy alta susceptibilidad. El 62,8% de la costa se categorizo de alta susceptibilidad. Dentro de la zona de estudio, el 30,0% es de susceptibilidad baja, siendo la menor parte de la costa ecuatoriana de susceptibilidad modera (1,4%).

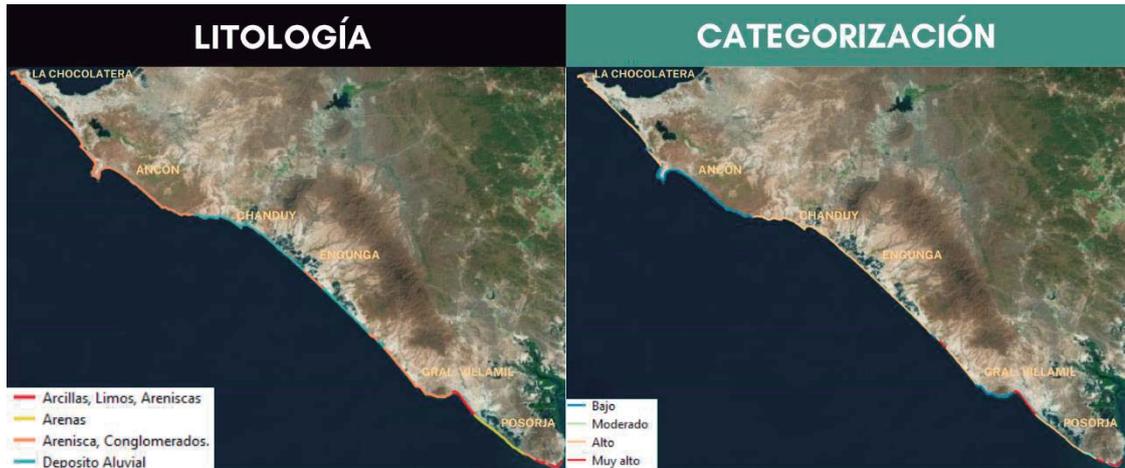


Figura 3.4. Categorización de Litología. (Autores,2021)

3.1.5 Geomorfología

La geomorfología predominante abarca el 67,2% correspondiente a acantilados altos y bajos. Sin embargo, existen zonas de Playas de Barrera y Playas de Barrera levanta cubriendo el 29,6%. El 3,2% restante correspondió a prolongaciones arenales. En la Figura 3.5, el 15,8% del borde costero son zonas de acantilados altos con susceptibilidad muy baja, las zonas de acantilados bajos poseen susceptibilidad moderada, cubriendo el 51,4% de la línea de costa, mientras que, las zonas de playas de barrera, playas de barrera levantada y prolongaciones arenales abarcan el 32,8% del borde costero establecidas como zonas de muy alta susceptibilidad.

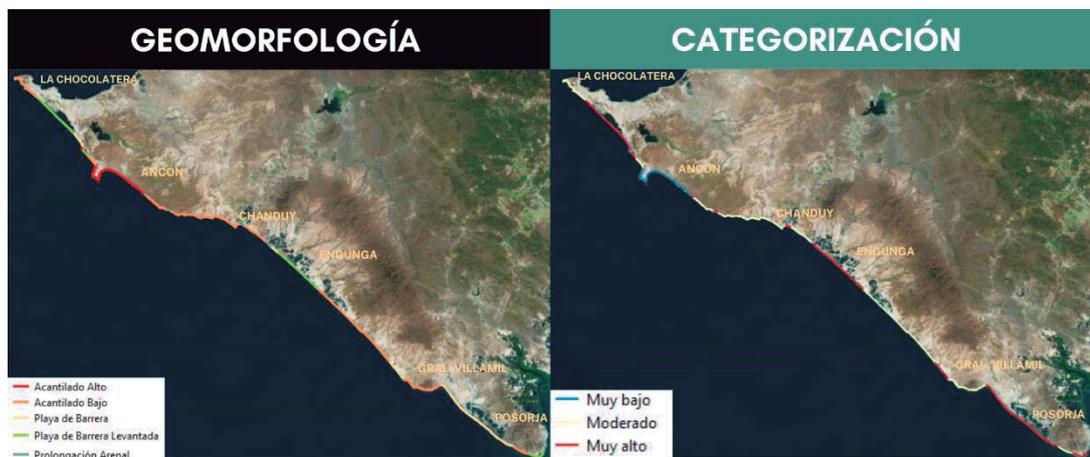


Figura 3.5. Categorización de geomorfología. (Autores,2021)

3.1.6 Pendiente

Los valores mínimos de pendientes estimados fueron de 0,87 para zonas de playas de barrera localizadas en el sector de Bahía Muyuyo hacia el interior del Golfo de Guayaquil. El máximo valor de pendiente correspondió a sectores de acantilados altos ubicado en Anconcito y Ancón de 24,16%. En la Figura 3.6, la reclasificación en los rangos para la categorización muestra que, el 22,8% fue susceptibilidad muy alta. Las zonas de alta susceptibilidad pertenecieron al 57,5%. Del borde costero, el 4,4% se estableció en susceptibilidad moderada. La zona ubicada en la categoría muy baja correspondió al 15,8%, situada en las parroquias de Anconcito y Ancón.



Figura 3.6. Categorización de pendiente. (Autores, 2021)

3.1.7 Tasa de erosión

Para el análisis de los procesos erosivos, la zona de estudio fue dividida por sus características geomorfológicas en:

- Acantilados 1 (AC1)
- Playas de Barrera 1 (PB1)
- Acantilados 2 (AC2)
- Playas de Barrera 2 (PB2)
- Acantilados 3 (AC3)
- Playas de Barrera 3 (PB3)

Se propuso que zonas donde la tasa calculada fuera menor a - 0,5 m/año son zonas afectadas por procesos erosivos, cuando las tasas anuales fluctuaban entre

-0,50 a 0,50 se definió como zona neutral y para tasas superiores a 0,50 se estableció como procesos de acreción.

3.1.7.1 *Acantilados AC1*

La dinámica del litoral ha erosionado el borde costero comprendido desde la Chocolatera hasta la Lobería mostrado en la Figura 3.7, con tasas máximas de 3,99 m/año correspondiente a la Playa de Mar Bravo. En la zona del Aeropuerto General Ulpiano Páez hasta las Piscinas de ECUASAL, se obtuvieron procesos neutros y de acreción, la tasa máxima de acreción fue de 1,91 m/año.



Figura 3.7. Tasas la zona AC1. (Autores,2021)

3.1.7.2 *Playas de Barrera PB1*

En la Figura 3.8, la dinámica litoral de los sectores próximos coincide con la zona de acantilados AC1 y la mínima tasa es 1,03 m/año. Descendiendo por el borde costero, el cambio medio de la línea de costa estimado es de 0,05 m/año que se mantuvo hasta Santa Paula. A partir de Santa Paula hasta Punta Carnero, la tasa máxima fue -2,13 m/año.

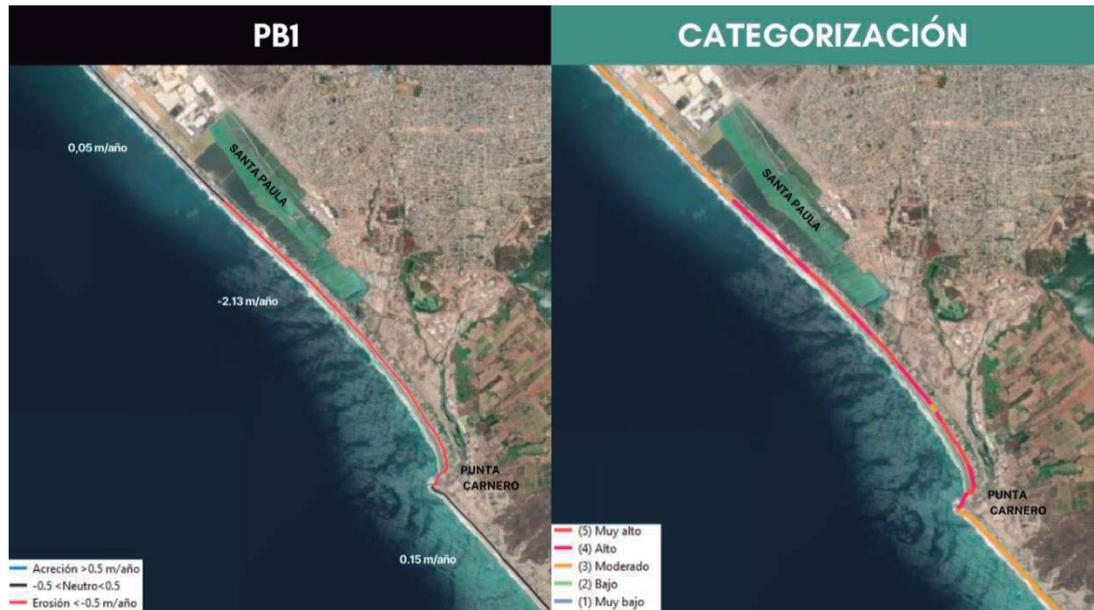


Figura 3.8. Tasas de la zona PB1. (Autores,2021)

3.1.7.3 Acantilados AC2

La Figura 3.9, muestra que la zona desde punta Carnero hasta Playa Diáblica fue una zona neutral, donde el desplazamiento máximo estimado de la línea de costa fue de 0,15 m/año. En el resto de la zona de acantilados predominaron los procesos de erosión, los valores fluctuaron entre -3,94 a -0,20 m/año. En la zona del Faro de Anconcito hubo tasas de -5,16 m/año. Adicionalmente en la zona del Puerto Pesquero de Anconcito, la implantación de la estructura modifico la dinámica, creando una zona neutra en el transporte de sedimentos.

En la punta de Chanduy existe una zona neutra de transporte de sedimentos, con tasa máxima de 0,07m/año. Dentro de la Bahía de Chanduy hasta Taguadaja, la tendencia del sector fue a la erosión; el rango en esta zona se encontró entre -3,97 a -0,36 m/año. Sin embargo, a la altura de la desembocadura del Río Pechiche existieron zonas neutras relacionada con el aporte de sedimentos del afluente.



Figura 3.9. Tasas de la zona AC2. (Autores,2021)

3.1.7.4 Playas de Barrera PB2

Dentro de esta zona prevalecieron los procesos de acreción como se muestra en la Figura 3.10, con algunas zonas neutras. Las tasas en las zonas de acreción se encontraron entre 2,05 a 0,43 m/año, mientras que, en las zonas neutras la tasa promedio fue 0,44 m/año.



Figura 3.10. Tasas de la zona PB2. (Autores,2021)

3.1.7.5 Acantilados AC3

La Figura 3.11, evidencia que desde la altura de Engunga hasta Engabao, el borde costero en su mayor parte se ha mantenido neutro, existiendo pequeñas

zonas de erosión dentro de este sector, ubicadas en las desembocaduras de esterillos, la tasa máxima estimada fue 2,16 m/año. La zona comprendida entre Engabao hasta General Villamil presentan tasa de erosión máxima estimadas en 3,99 m/año, mientras que, la mínima tasa registrada 0,55 m/año.



Figura 3.11. Tasas de la zona AC3. (Autores,2021)

3.1.7.6 Playas de Barrera PB3

La variabilidad del sector comprendido desde Esteros hasta el Botadero presentado en la Figura 3.12, posee tasas de 1,06 m/año, siendo una zona de acreción. A partir de esta zona hasta El Arenal es una zona neutra con tasa media de -0,18 m/año. Desde El Arenal hasta el Muelle de Prácticos es una zona de acreción con tasa máxima de 2,05 m/año. Descendiendo hasta Playa Varadero, la dinámica de los sedimentos fue neutral, seguida por una zona de erosión en la desembocadura y otra zona neutra. En la desembocadura y sus alrededores, la tasa máxima fue -2,49 m/año. Desde Playa Varadero hasta el inicio de Playa Delfín, la tasa fue 2,25 m/año, lo que implica que se están acumulando sedimentos. En el sector de Playa Delfín cambia la dinámica, la playa se erosiona con una tasa máxima de 1,77 m/año. Finalmente, el sector de Punta del Morro y Punta Arenas fueron afectados por la erosión, la tasa fluctúa entre el rango de 1,51 a 5,00 m/año.

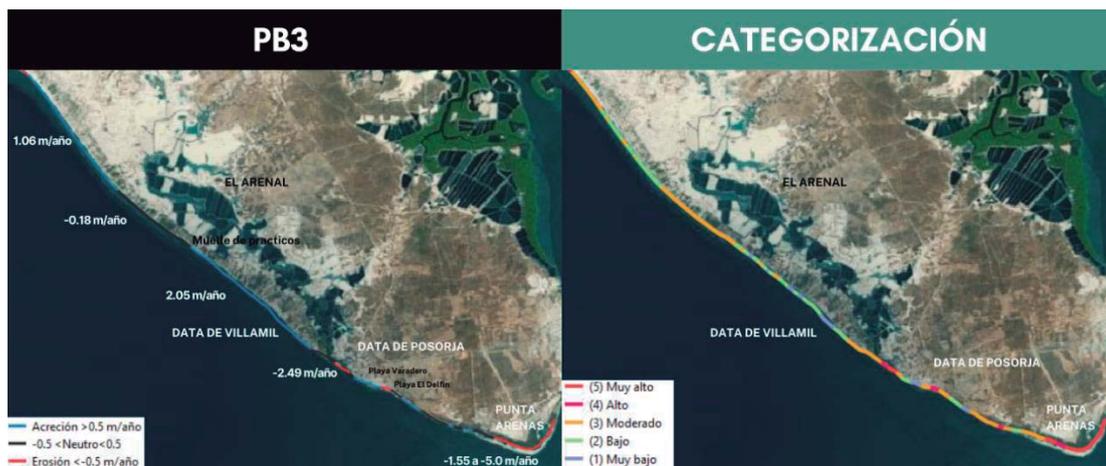


Figura 3.12. Tasas y categorización de la zona PB3. (Autores,2021)

Aplicado el criterio de Gornitz se determinó la susceptibilidad mostrada en la Figura 3.12, obteniendo el 26,6% del borde costero en muy alta susceptibilidad. En la categoría alta se ubicó el 28.6% de la costa de la zona de estudio. Las zonas neutrales se establecieron como susceptibilidad moderada y corresponden al 34.4%. Las zonas donde hubo procesos de acreción se situaron en la categoría baja representando el 10,4% de la costa y el 1% restante del borde costero se ubicó en la categoría de susceptibilidad muy baja.

3.1.8 Índice de susceptibilidad costera.

Según la Ecuación 3.4 definida por Gornitz en 1991, para calcular la susceptibilidad de la costa, los valores del índice fluctuaron entre 5 a 41. Ordenados los resultados del índice, el tercer cuartil correspondió a 23,5, este número fue de referencia, valores superiores al mismo definieron al borde costero como zonas de muy alta susceptibilidad. Aquellos valores del índice que se encontraron entre la mediana que fue 14 y el tercer cuartil 23,5 fueron asignados a la clase de susceptibilidad alta y valores menores a 14 se establecen en la categoría de baja susceptibilidad.

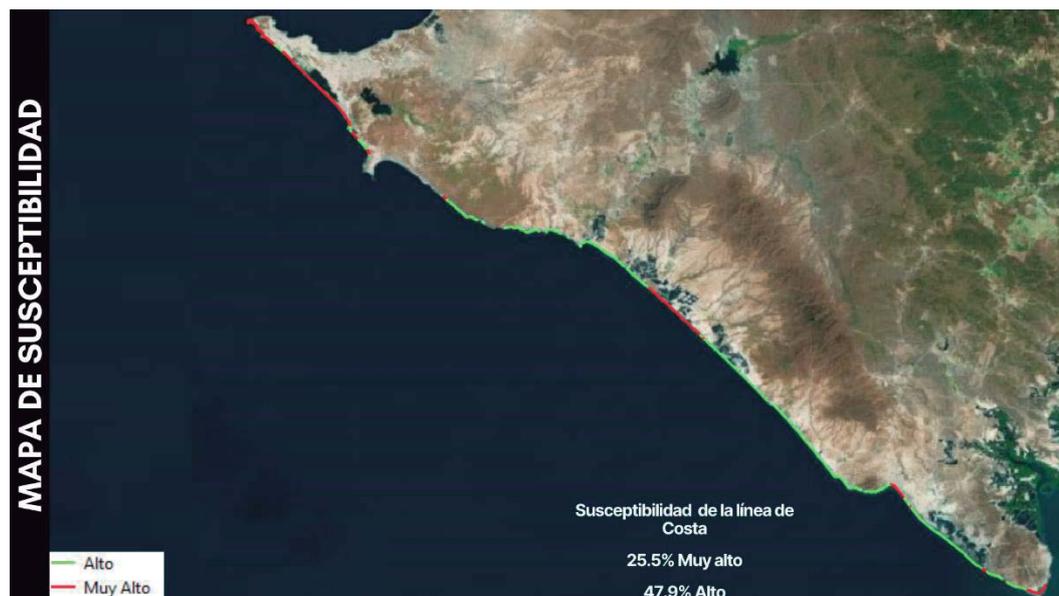


Figura 3.13. Índice de susceptibilidad a la erosión. (Autores,2021)

En la Figura 3.13, se muestra que el 25,5% de la línea de Costa es de muy alta susceptibilidad, el 47, 9 % del borde costero acorde a la clasificación se encontró en la categoría alta, mientras que, el 26,7% restante del borde costero se categoriza de baja susceptibilidad.

Zonas conocidas como La Chocolatera, La Lobería, Punta Carnero, La Playa de los Chinos, la línea de costa comprendida desde Tugaduaja hasta Engunga, la zona Central y Esteros de Playas Villamil, Punta del Morro y Punta Arenas fueron sectores que acorde a sus características geológicas y oceanográficas son de muy alta susceptibilidad.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones:

La geomorfología predominante de la zona de estudio son los acantilados bajos y altos con un 67.2% mientras que el 42.8 % se encuentre cubierto por playas de barrera, playa barrera levantada y prolongación arenal, denotando que la mayor parte de la zona es menos susceptible ante los procesos de erosión. Sin embargo, las zonas de Punta Carnero, Playa de los Chinos, Chanduy, Data Villamil, Data Posorja, entre otras se encuentran dentro del 42.8 % que debido a que son playa de barrera y prolongación arenal son zonas de muy alta susceptibilidad ante los procesos de erosión.

En base a los valores de pendiente obtenidos en la zona de estudio, se presenta una relación con las formas geológicas del área, ya que, los acantilados bajos y altos presentan pendientes máximas de 24,17%, mientras que, las playas de barrera poseen pendientes mínimas de 2,08%. Dado a que, se realizó una recategorización en el criterio de Gornitz, la mayor parte de las zonas ubicadas en el área de estudio como: La chocolatera, la Lobería, Punta Carnero, Anconcito, Chanduy, Engabao, General Villamil, Data Villamil, entre otras poseen alta y muy alta susceptibilidad ante los procesos de erosión.

