

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Método de identificación de zonas de desarrollo de manglar de borde en el Estero
Salado

INGE-2237

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Oceanográfico

Presentado por:

Romina Isabella Cifuentes Ansaldo

Ana Cristina González Nájera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado en primer lugar a Dios, a quien agradezco por su constante protección, y a mi familia, cuyo apoyo incondicional y aliento fueron fundamentales para hacer posible su realización.

Ana Cristina González

Dedico el siguiente proyecto primeramente a Dios, por ser mi guía a lo largo de la carrera, a mis padres, fuente inagotable de amor y apoyo, por su sacrificio y apoyo incondicional, y a mis profesores, por sembrar la semilla de mi aprendizaje.

Romina Cifuentes Ansaldo

Agradecimientos

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a nuestros tutores y profesores, quienes desempeñaron un papel fundamental en la realización de este proyecto. Valoramos enormemente su disposición para ayudarnos y colaborar en esta labor.

Ana y Romina.

Declaración Expresa

Nosotras *Ana González Najera* y *Romina Cifuentes Ansaldo* acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 1 de febrero del 2024.



Romina Cifuentes

Ansaldo



Ana Cristina González

Nájera

Evaluadores

Ing. Jorge Espinoza Amaguaña. MSc.

Profesor de Materia Integradora

Dra. Indira Yadira Nolivos Álvarez

Tutor de proyecto integrador

M. Esther Espinoza Celi

MSc. María Esther Espinoza Celi

Co-Tutor externo de proyecto integrador

Universidad de Amberes

Resumen

En Ecuador, a pesar de los esfuerzos por recuperar hectáreas de manglar de borde, la actividad antropogénica ha llevado a una disminución continua del área total de manglar. La falta de estudios previos del entorno en campañas de reforestación ha contribuido a la mortalidad de los hipocótilos plantados. Este proyecto se centra en la obtención y análisis de cinco variables físicas clave para identificar zonas propicias para el desarrollo de propágulos de la especie *Rhizophora mangle* (mangle rojo) en el canal externo del Estero Salado, Guayas. Mediante la integración de imágenes satelitales, revisión bibliográfica, muestreo y análisis de sedimentos, la aplicación de un modelo computacional en Delft 3D - Módulo FLOW y herramientas de geoprocésamiento, se logró identificar una extensión de 22,032.52 hectáreas con condiciones óptimas dentro de los rangos permisibles en salinidad, vientos, topografía, velocidad de corriente y textura de suelo. Simultáneamente, se propone una guía metodológica para mejorar la probabilidad de éxito en futuras campañas de reforestación, considerando las variables físicas necesarias para el desarrollo de plántulas de manglar.

Palabras Clave: mangle rojo, reforestación, variables físicas, rangos óptimos.

Abstract

*In Ecuador, despite efforts to recover hectares of fringe mangrove, anthropogenic activity has led to a continuous decrease in the total mangrove area. The lack of previous studies of the environment in reforestation campaigns has contributed to the mortality of planted hypocotyls. This project focuses on obtaining and analyzing five key physical variables to identify areas conducive to the development of propagules of *Rhizophora mangle* (red mangrove) in the exterior channel of Estero Salado, Guayas. Through the integration of satellite images, literature review, sediment sampling and analysis, the application of a computational model in Delft 3D - FLOW Module and geoprocessing tools, an extension of 22,032.52 hectares was identified with optimal conditions within the permissible ranges in salinity, wind, topography, current velocity, and soil texture. Simultaneously, a methodological guide is proposed to improve the probability of success in future reforestation campaigns, considering the physical variables necessary for the development of mangrove seedlings.*

Keywords: *mangrove, reforestation, physical variables, optimal ranges.*

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema.....	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Marco teórico	5
1.5.1 Manglar de borde o de franja	6
1.5.2 <i>Rhizophora mangle</i> en Ecuador	8
1.5.3 Condiciones físicas requeridas para el desarrollo del manglar.....	8
1.5.3.1 Velocidad de corriente	10
1.5.3.2 Velocidad de viento.....	10
1.5.3.3 Pendiente y topografía	11
1.5.3.4 Tiempo de inundación o hidropériodo.....	11
1.5.3.5 Salinidad	12