El aumento del nivel del mar estimado es 1,22 mm/año según lo pronosticado por la institución "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA). Este valor dentro del criterio de Gornitz se encuentra categorizado como moderado, lo implica que este parámetro posee una baja influencia dentro del índice de vulnerabilidad costera.

La litología presente en la zona de estudio son las areniscas, conglomerados provenientes de la formación Tablazo y Grupo Ancón con el 57% y los sedimentos de depósitos aluviales y arenas poseen un 42% mientras que areniscas, grauvacas, chert de la formación Cayo representa el 1%. Dado a que, se realizó una adaptación

de la categorización del criterio de Gornitz, las zonas de Salinas, Anconcito, Ancón, entre otras presenta una baja susceptibilidad en los procesos de erosión debido a que son sedimentos de mayor grado de consolidación.

Las zonas de muy alta susceptibilidad definidas por la variable de altura de ola significativa son: La chocolatera, Playa del Mar Bravo, Punta Carnero, Ancón, Anconcito, entre otras que representan el 29,7%. Sin embargo, las zonas como: La Lobería, Santa Paula, etc. representan el 9,3% que posee susceptibilidad moderada, lo que significa que la mayor parte de las zonas costeras como: Chanduy, Engabao, Engunga, General Villamil, Data Posorja, etc. poseen muy baja susceptibilidad teniendo una cobertura del 55,8%.

De los resultados obtenidos del nivel medio de marea, las zonas ubicadas desde San Rafael hasta Posorja tienen baja susceptibilidad representando el 48,6% del borde costero, mientras que, las zonas desde la Chocolatera hasta aproximadamente Santa Paula se categorizada como alto, ya que, el nivel medio de marea aproximado es de 2.73 m, indicando que la zona es altamente susceptible ante los procesos erosivos.

En base a los resultados obtenidos del cambio de línea de costa, la tasa de erosión adquirida de una serie de tiempo de aproximadamente de 20 años, indica que, las zonas de La Chocolatera, Playa de Mar Bravo, Punta Carnero, Anconcito, Ancón, Chanduy, Engabao, General Villamil, entre otras presentan tasas de erosión máximas de 3,37 m/año, lo que implica que la zona de estudio manifiesta procesos de alta erosión. El 62% de las zonas expuestas a procesos de erosión son acantilado bajos y altos. Sin embargo, las zonas de Tuguadua, Engunga, Aeropuerto Upiano Paéz, Playas Villamil, Data Villamil, Playa Varadero, entre otras están expuestas a procesos de acreción con tasas máximas de 3,06 m/año representando el 16% de la zona de estudio. La geomorfología presente en este proceso a acreción son playa de barrera y prolongación arenal. El 23% de la zona de estudio se encuentra en un estado neutro, es decir que, las zonas de salpipil, zona sur de Punta Carnero, La Diablica, Punta la Tintina, El Arenal y en sectores de Bahía Muyuyo no presentan procesos de erosión ni acreción y la predominancia

de la forma geológica de estas zonas son en su mayoría playa de barrera levantada y acantilados (bajo y alto).

Se concluye que, basándose en los resultados obtenidos de la categorización de variables, mediante el criterio de Gornitz adaptado a las características geológicas y oceanográficas del Ecuador, se demuestra que, la mayor parte de la zona de estudio muestra susceptibilidad alta ante los procesos de erosión, ya que, el 48% de las zonas se encuentran expuestas a una altura de ola significativa máxima de 1.14, rangos de marea que varían de 2.60 m a 2.73 m, presentando geomorfologías como acantilados bajos y altos que poseen pendiente que fluctúan de 1,65 % a 13,95% con predominancia de areniscas y conglomerados. Además, estas zonas presentan procesos alto de erosión, ya que, las tasas de erosión estimadas para algunos sectores de la zona de estudio son 3,99 m/año.

4.2 Recomendaciones

- Emplear mediciones in situ para la pendiente del perfil de playa u obtener una batimetría y topografía de mejor resolución con el propósito de obtener resultados más exactos para la estimación de la susceptibilidad del borde costero.
- A pesar de validar los datos de nivel medio de marea y altura de ola significativa, se debe considerar realizar mediciones in situ, ya que, las condiciones oceanográficas que encuentran influenciadas por el cambio climático que sucede a nivel global.
- Usar imágenes satelitales con mayor resolución, es decir; obtener imágenes de otros sensores remotos como: Spot y WORLDVIEW, para contar con una mayor cantidad de imágenes y disminuir el porcentaje de error que posee la línea de costa en los diferentes años.
- Para proyectos de investigación posteriores en la zona de estudio se puede considerar estudios de transporte de sedimentos y considerar ampliar el estudio incorporando los parámetros sociales para observar la variabilidad de las zonas más susceptibles ante los procesos de erosivos y como se ve influenciado por las actividades antropogénicas y los asentamientos humanos en esta región.

- Analizar posibles soluciones para disminuir las tasas de erosión en las zonas que presentan fuertes procesos erosivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Boothroyd, J., & Ayón, H. (1994). *BIBLIOTEC IMARPE*. Obtenido de Características de la línea costera del Ecuador y recomendaciones para su manejo : Shoreline characteristics and management recommendatrions for the coast of Ecuador: https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=3153
- Deltares. (2020). *BlueEarthData*. Obtenido de BlueEarthData: <https://www.deltares.nl/en/software/blueearth-data/>
- Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. (2018). *ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES LANDSAT*. Obtenido de ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES LANDSAT.: https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf
- Earth Observing System. (2021). *LANDSAT 8*. Obtenido de LANDSAT 8: <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>
- EL UNIVERSO. (2014). Muro le cayó a 2 menores en la playa, una murió. *EL UNIVERSO*. Recuperado el 28 de Mayo de 2021, de <https://www.eluniverso.com/noticias/2014/01/16/nota/2036816/muro-le-cayo-2-menores-playa-murio/>
- EL UNIVERSO. (2015). Chanduy es un balneario abandonado. *EL UNIVERSO*. Recuperado el 2 de Junio de 2021, de <https://www.eluniverso.com/opinion/2015/01/30/nota/4496686/chanduy-es-balneario-abandonado/>
- ESA. (2015). *SENTINEL*. Obtenido de SENTINEL: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- ESRI. (2019). *Qué es ArcMap*. Obtenido de Qué es ArcMap: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.7/map/main/what-is-arcmap-.htm>
- ESRI. (2021). *¿Qué es SIG?* Obtenido de ¿Qué es SIG?: <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/introduccion>
- Garro, R. (2021). *Diccionario Náutico*. Obtenido de Diccionario Náutico: <http://www.paranauticos.com/Diccionario/P/plano-red-sondaje.htm>
- Google Earth Engine. (2021). *Google Earth Engine*. Obtenido de Google Earth Engine: <https://earthengine.google.com/>

- Gornitz, V. (1991). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031018291901730>
- INEC. (2010). *Resultados del Senso Poblacional, 2010*. Obtenido de INEC: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/resultados/>
- Karim Nassar, W. E. (2018). *ResearchGate*. Obtenido de Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinaicoast, Egypt, Marine Georesources & Geotechnology: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2018.1448912?journalCode=umgt20>
- Kun Yu, C. H.-K. (2011). *ResearchGate*. Obtenido de Shoreline changes in west-central Florida between 1987 and 2008 from Landsat observations: https://www.researchgate.net/publication/233105193_Shoreline_changes_in_west-central_Florida_between_1987_and_2008_from_Landsat_observations
- Lino, J. (2015). El mar gana terreno y achica a Chanduy. *Diario Expreso*. Recuperado el 5 de Junio de 2021, de <https://www.pressreader.com/ecuador/diario-expreso/20150419/282269548932108>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). *The State of the World's Beaches*. Obtenido de The State of the World's Beaches: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MUNDO INFORMATICO. (2020). *Las tormentas dejan a Wamberal casas frente al mar tambaleándose al borde del colapso*. Obtenido de Las tormentas dejan a Wamberal casas frente al mar tambaleándose al borde del colapso: <https://mundoinformatico.top/las-tormentas-dejan-a-wamberal-casas-frente-al-mar-tambaleandose-al-borde-del-colapso/>
- Núñez Gómez, J., Ramos Reyes, R., Barba Macías, E., & Espinoza Tenorio, A. y. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigación Geográfica, Boletín de Instituto de Geografía, UNAM*, 70 - 85. doi:10.14350/50172
- Ojeda Zújar, J., Álvarez Franco, J., Cajaraville, M., & Fraile Jurado, P. (2009). Uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ante una potencial subida del Nivel del Mar en la costa Andaluza, España. *Revista Internaciol de Ciencia y Tecnología de ka Información Geográfica*, 83 - 100. Recuperado el 20 de Mayo de 2021

- Paola, G. D., Aucelli, P., Benassai, G., & Rodriguez, G. (2014). *ResearchGate*. Obtenido de Coastal vulnerability to wave storms of Sele littoral plain (southern Italy): https://www.researchgate.net/publication/266031092_Coastal_vulnerability_to_wave_storms_of_Sele_littoral_plain_southern_Italy
- Pérez, D. D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos- Aplicaciones en Geología*. Obtenido de Introducción a los Sensores Remotos- Aplicaciones en Geología: http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf
- Portilla, A. (2021). *Erosion Costera en Libertad*. Libertad, Santa Elena, Ecuador.
- QGIS. (2021). *QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio*. Obtenido de QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Rondón, G. (2011). Análisis de la variación temporal de la línea de costa y caracterización de la geomorfología litoral: bahía de Paita, Perú 1946-2007. *PUCP*, 93-114. Obtenido de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/3501>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). *PLAN DE ORDENAMIENTO DEL PLAN DEL ESPACIO MARINO COSTERO*. Obtenido de PLAN DE ORDENAMIENTO DEL PLAN DEL ESPACIO MARINO COSTERO.: <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/07/Plan-de-Ordenamiento-del-Espacio-Marino-Costero.pdf>
- Secretaría Técnica Planifica Ecuador. (2020). *Plan de Ordenamiento del Espacio Marino Costero 2017 - 2030. Versión Resumida*. Quito, Pichinca, Ecuador . Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/04/Version-resumida-Plan-de-Ordenamiento-del-Espacio-Marino-Costero-2017-%E2%80%932030-POEMC.pdf>
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMACION. (2014). *Archivos de Información Geográfica*. Obtenido de Archivos de Información Geográfica.: <https://sni.gob.ec/coberturas>
- The Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. (2021). *Global Sea Level Observing System*. Obtenido de Global Sea Level Observing System: <https://www.gloss-sealevel.org/>
- USGS. (2018). *Sistema de análisis de línea costera digital (DSAS)*. Obtenido de Sistema de análisis de línea costera digital (DSAS): https://www.usgs.gov/centers/whcms/science/digital-shoreline-analysis-system-dsas?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009). *CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA DE LA COSTA CENTRAL ECUATORIANA ENTRE LA PUNTA DEL MORRO Y JARAMIJÓ, ECUADOR*. Obtenido de *CARACTERIZACIÓN OCEANOGRÁFICA DE LA COSTA CENTRAL ECUATORIANA ENTRE LA PUNTA DEL MORRO Y JARAMIJÓ, ECUADOR*: https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta15/OCE1501_2.pdf

Vos, K., Splinter, K., Leaman, C., Bak, S., Hereñú, D., borgstad, & ianlturner. (2021). *zenodo*. Obtenido de zenodo: <https://zenodo.org/record/4649450#.YUAVkp1KjIV>

Winarso, G., & Budhiman, S. (2001). The potential application of remote sensing data for coastal study. *Asian Conference on Remote Sensing*. Singapore.

APÉNDICES

APÉNDICE A
INFORMACIÓN RECOPIADA

ZONA	COORDENADAS	
	LONGITUD	LATITUD
AC1	81,007677	-2,175726
	80,967201	-2,214647
	80,985975	-2,228253
	81,023758	-2,187934
PB1	80,875038	-2,291914
	80,791045	-2,352422
	80,852415	-2,408074
	80,950139	-2,317101
AC2.1	80,791045	-2,352422
	80,713914	-2,374278
	80,733788	-2,411096
	80,824614	-2,380433
AC2.2	80,713914	-2,374278
	80,633533	-2,413313
	80,663292	-2,439713
	80,733788	-2,411096
AC2.3	80,561655	-2,481119
	80,466725	-2,565156
	80,516788	-2,600104
	80,594356	-2,509560
PB2	80,466725	-2,565156
	80,377845	-2,641063
	80,408524	-2,670320
	80,516788	-2,600104
AC3.1	80,967201	-2,214647
	80,875038	-2,291914
	80,914831	-2,308085
	80,985975	-2,228253
AC3.2	80,633553	-2,413313
	80,561655	-2,481119
	80,594356	-2,509560
	80,669887	-2,446627
PB3	80,390003	-2,621891
	80,232806	-2,733578
	80,259847	-2,763648
	80,416911	-2,649457

Zonas de imágenes satelitales, Google Earth Engine

APÉNDICE B
IMÁGENES SATELITALES.

ZONA	FECHA	HORA	SENSOR	ERROR PEND.	ERROR ARC	PIXEL	ERROR TOTAL
AC1	17/2/2003	15:21:57	L7	0,447	3,72	15	15,461
AC1	6/1/2016	15:55:42	S2	0,447	0	10	10,010
AC1	24/5/2020	15:54:02	S2	0,447	0,28	10	10,014
AC1	31/12/2016	15:52:15	S2	0,447	0,38	10	10,017
AC1	4/4/2020	15:53:52	S2	0,447	4	10	10,780
AC1	27/3/2014	15:33:31	L8	0,447	3,94	15	15,515
AC1	3/5/2016	15:32:54	L8	0,447	3,87	15	15,498
AC1	30/4/2019	15:54:00	S2	0,447	0,47	10	10,021
AC1	11/11/2016	15:33:36	L8	0,447	4,04	15	15,541
AC1	8/12/2014	15:33:24	L8	0,447	3,91	15	15,508
AC1	5/2/2019	15:33:02	L8	0,447	3,06	15	15,315
AC2_1	17/2/2003	15:21:57	L7	0,443	3,71	15	15,458
AC2_1	9/11/2015	15:33:23	L8	0,443	3,14	15	15,332
AC2_1	24/5/2020	15:53:58	S2	0,443	0,11	10	10,010
AC2_1	8/12/2014	15:33:24	L8	0,443	3,12	15	15,327
AC2_2	3/5/2016	15:32:54	L8	0,443	3,08	15	15,319
AC2_1	30/4/2019	15:53:56	S2	0,443	0,061	10	10,010
AC2_1	31/12/2016	15:52:15	S2	0,443	0	10	10,010
AC2_1	27/3/2014	15:33:31	L8	0,443	3,19	15	15,342
AC2_1	26/10/2016	15:33:38	L8	0,443	2,45	15	15,205
AC2_2	17/2/2003	15:21:57	L7	0,443	4,59	15	15,693
AC2_2	23/7/2020	15:53:58	S2	0,443	0	10	10,010
AC2_2	22/9/2017	15:52:08	S2	0,443	0,031	10	10,010
AC2_2	14/4/2021	15:53:48	S2	0,443	0,27	10	10,013
AC2_2	31/3/2019	15:53:53	S2	0,443	2,62	10	10,347
AC2_2	8/12/2014	15:33:24	L8	0,443	2,4	15	15,197
AC2_2	26/10/2016	15:33:38	L8	0,443	4,18	15	15,578
AC2_2	5/2/2019	15:33:02	L8	0,443	5,34	15	15,928
AC2_3	17/2/2003	15:21:57	L7	0,443	4,96	15	15,805
AC2_3	5/2/2019	15:33:02	L8	0,443	3,52	15	15,414
AC2_3	8/12/2014	15:33:24	L8	0,443	2,95	15	15,294
AC2_3	23/7/2020	15:53:58	S2	0,443	0	10	10,010
AC2_3	22/9/2017	15:52:08	S2	0,443	0,12	10	10,011
AC2_3	31/3/2019	15:53:53	S2	0,443	1,41	10	10,109

ZONA	FECHA	HORA	SENSOR	ERROR PEND.	ERROR ARC	PIXEL	ERROR TOTAL
AC3_1	17/2/2003	15:21:57	L7	0,33	2,62	15	15,231
AC3_1	25/3/2021	15:53:51	S2	0,33	0,33	10	10,011
AC3_1	23/6/2020	15:53:58	S2	0,33	0,43	10	10,015
AC3_1	15/8/2016	15:35:54	L7	0,33	3,05	15	15,31
AC3_1	31/3/2019	15:53:53	S2	0,33	0	10	10,005
AC3_1	3/3/2014	15:30:03	L7	0,33	4,21	15	15,583
AC3_1	5/2/2019	15:33:02	L8	0,33	4,41	15	15,638
AC3_1	3/5/2016	15:32:54	L8	0,33	2,43	15	15,199
AC3_2	17/2/2003	15:21:57	L7	0,33	3,34	15	15,371
AC3_2	27/9/2018	15:52:15	S2	0,33	0,8	10	10,037
AC3_2	25/3/2021	15:53:51	S2	0,33	0	10	10,005
AC3_2	3/5/2016	15:32:54	L8	0,33	2,47	15	15,206
AC3_2	11/5/2013	15:35:12	L8	0,33	3,22	15	15,345
AC3_2	23/6/2020	15:53:58	S2	0,33	0,46	10	10,016
PB1	17/2/2003	15:21:57	L7	0,192	3,88	15	15,495
PB1	24/5/2020	15:53:58	S2	0,192	4,05	10	10,791
PB1	22/9/2015	15:33:15	L8	0,192	3,512	15	15,407
PB1	29/12/2016	15:33:30	L8	0,192	2,87	15	15,273
PB1	25/3/2020	15:53:49	S2	0,192	0,277	10	10,006
PB1	24/5/2020	15:53:58	S2	0,192	0,329	10	10,007
PB2	17/2/2003	15:21:57	L7	0,208	4,31	15	15,608
PB2	24/3/2016	15:35:25	L7	0,208	3,64	15	15,437
PB2	15/10/2009	15:23:25	L7	0,208	3,58	15	15,423
PB2	14/5/2011	15:26:51	L7	0,208	3,33	15	15,367
PB2	21/1/2005	15:22:40	L7	0,208	3,283	15	15,356
PB2	24/5/2020	15:53:58	S2	0,208	0,214	10	10,004
PB2	30/3/2021	15:33:03	S2	0,208	0,217	10	10,005
PB3	17/2/2003	15:21:57	L7	0,125	2,8	15	15,26
PB3	9/11/2015	15:33:23	L8	0,125	4,223	15	15,584
PB3	13/8/2019	15:53:59	S2	0,125	3,855	10	10,718
PB3	12/9/2019	15:53:53	S2	0,125	0,388	10	10,008
PB3	9/5/2020	15:53:51	S2	0,125	0,398	10	10,009
PB3	24/4/2021	15:53:47	S2	0,125	0,134	10	10,002

APÉNDICE C

FILTRO DE IMÁGENES SATELITALES POR PENDIENTE Y TAMAÑO DE PIXEL

PARAMETROS	AC1	AC2	AC3
PIXEL (m)	10	10	10
REFERENCIA (m)	2,15	2,15	2,15
PENDIENTE (%)	4,77	4,43	3,30
RANGO (m)	0,477	0,443	0,33
LIMITE INFERIOR	1,673	1,707	1,82

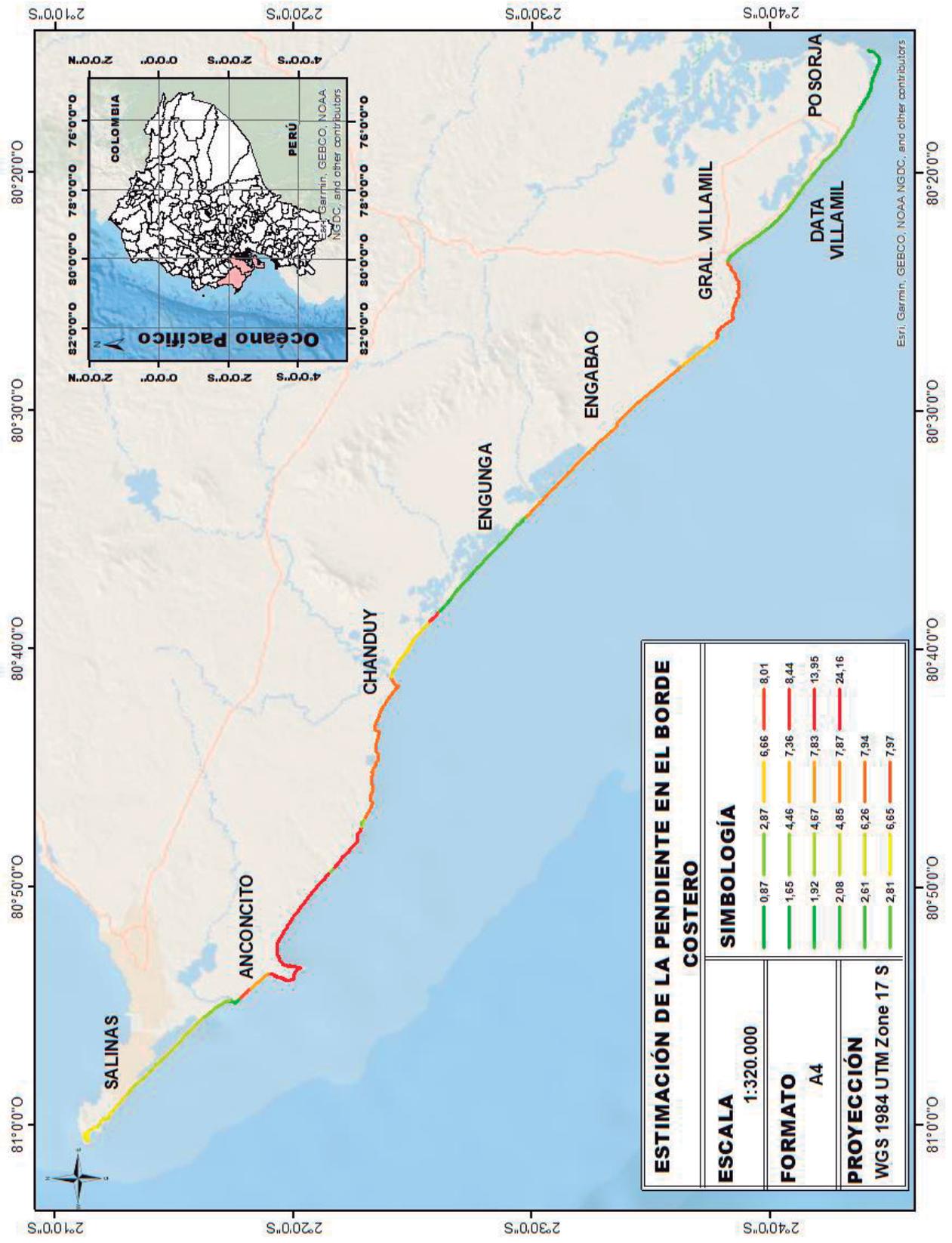
PARAMETROS	PB_1	PB_2	PB_3
PIXEL (m)	10	10	10
REFERENCIA (m)	2,15	2,15	2,15
PENDIENTE (%)	1,92	2,08	1,25
RANGO (m)	0,192	0,208	0,125
LIMITE INFERIOR	1,958	1,942	2,025

APÉNDICE D
FILTRO DE IMÁGENES SATELITALES POR MAREA.

ZONAS	RANGO DE MAREA
AC1	2,150
	1,673
AC2_1	2,15
	1,707
AC2_2	2,15
	1,707
AC2_3	2,15
	1,707
AC3_1	2,15
	1,82
AC3_2	2,15
	1,82
PB1	2,15
	1,958
PB2	2,15
	1,942
PB3	2,15
	2,025

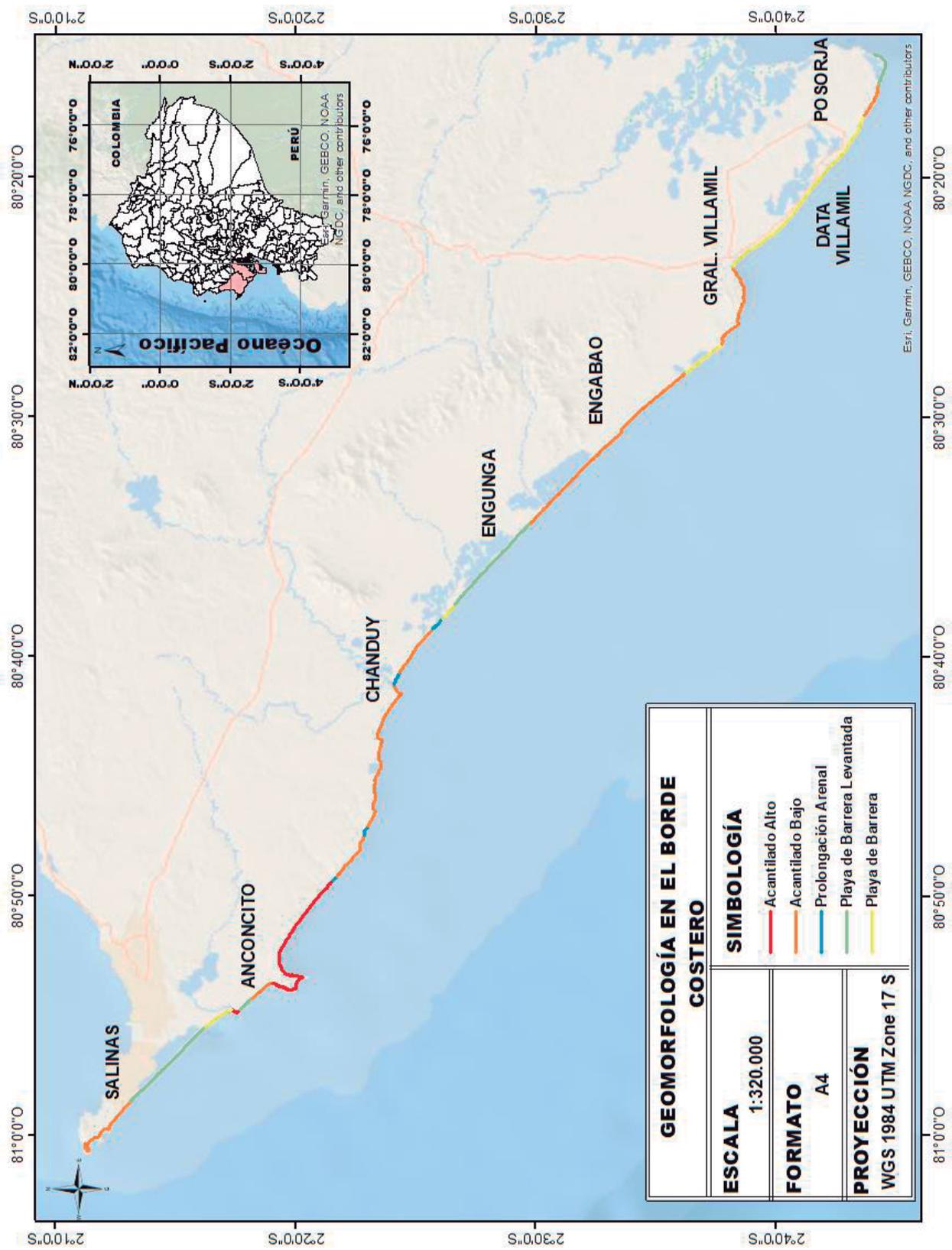
ZONA	FECHA	MAREA	ZONA	FECHA	MAREA
AC1	17/2/2003	2,14	AC3_1	17/2/2003	2,14
AC1	6/1/2016	1,75	AC3_1	25/3/2021	1,90
AC1	24/5/2020	2,00	AC3_1	23/6/2020	1,91
AC1	31/12/2016	1,82	AC3_1	15/8/2016	1,83
AC1	4/4/2020	1,68	AC3_1	31/3/2019	1,93
AC1	27/3/2014	1,97	AC3_1	3/3/2014	1,85
AC1	3/5/2016	1,85	AC3_1	5/2/2019	1,93
AC1	30/4/2019	1,74	AC3_1	3/5/2016	1,85
AC1	11/11/2016	1,69	AC3_2	17/2/2003	2,14
AC1	8/12/2014	1,73	AC3_2	27/9/2018	1,89
AC1	5/2/2019	1,93	AC3_2	25/3/2021	1,90
AC2_1	17/2/2003	2,14	AC3_2	3/5/2016	1,85
AC2_1	9/11/2015	1,85	AC3_2	11/5/2013	1,89
AC2_1	24/5/2020	2,00	AC3_2	23/6/2020	1,91
AC2_1	8/12/2014	1,73	PB1	17/2/2003	2,14
AC2_2	3/5/2016	1,85	PB1	24/5/2020	2,00
AC2_1	30/4/2019	1,74	PB1	22/9/2015	2,15
AC2_1	31/12/2016	1,82	PB1	29/12/2016	2,06
AC2_1	27/3/2014	1,97	PB1	25/3/2020	2,06
AC2_1	26/10/2016	1,74	PB1	24/5/2020	2,00
AC2_2	17/2/2003	2,14	PB2	17/2/2003	2,14
AC2_2	23/7/2020	1,76	PB2	24/3/2016	1,97
AC2_2	22/9/2017	1,83	PB2	15/10/2009	1,97
AC2_2	14/4/2021	1,81	PB2	14/5/2011	1,98
AC2_2	31/3/2019	1,73	PB2	21/1/2005	2,00
AC2_2	8/12/2014	1,73	PB2	24/5/2020	2,00
AC2_2	26/10/2016	1,74	PB2	30/3/2021	1,98
AC2_2	5/2/2019	1,93	PB3	17/2/2003	2,14
AC2_3	17/2/2003	2,14	PB3	9/11/2015	2,14
AC2_3	5/2/2019	1,93	PB3	13/8/2019	2,08
AC2_3	8/12/2014	1,73	PB3	12/9/2019	2,13
AC2_3	23/7/2020	1,76	PB3	9/5/2020	2,03
AC2_3	22/9/2017	1,83	PB3	24/4/2021	2,10
AC2_3	31/3/2019	1,73			

APÉNDICE E
VARIABLES



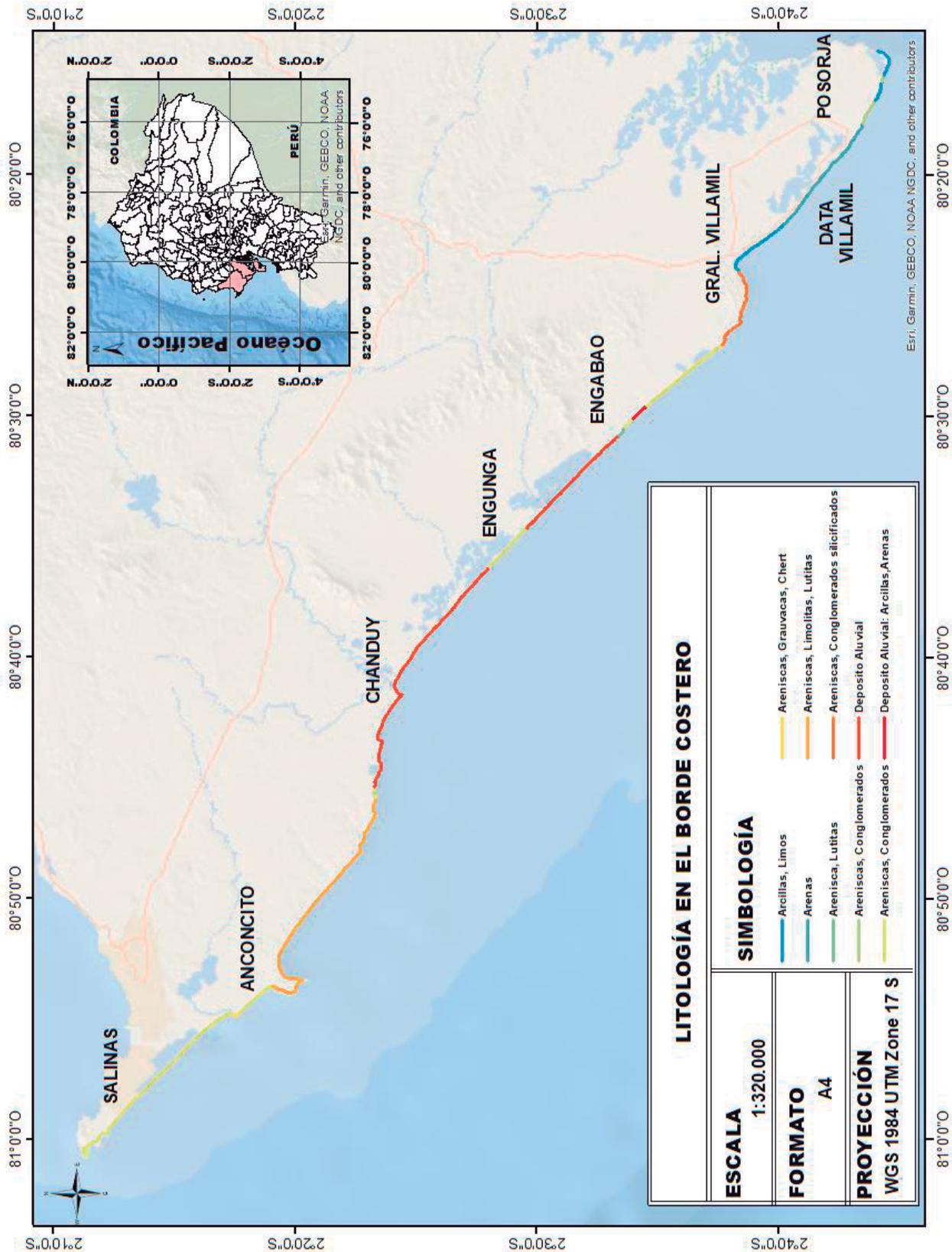
ESTIMACIÓN DE LA PENDIENTE EN EL BORDE COSTERO																									
ESCALA 1:320.000	SIMBOLOGÍA																								
FORMATO A4	<table border="0"> <tr> <td>0,87</td> <td>2,87</td> <td>6,66</td> <td>8,01</td> </tr> <tr> <td>1,65</td> <td>4,46</td> <td>7,36</td> <td>8,44</td> </tr> <tr> <td>1,92</td> <td>4,67</td> <td>7,83</td> <td>13,95</td> </tr> <tr> <td>2,08</td> <td>4,85</td> <td>7,87</td> <td>24,16</td> </tr> <tr> <td>2,61</td> <td>6,26</td> <td>7,94</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2,81</td> <td>6,65</td> <td>7,97</td> <td></td> </tr> </table>	0,87	2,87	6,66	8,01	1,65	4,46	7,36	8,44	1,92	4,67	7,83	13,95	2,08	4,85	7,87	24,16	2,61	6,26	7,94		2,81	6,65	7,97	
0,87	2,87	6,66	8,01																						
1,65	4,46	7,36	8,44																						
1,92	4,67	7,83	13,95																						
2,08	4,85	7,87	24,16																						
2,61	6,26	7,94																							
2,81	6,65	7,97																							
PROYECCIÓN WGS 1984 UTM Zone 17 S																									

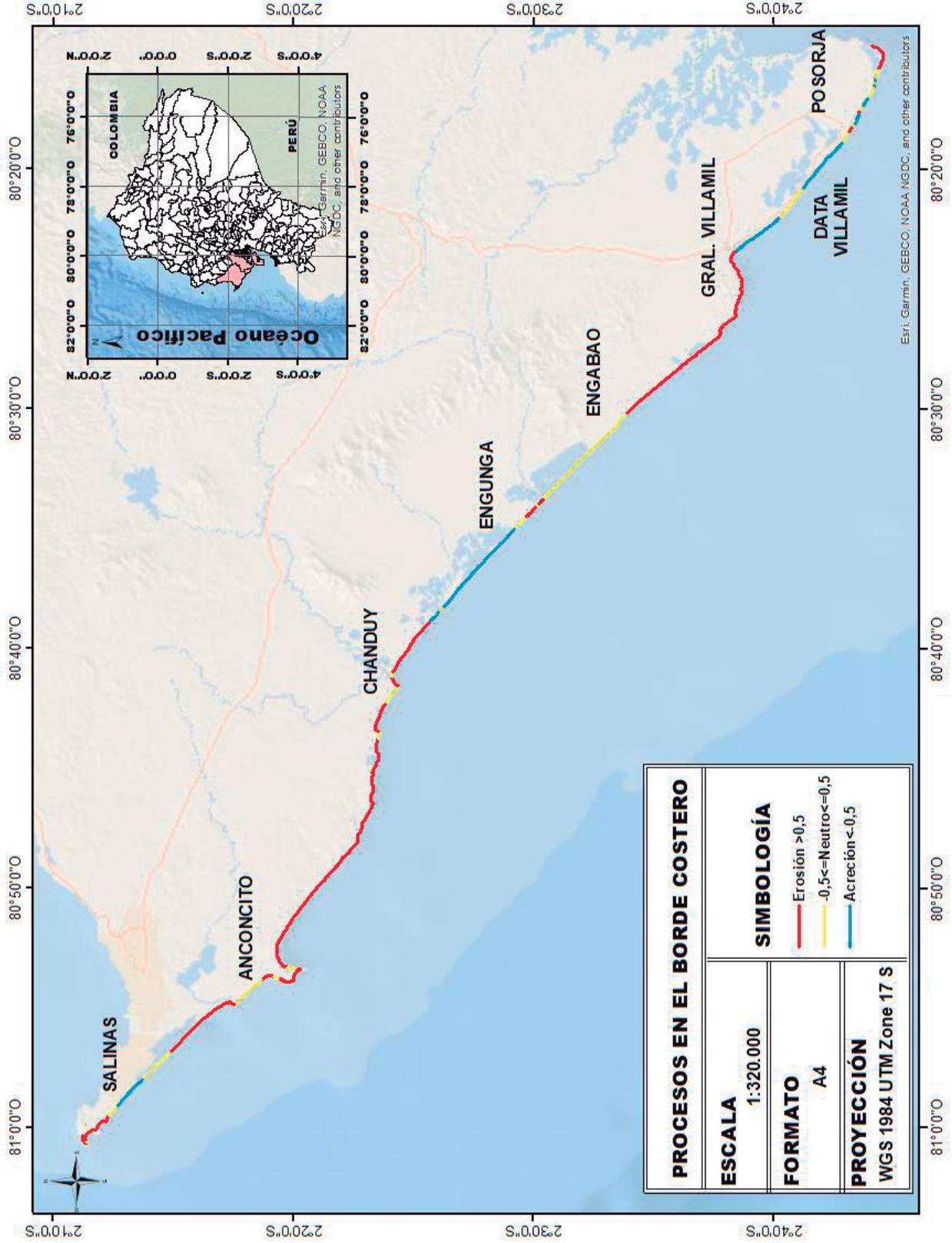
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors

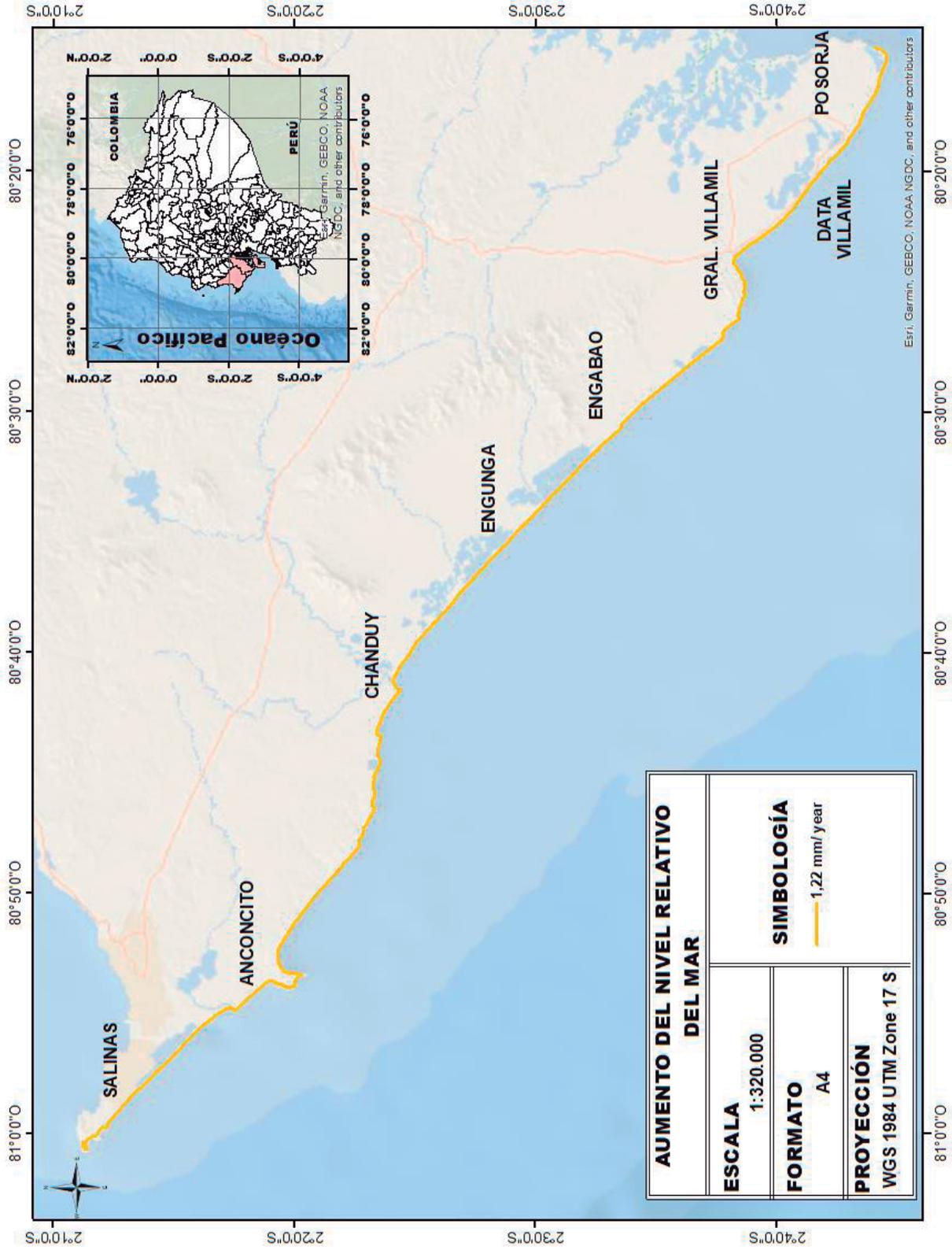


GEOMORFOLOGÍA EN EL BORDE COSTERO	
ESCALA	1:320.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	<ul style="list-style-type: none"> — Acantilado Alto — Acantilado Bajo — Prolongación Arenal — Playa de Barrera Levantada — Playa de Barrera

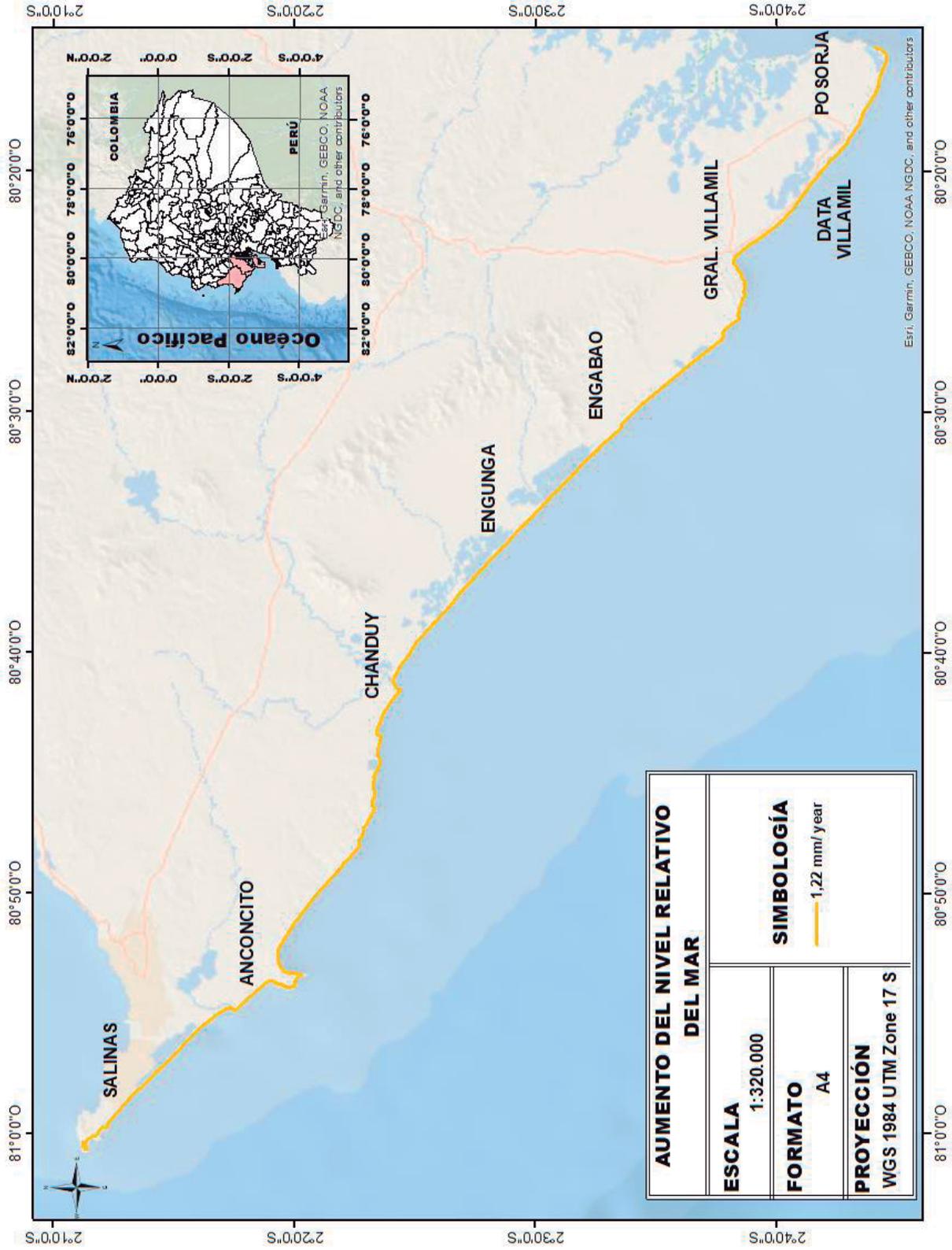
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA NGDC, and other contributors



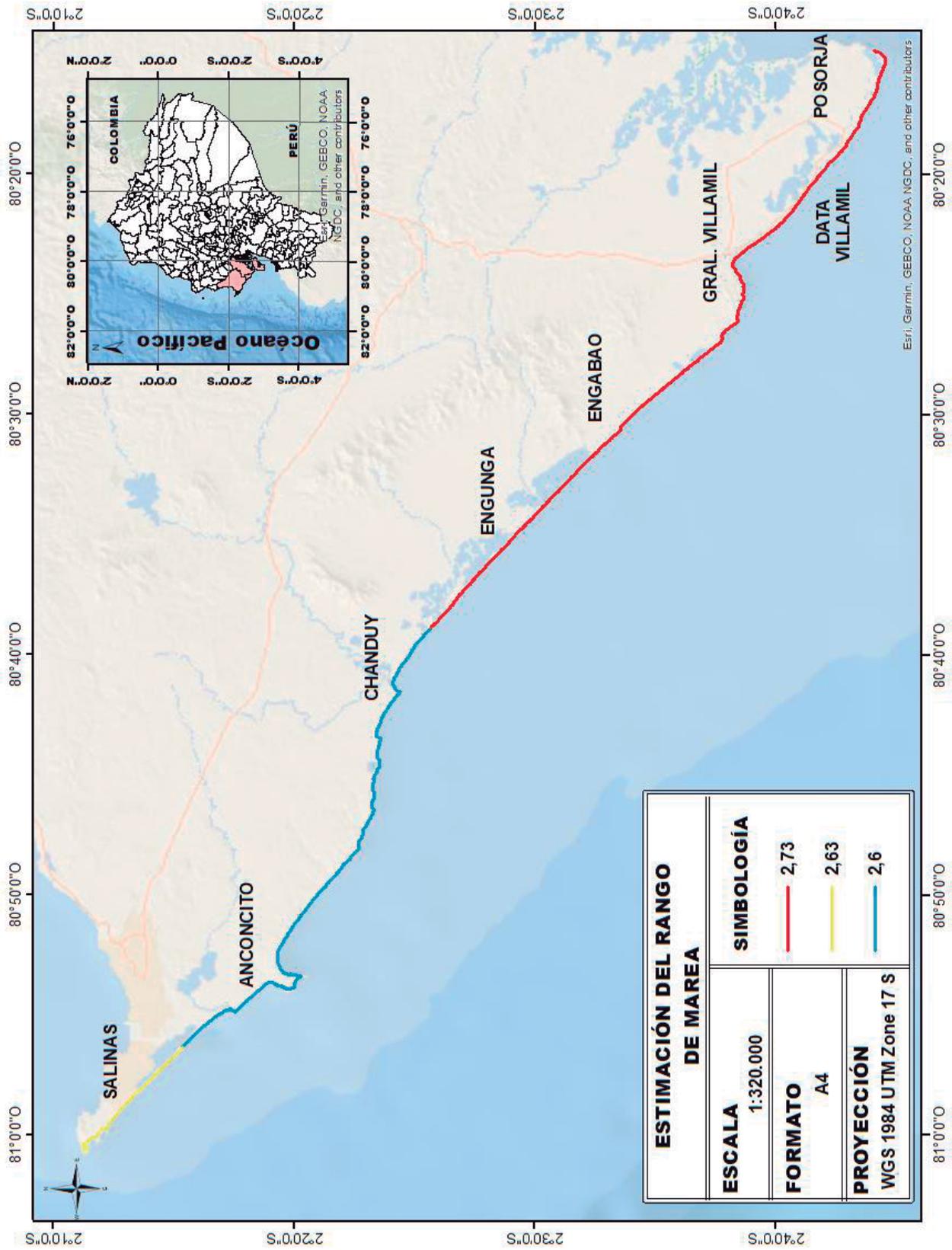


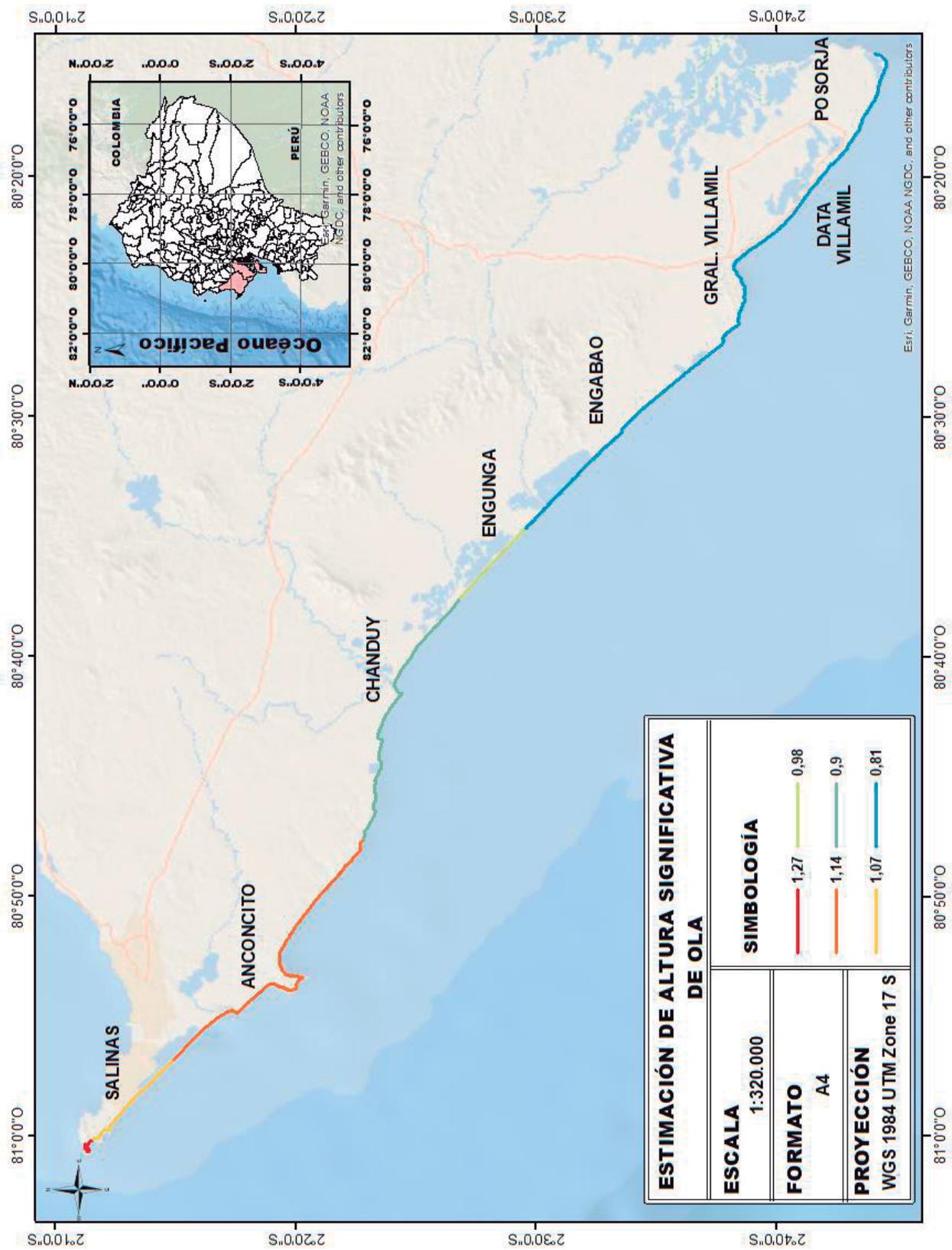


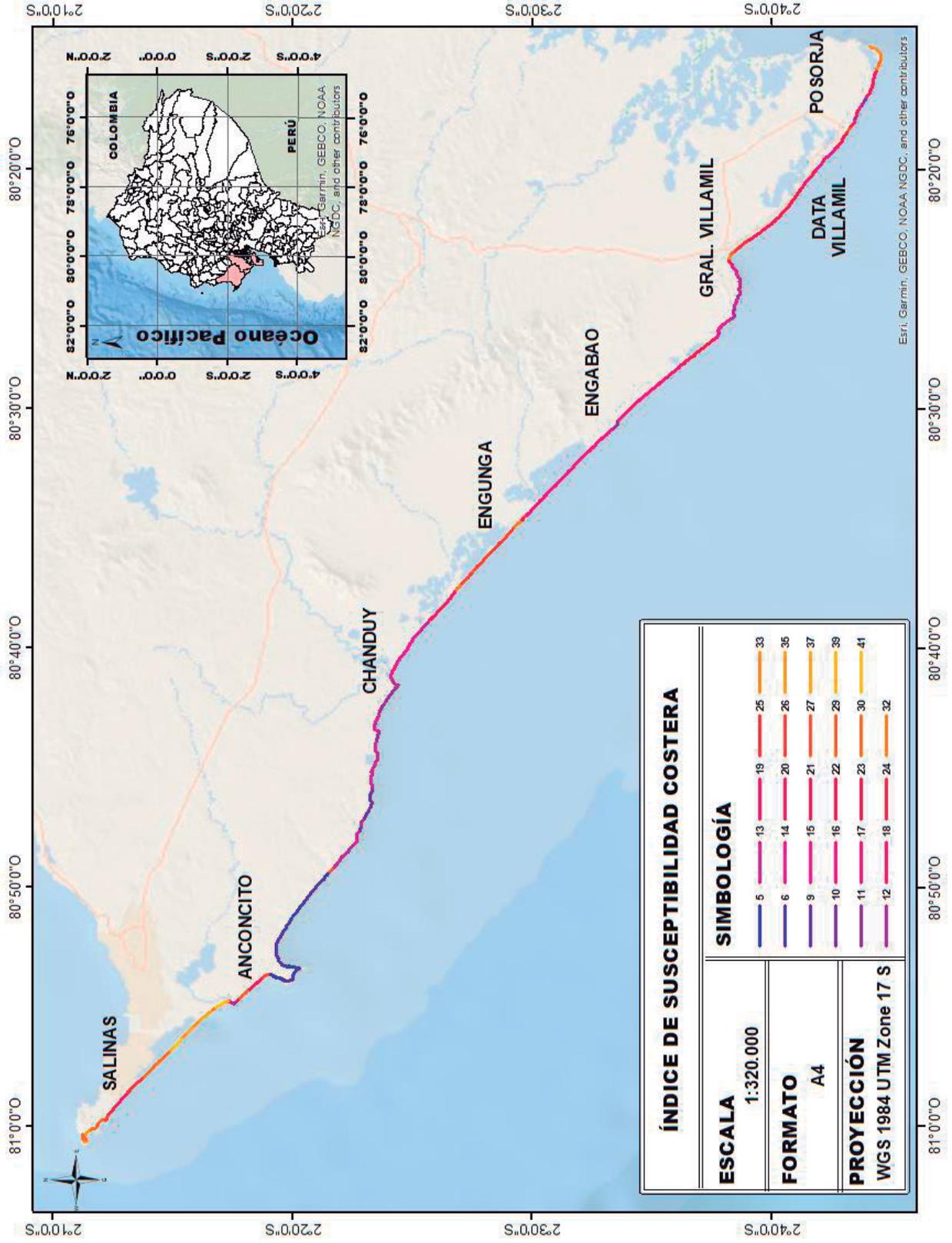
AUMENTO DEL NIVEL RELATIVO DEL MAR		
ESCALA	1:320.000	
FORMATO	A4	
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S	
SIMBOLOGÍA	 1,22 mm/year	



Esri, Garmin, GEBCO, NOAA, NGDC, and other contributors

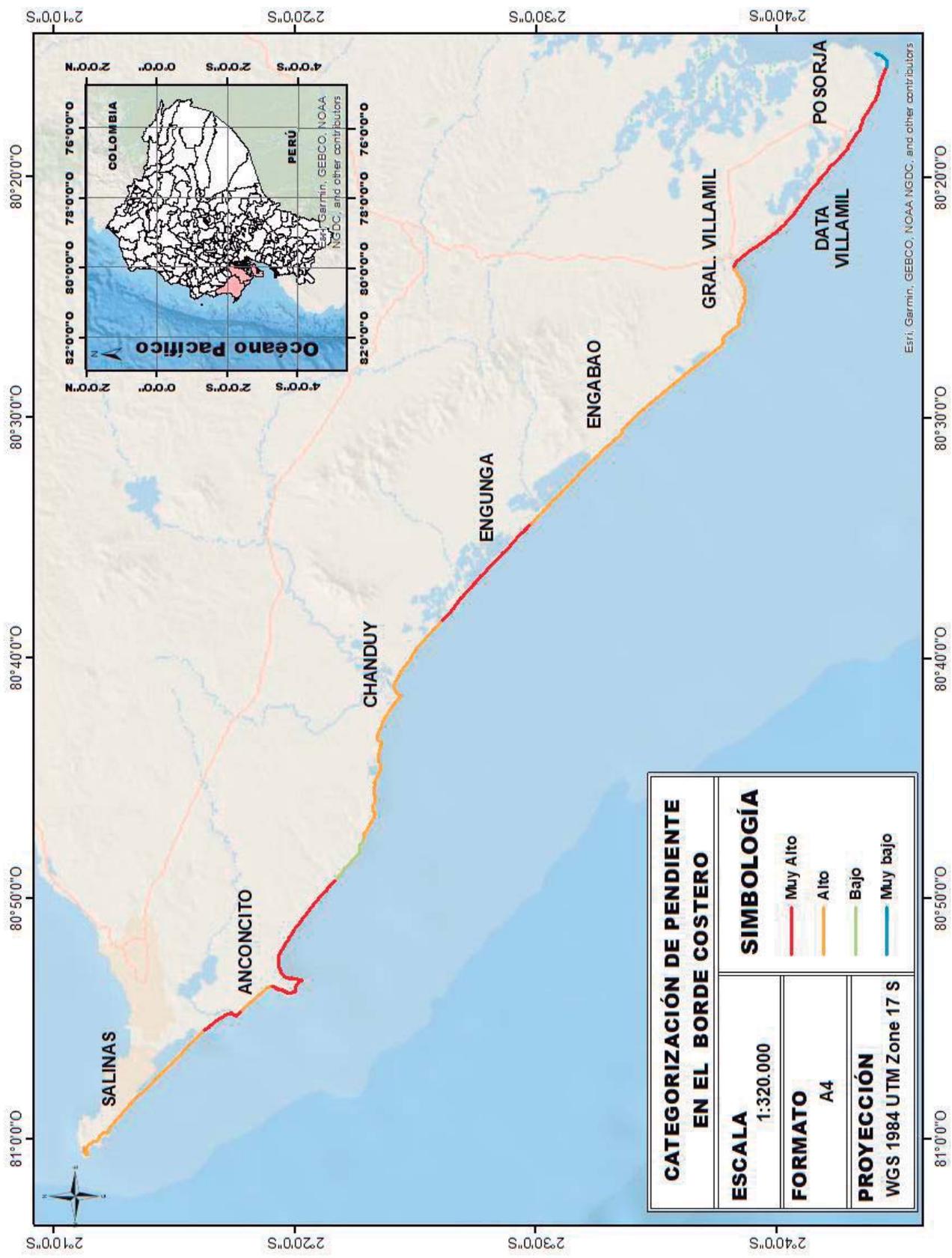






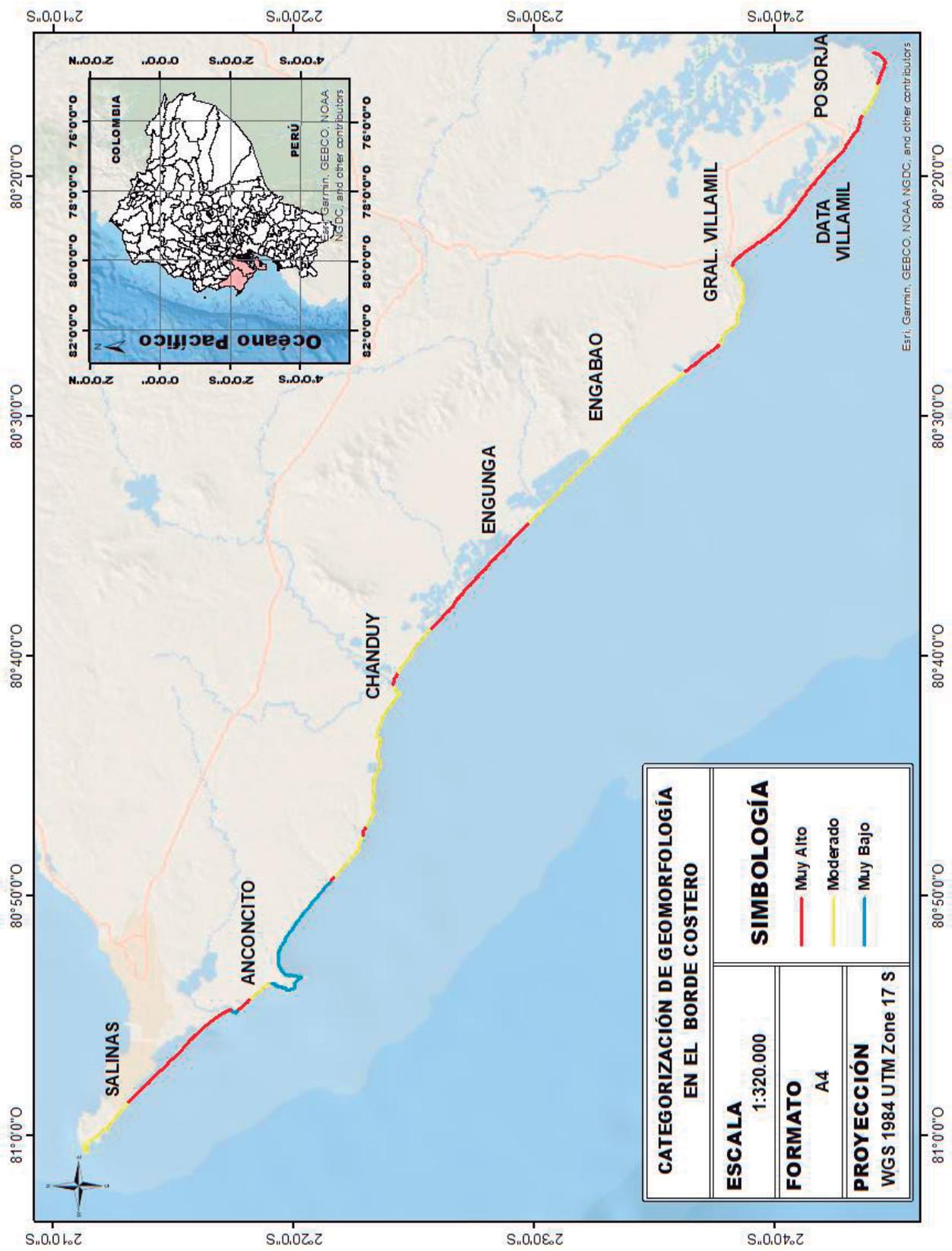
APÉNDICE F

CATEGORIZACIÓN DE GORNITZ ADAPTADO POR VARIABLE



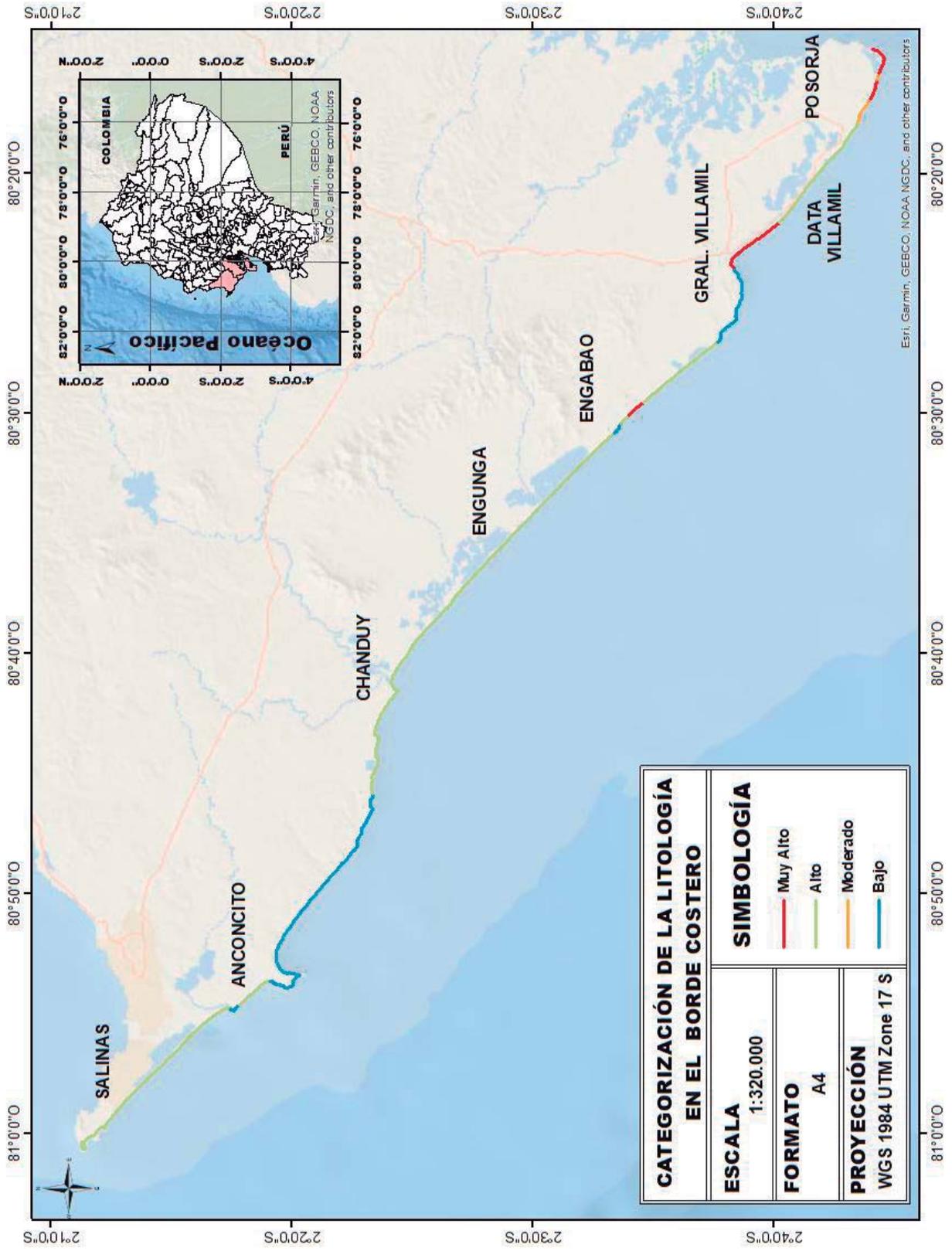
CATEGORIZACIÓN DE PENDIENTE EN EL BORDE COSTERO	
ESCALA 1:320.000	SIMBOLOGÍA
FORMATO A4	<ul style="list-style-type: none"> — Muy Alto — Alto — Bajo — Muy bajo
PROYECCIÓN WGS 1984 UTM Zone 17 S	

Esri, Garmin, GEBCO, NOAA, NGDC, and other contributors



CATEGORIZACIÓN DE GEOMORFOLOGÍA EN EL BORDE COSTERO	
ESCALA	1:320.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	
	Muy Alto
	Moderado
	Muy Bajo

Esri, Garmin, GEBCO, NOAA, NGDC, and other contributors



81°00'0"O

80°50'0"O

80°40'0"O

80°30'0"O

80°20'0"O

2°10'0"S

2°20'0"S

2°30'0"S

2°40'0"S

81°00'0"O

80°50'0"O

80°40'0"O

80°30'0"O

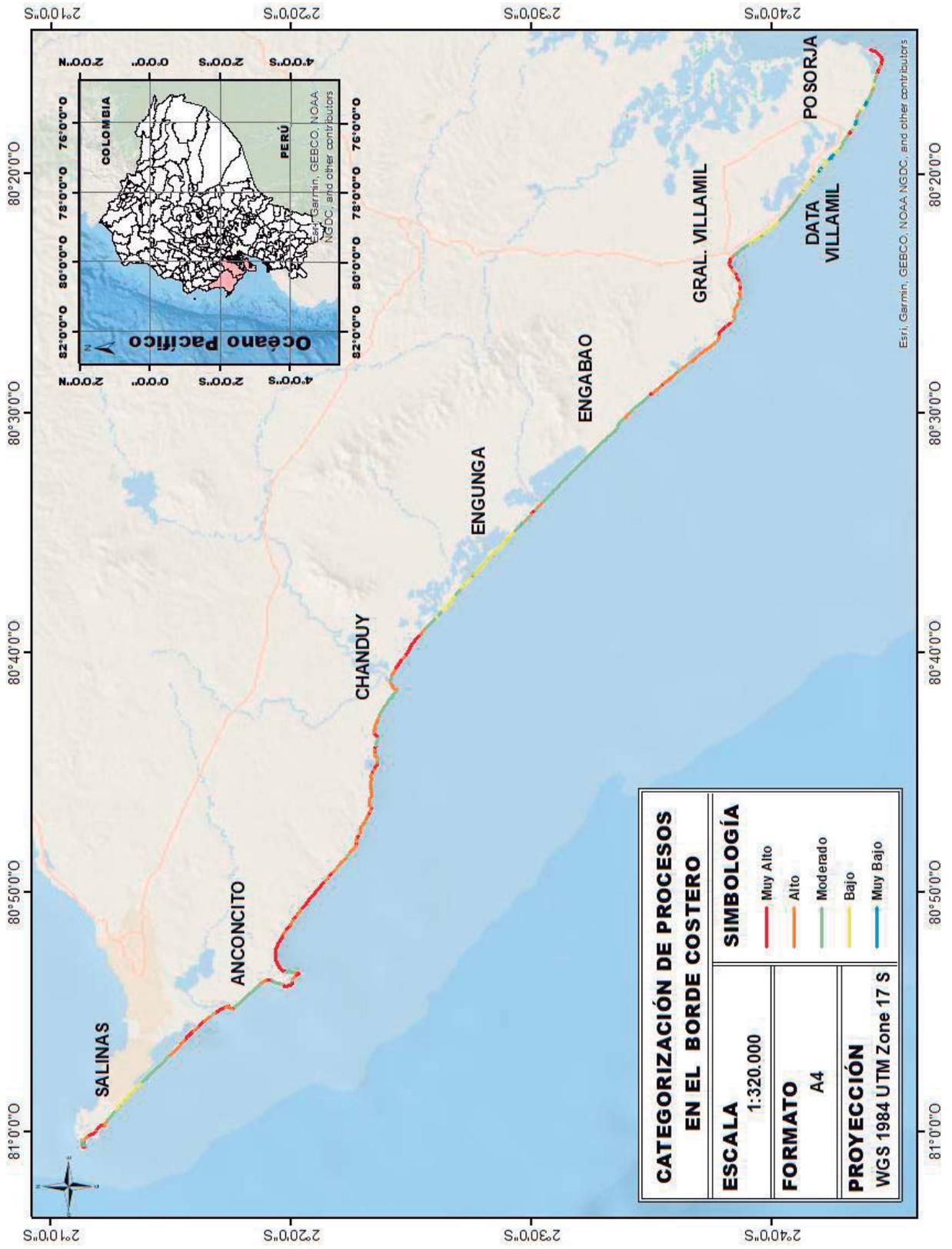
80°20'0"O

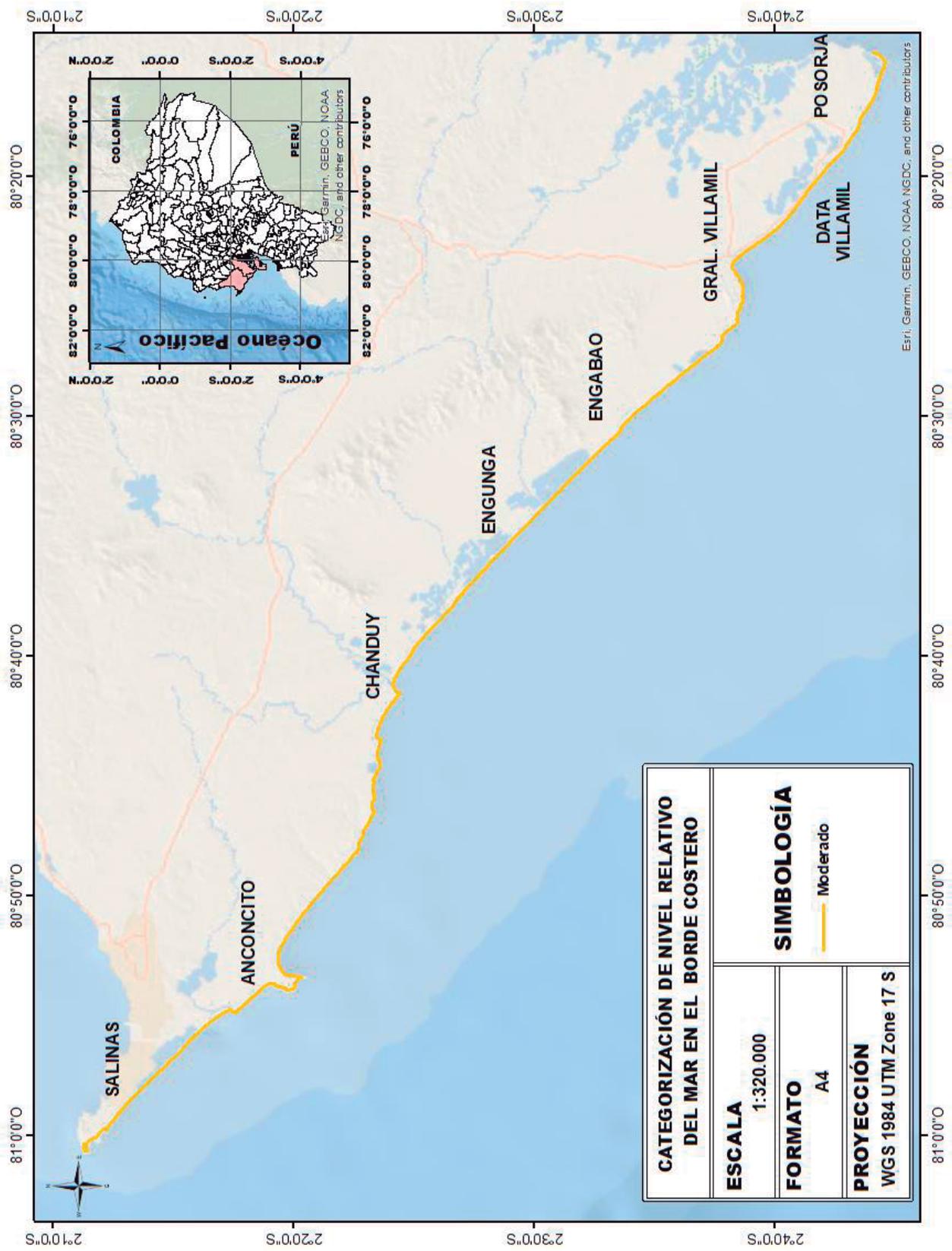
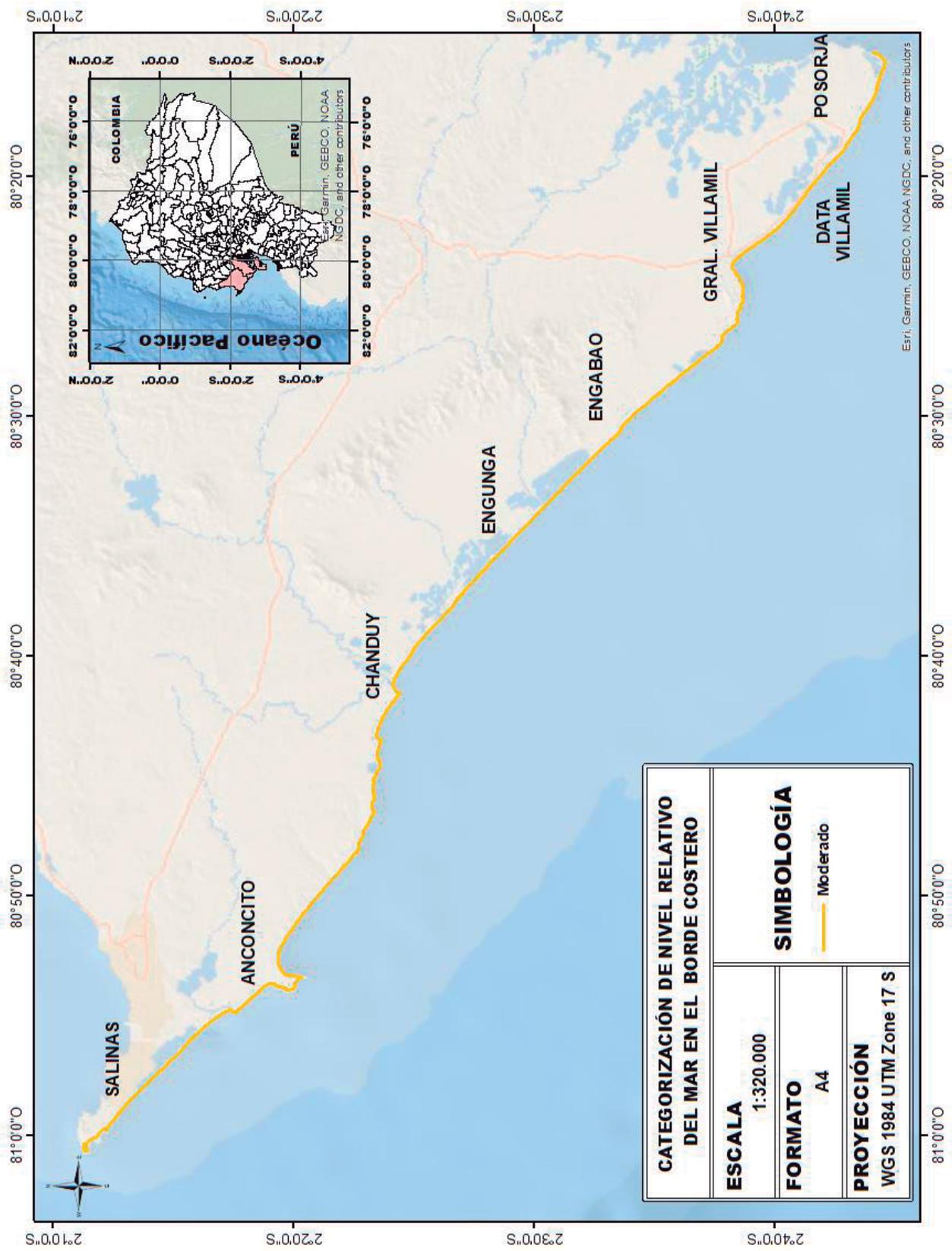
2°10'0"S

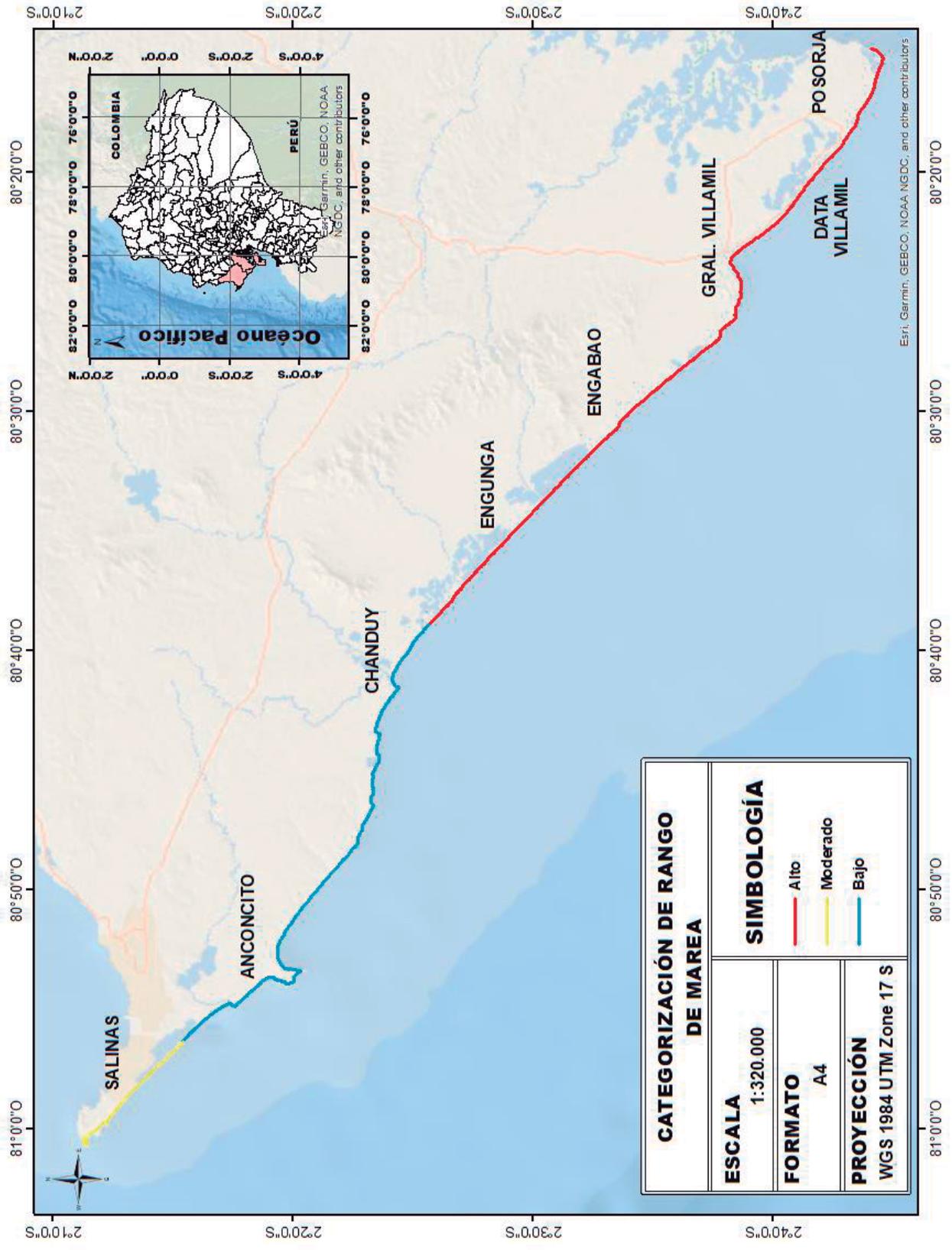
2°20'0"S

2°30'0"S

2°40'0"S

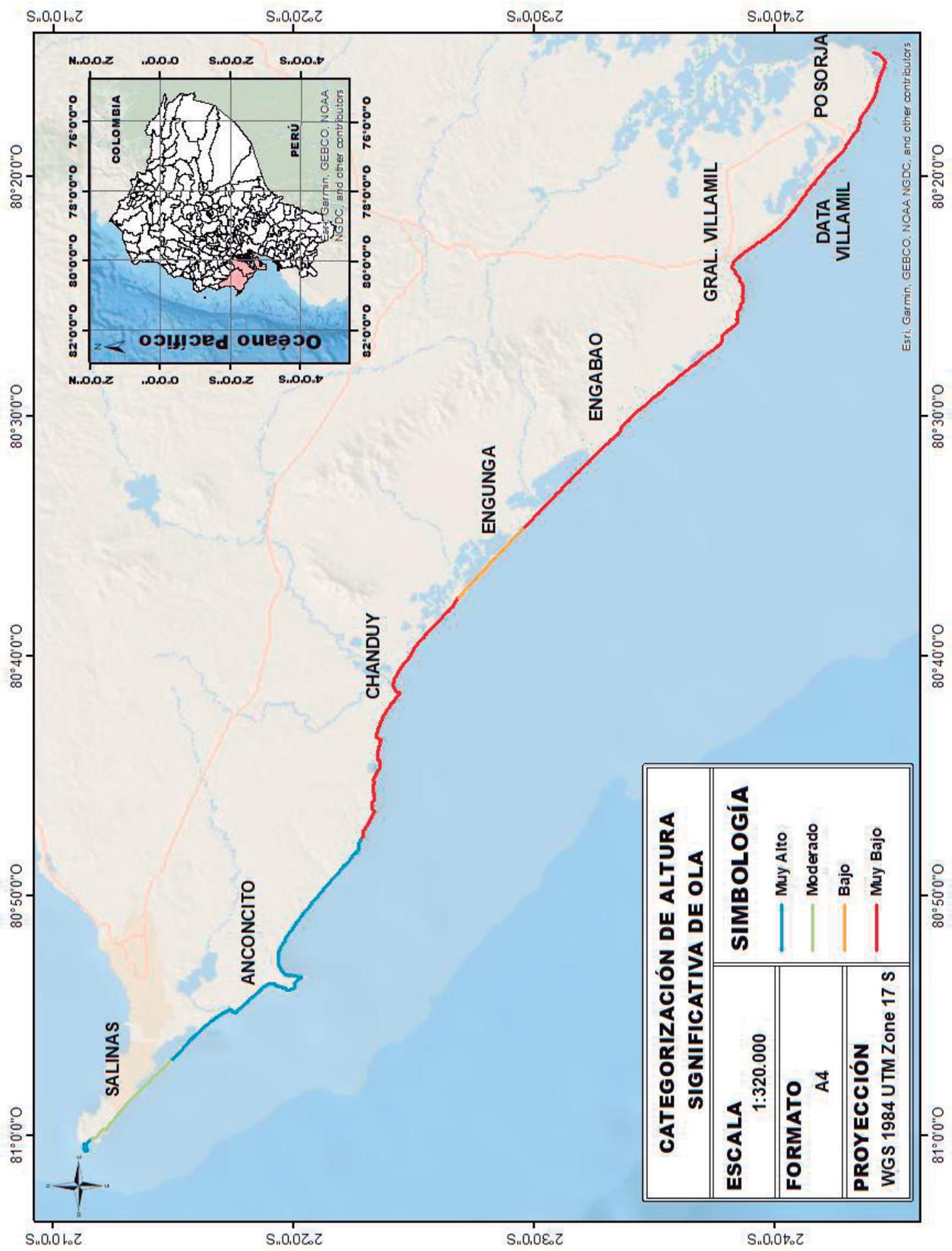




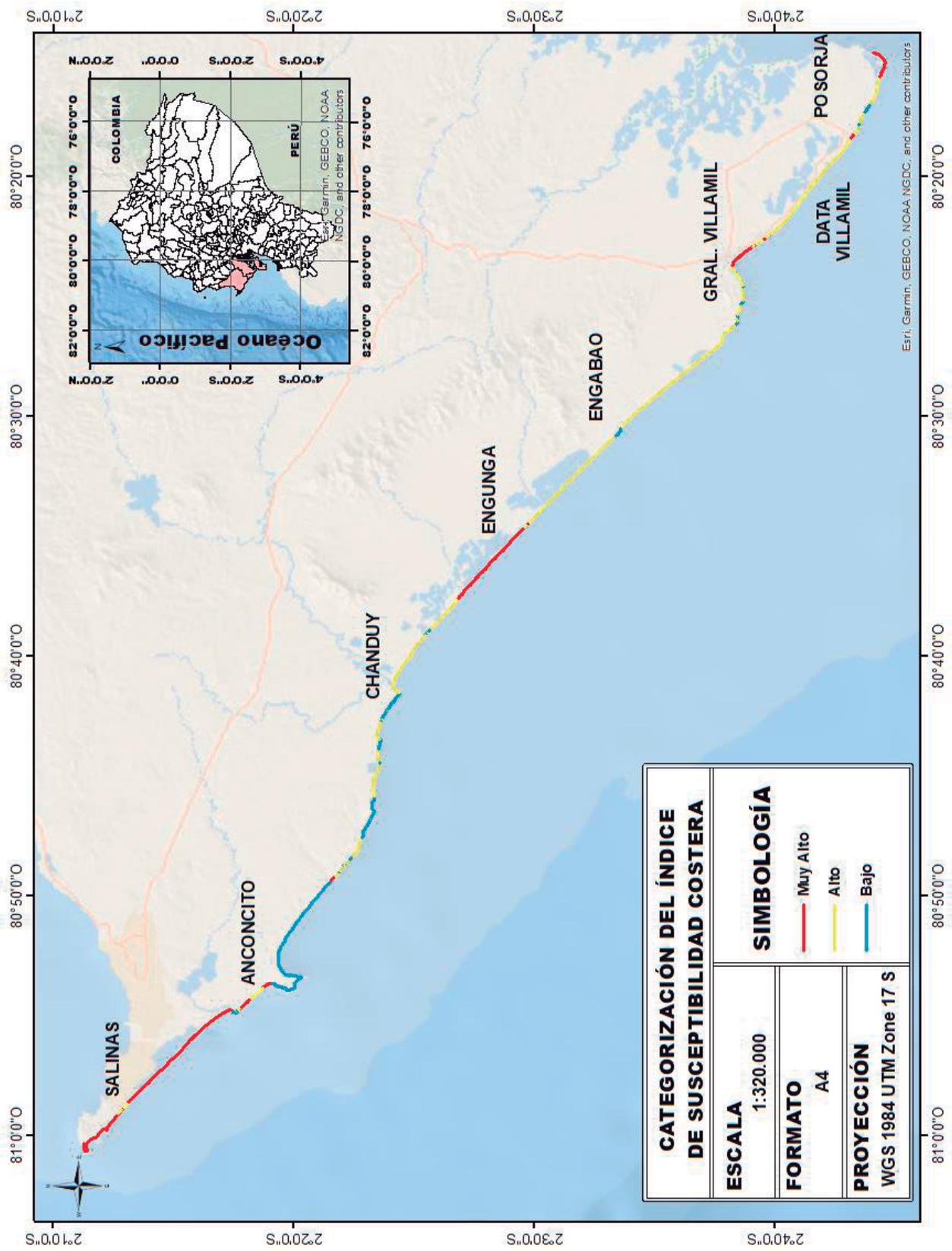


CATEGORIZACIÓN DE RANGO DE MAREA	
ESCALA	1:320.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	<ul style="list-style-type: none"> — Alto — Moderado — Bajo

Esri, Garmin, GEBCO, NOAA-NGDC, and other contributors



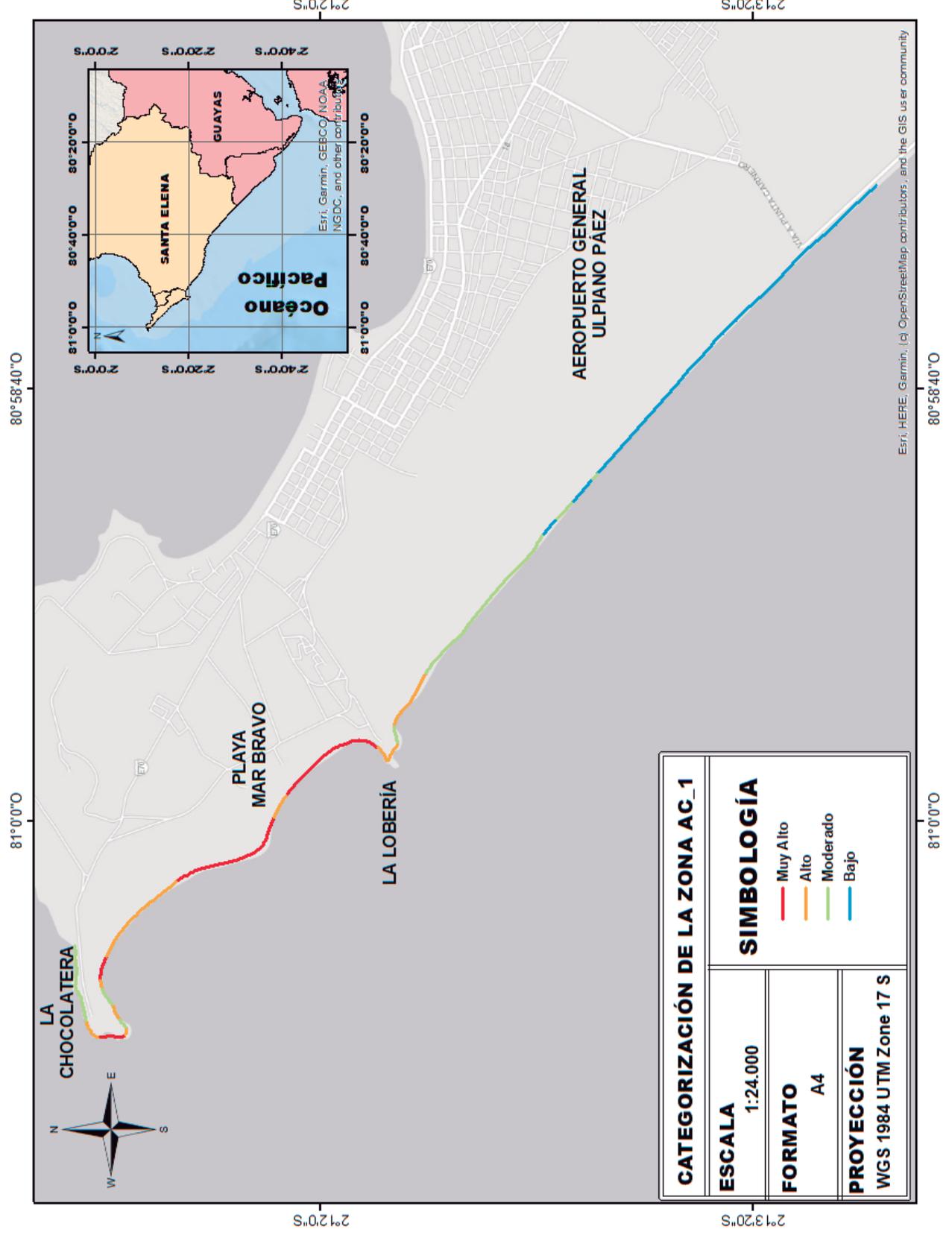
Map showing wave height categories along the coast of Peru. The map includes labels for Salinas, Anconcito, Chanduy, Engungá, Engabao, Gral. Villamil, Data Villamil, and Posorja. An inset map shows the location within Peru and the Pacific Ocean. A metadata box in the bottom right provides technical details.



CATEGORIZACIÓN DEL ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD COSTERA	
ESCALA	1:320.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	
	Muy Alto
	Alto
	Bajo

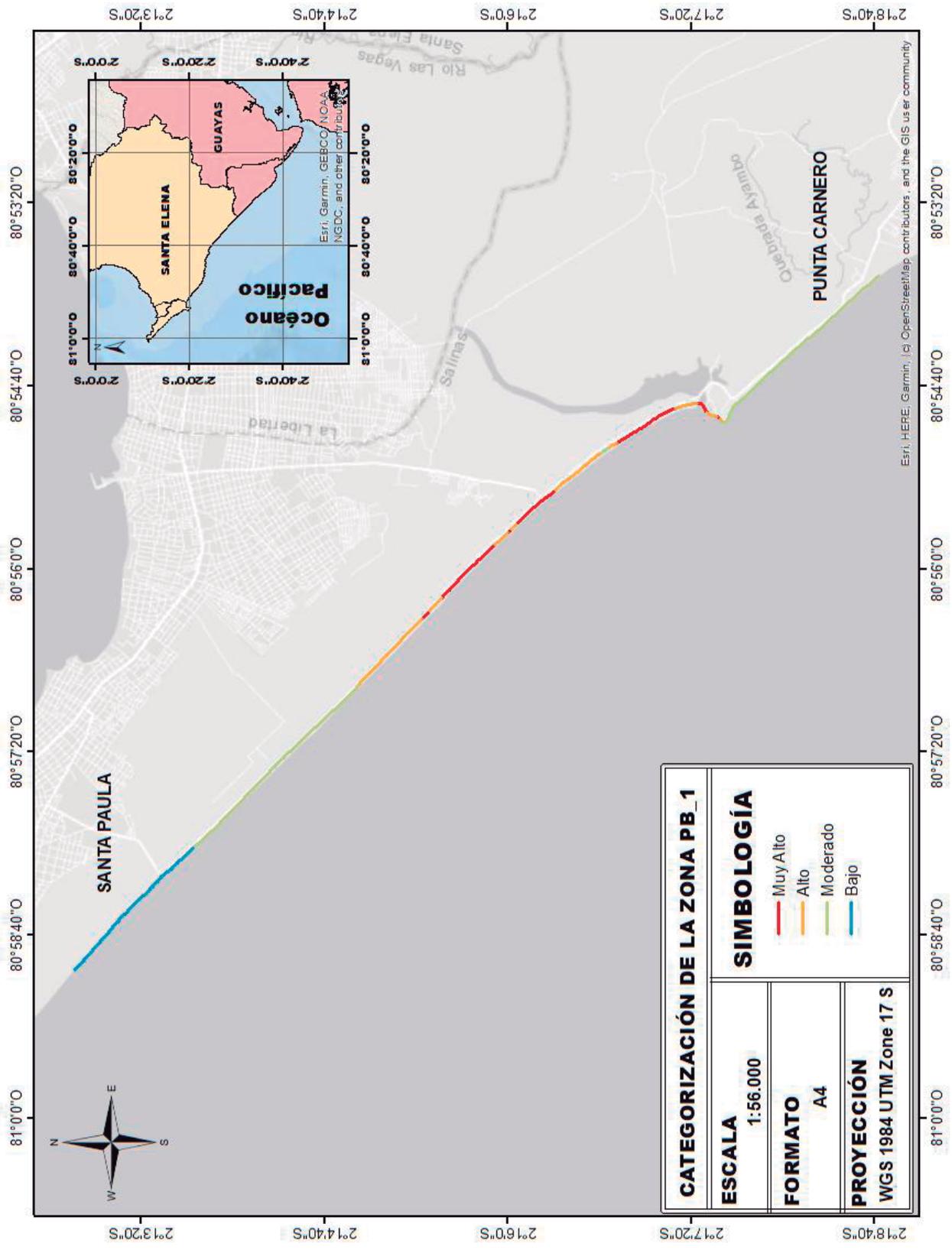
Esri, Garmin, GEBCO, NOAA, NGDC, and other contributors

APÉNDICE G
TASAS DE EROSIÓN



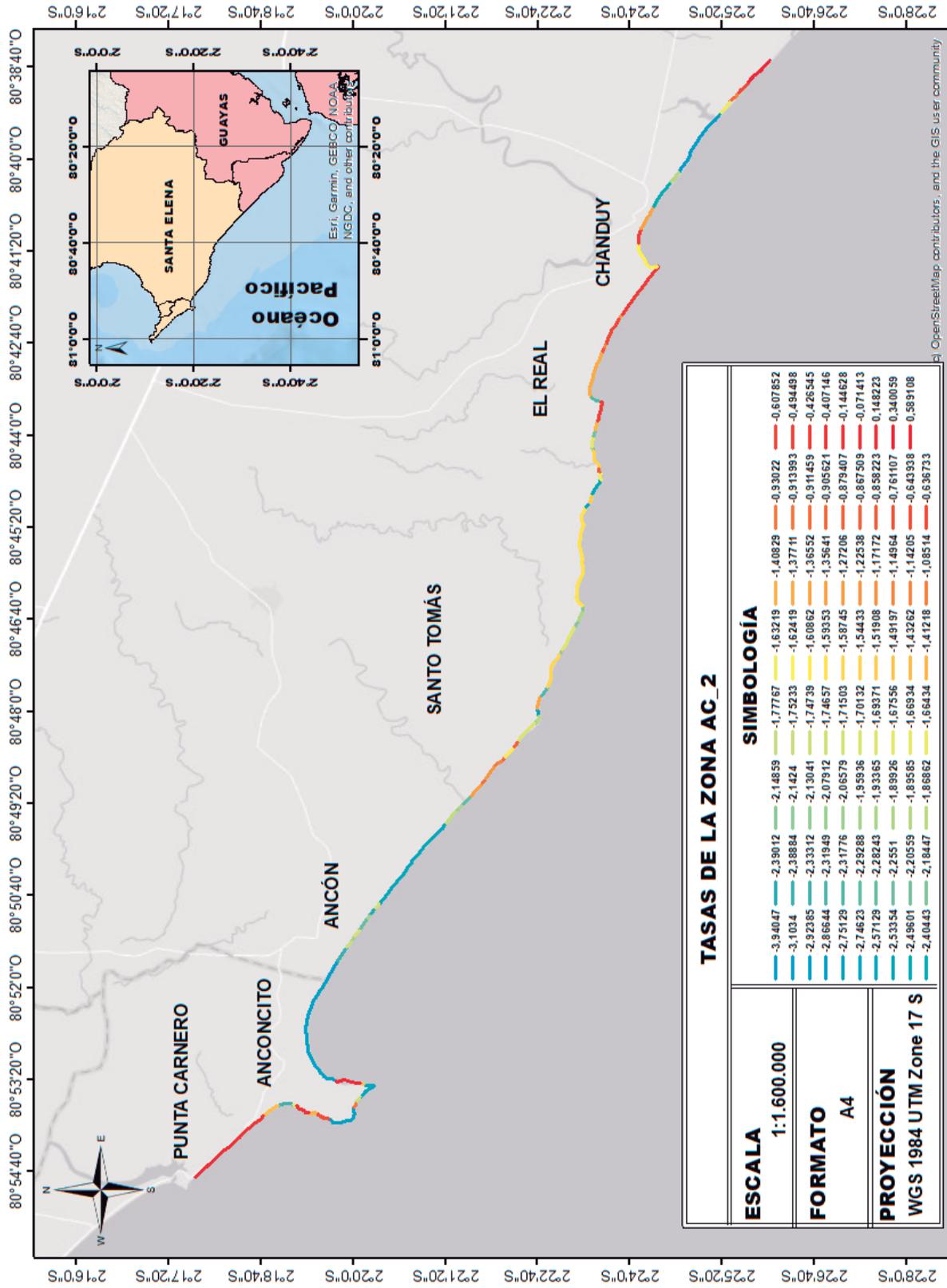
CATEGORIZACIÓN DE LA ZONA AC_1	
ESCALA	1:24.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	
	Muy Alto
	Alto
	Moderado
	Bajo

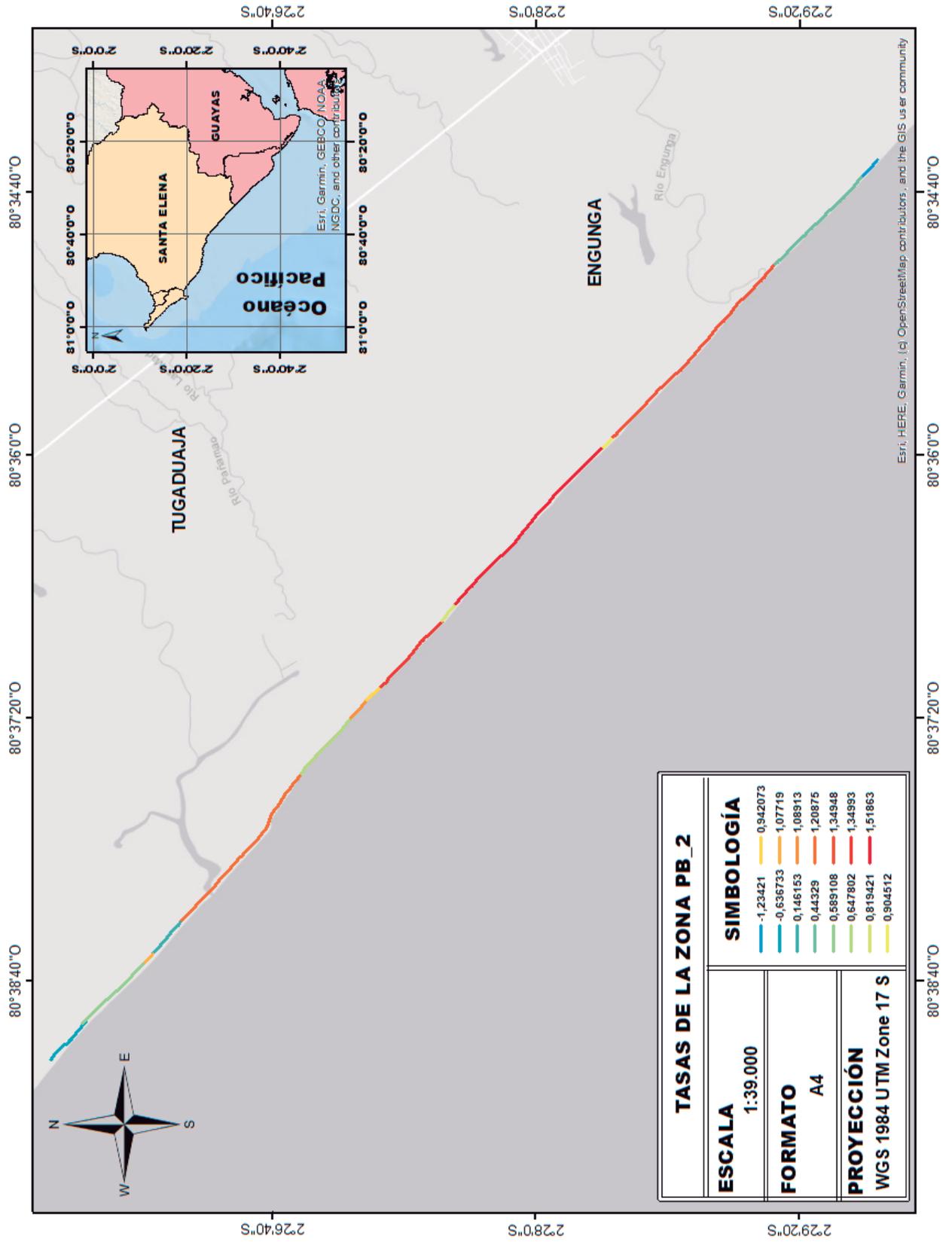
Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community

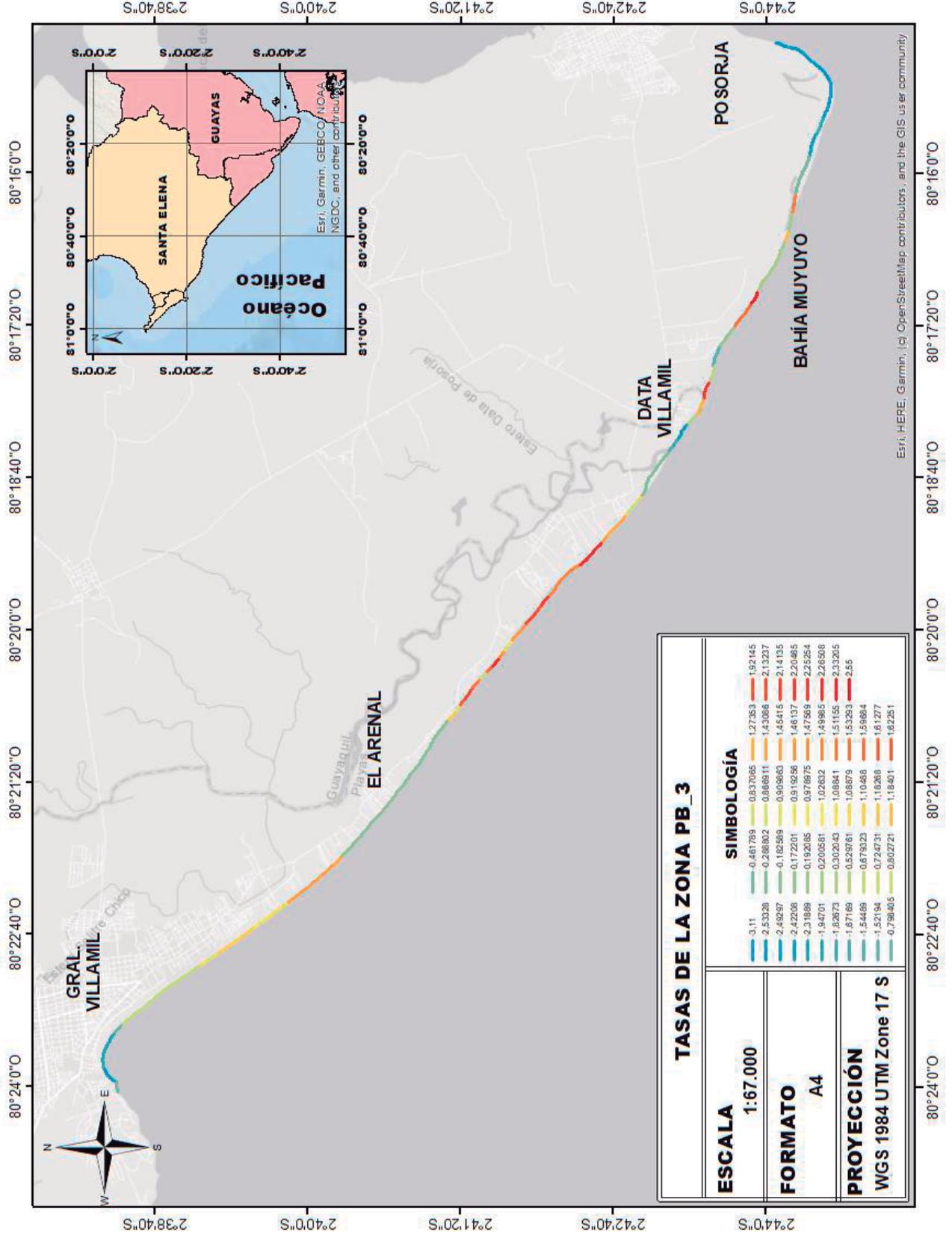


CATEGORIZACIÓN DE LA ZONA PB_1	
ESCALA	1:56.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA — Muy Alto — Alto — Moderado — Bajo	

Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community

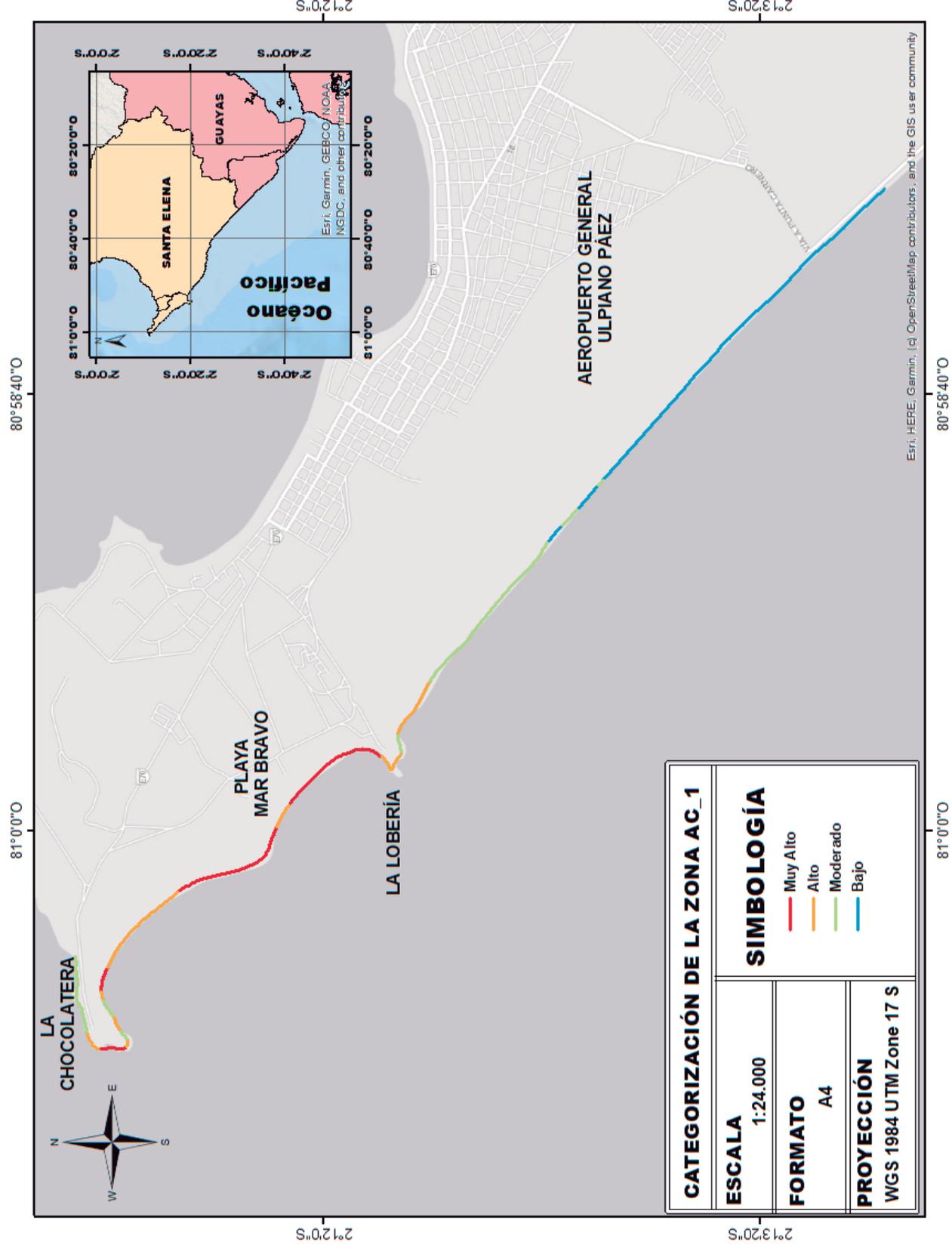






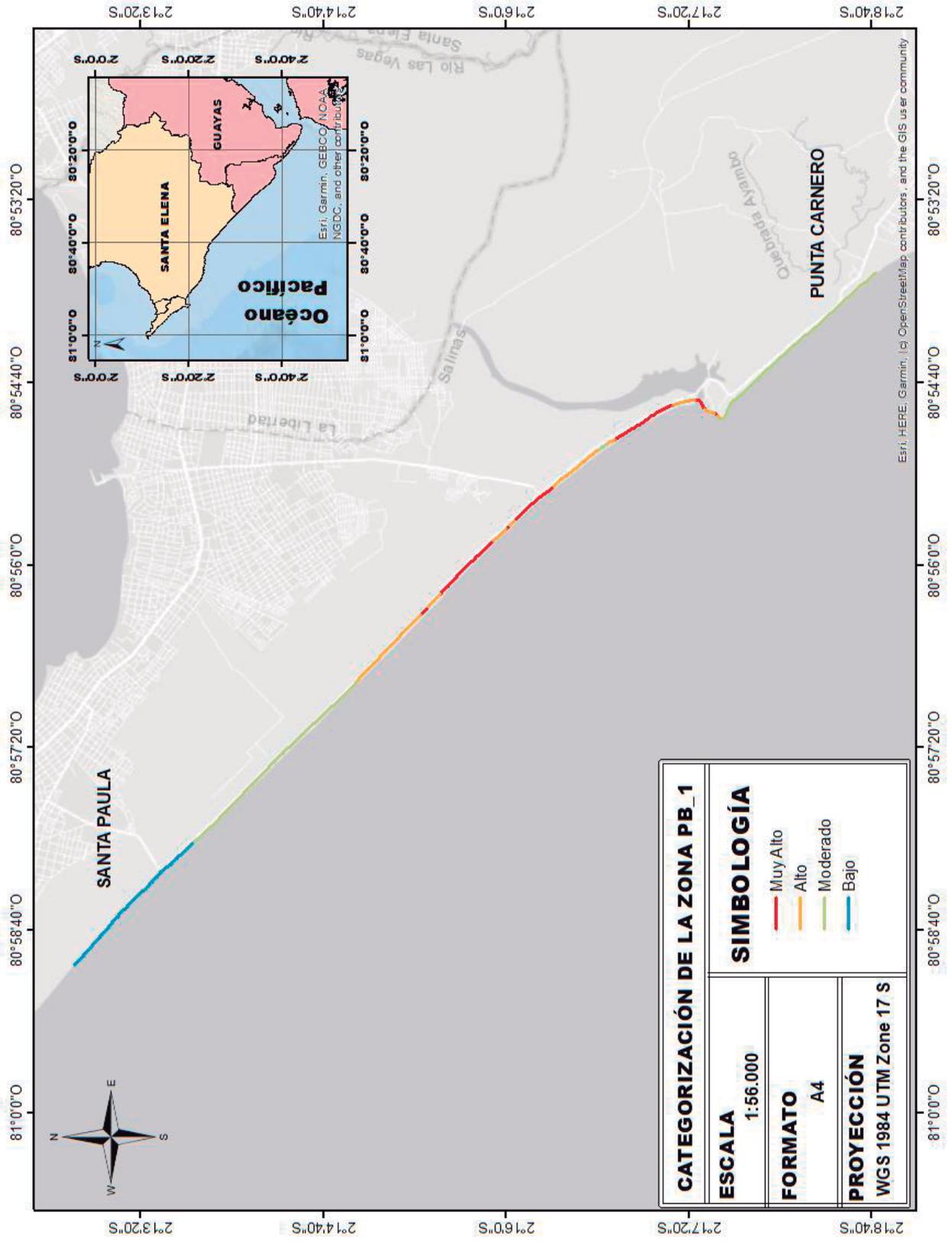
Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community

APÉNDICE F
CATEGORIZACIÓN DE GORNITZ ADAPTADO PARA LAS
ZONAS DE TASAS DE EROSIÓN.



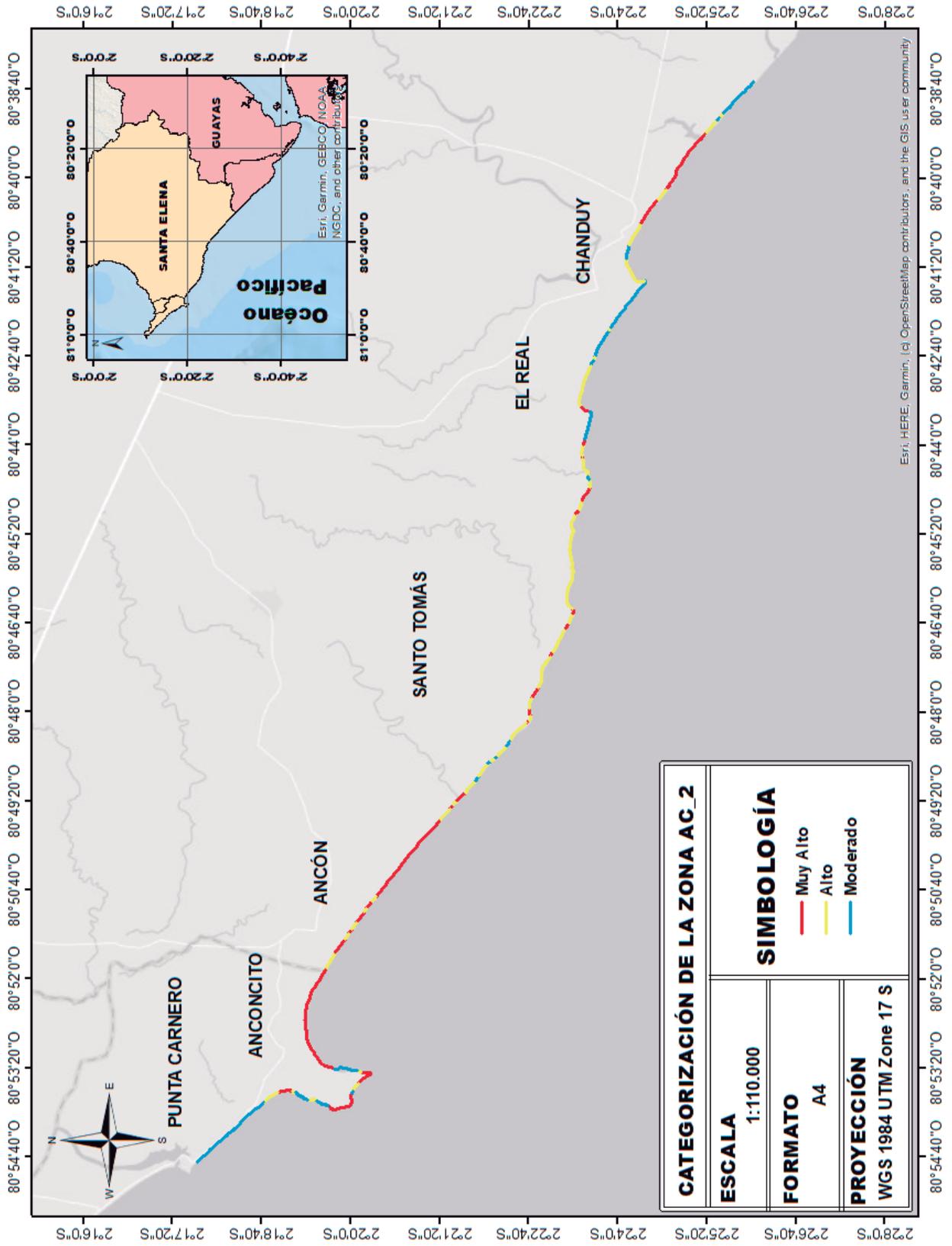
CATEGORIZACIÓN DE LA ZONA AC_1	
ESCALA	1:24.000
FORMATO	A4
PROYECCIÓN	WGS 1984 UTM Zone 17 S
SIMBOLOGÍA	
	Muy Alto
	Alto
	Moderado
	Bajo

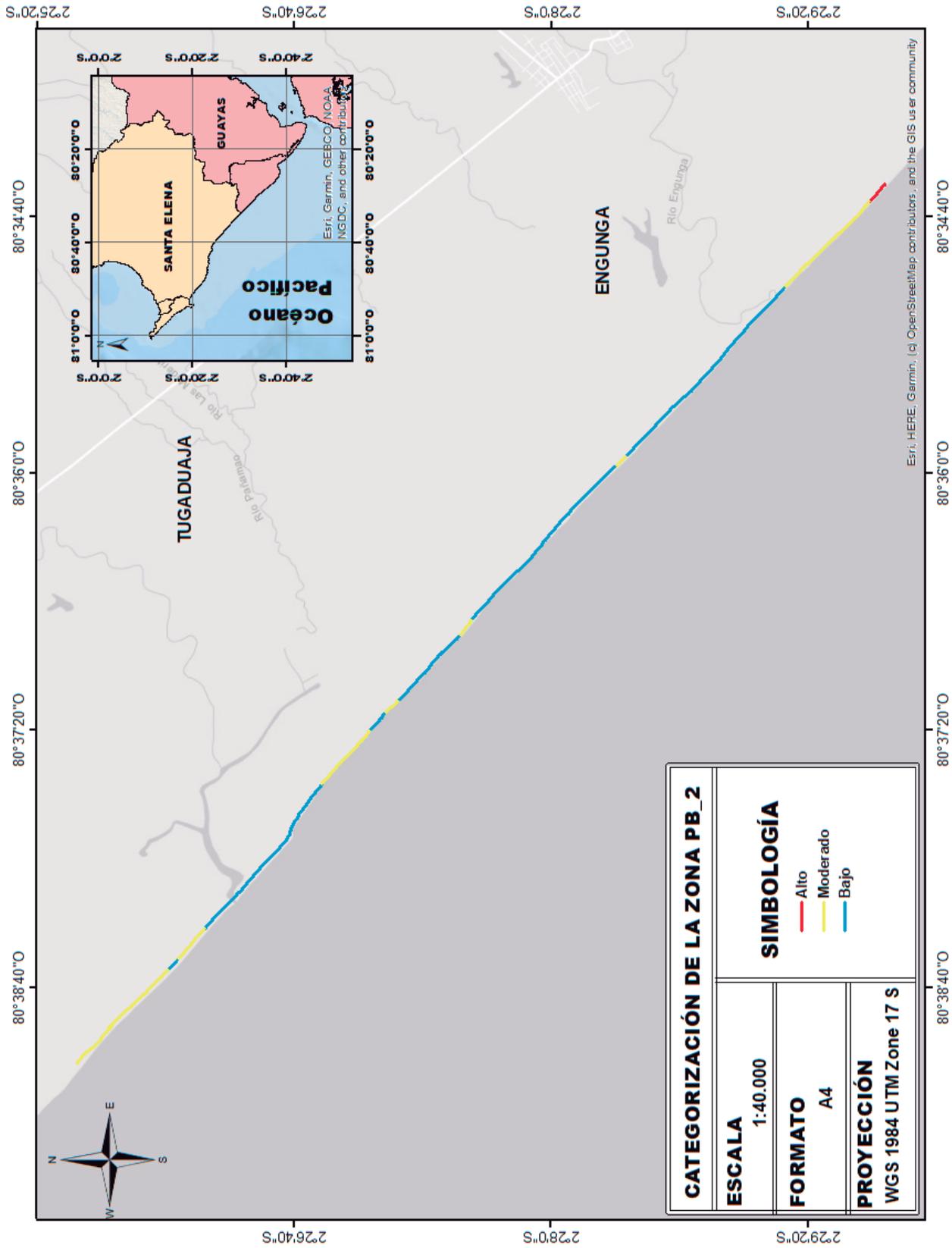
Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community



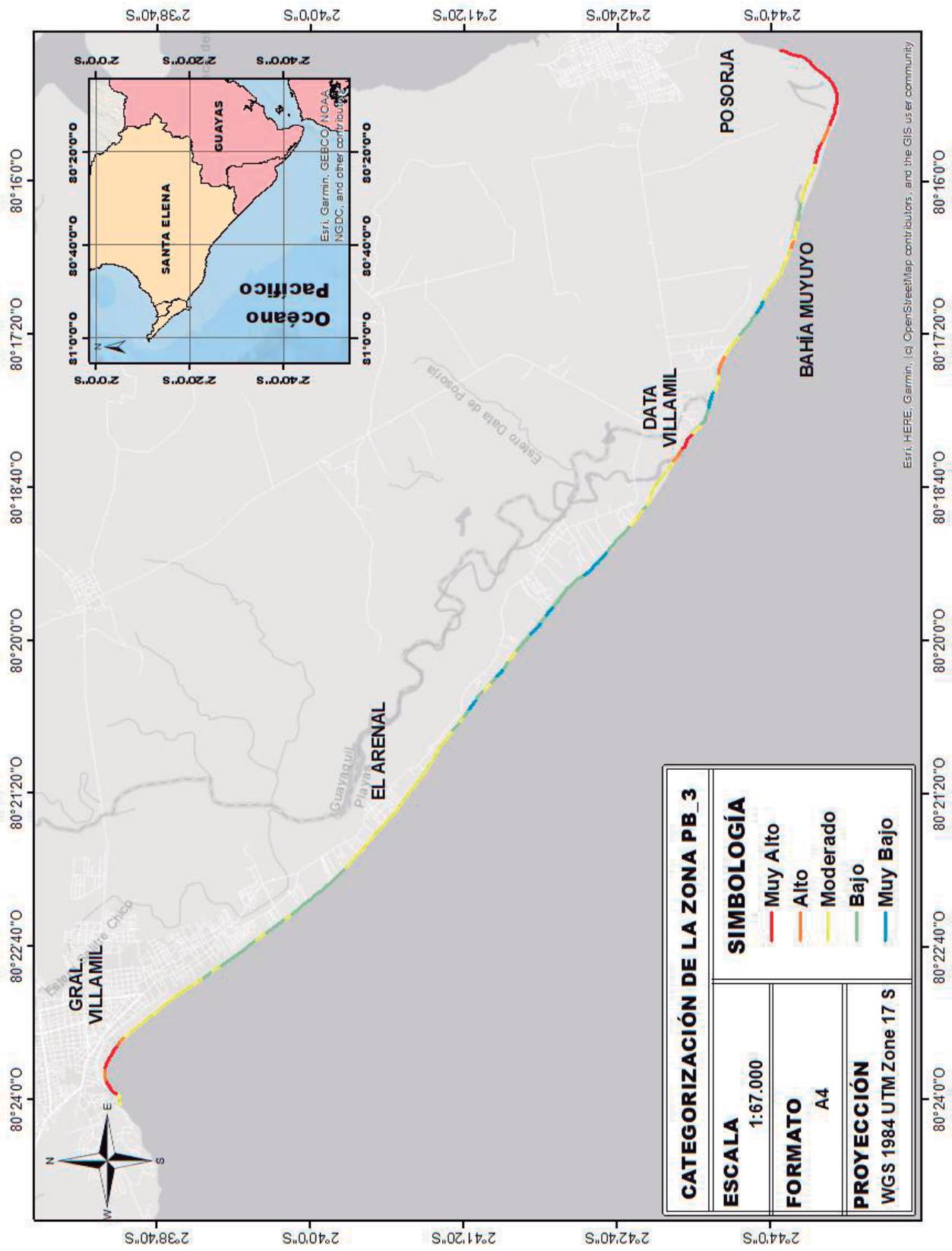
CATEGORIZACIÓN DE LA ZONA PB_1	
ESCALA 1:56.000	SIMBOLOGÍA <ul style="list-style-type: none"> — Muy Alto — Alto — Moderado — Bajo
FORMATO A4	
PROYECCIÓN WGS 1984 UTM Zone 17 S	

Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community





Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community



Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community