1.5.3.6	<i>Características de sedimentos</i>	13
1.5.3.7	<i>Esfuerzos para reforestación de manglar realizados alrededor del mundo y en el Ecuador.</i>	15
CAPÍTULO 2		17
2.1	Metodología	18
2.1.1	<i>Descripción de la zona de estudio</i>	18
2.1.2	<i>Revisión bibliográfica de variables físicas y obtención de datos</i>	21
2.1.3	<i>Reconocimiento de la zona de estudio con imágenes satelitales ópticas</i>	22
2.1.4	<i>Caracterización de la zona de control y toma de datos en campo</i>	22
2.1.5	<i>Realización de modelo hidrodinámico.</i>	26
2.1.6	<i>Procesamiento de datos y realización de mapas con los datos obtenidos.</i>	32
CAPÍTULO 3		34
3.1	Resultados y análisis	35
3.1.1	<i>Evolución en la zona de estudio de 2018 a 2020</i>	35
3.1.2	<i>Características de sedimentos</i>	36
3.1.3	<i>Óptimo ajuste del modelo para obtener la velocidad de corriente</i>	43
3.1.4	<i>Velocidad de corriente</i>	46
3.1.4	<i>Topografía</i>	52
3.1.5	<i>Salinidad</i>	53
3.1.6	<i>Vientos</i>	57
3.1.7	<i>Zonas Óptimas de desarrollo de manglar identificadas</i>	58
3.1.8	<i>Diseño de solución</i>	60
3.1.9	<i>Estimación de costos</i>	62
CAPÍTULO 4		67
4.1	Conclusiones y recomendaciones	68

<i>4.1.1 Conclusiones</i>	68
<i>4.1.2 Recomendaciones</i>	70
Bibliografía	72
ANEXOS	78

Abreviaturas

ESPOL: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

CADS: Centro de Agua y Desarrollo Sostenible.

MAE: Ministerio del Ambiente.

MAATE: Ministerio del Agua, Ambiente y Transición Ecológica.

ES: Estero Salado.

SNI: Sistema Nacional de Información.

INOCAR: Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada.

PSU: (del inglés “Practical Salinity Units”) Unidades prácticas de salinidad.

SP: Arena pobremente gradada

USD: (del inglés “United States Dollars”) dólares estadounidenses.

EIA: Estudio de Impacto Ambiental.

SE: Servicios Ecosistémicos.

VE: Valor Económico.

IDW: Inverse Distance Weighting

USGS: United States Geological Survey

Simbología

m	Metro
km	Kilómetro
m²	Metro cuadrado
km²	Kilómetro cuadrado
ha	Hectárea
Fig.	Figura
°	Grados
‘	Minutos
”	Segundos
N	Norte
S	Sur
E	Este
W	Oeste
NE	Noreste
NW	Noroeste
SE	Sureste
SW	Suroeste
g/cm³	Gramos sobre centímetros cúbicos
m/s	Metros sobre segundo
m²/s	Metros cuadrados sobre segundo
s/m^{1/3}	Segundo sobre metros elevado a un tercio

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Taxonomía del manglar rojo.....	6
<i>Figura 2</i> Distribución de <i>Rhizophora mangle</i>	7
<i>Figura 3</i> Variables que afectan al crecimiento y desarrollo del manglar de borde	9
<i>Figura 4</i> Triángulo de textura de sedimentos según la edafología.....	14
<i>Figura 5</i> Reforestación activa de manglar.....	15
<i>Figura 6</i> Diagrama de la zona de estudio.....	19
<i>Figura 7</i> Mapa de zona de toma de muestras - Bajo Zapatero.....	24
<i>Figura 8</i> Extensión de la grilla a lo largo del Estero Salado y parte del Golfo de Guayaquil	28
<i>Figura 9</i> Batimetría interpolada utilizando el módulo QUICKIN de Delft 3D.....	29
<i>Figura 10</i> Condiciones de borde (Posorja, Puerto Nuevo y Puná) ubicadas a lo largo de la grilla.....	29
<i>Figura 11</i> Mapa donde consta la ubicación de mareógrafos de Jan De Nul	30
<i>Figura 12</i> Mapa de zonas de acreción (en color rojo) desde los años 2018 a 2020.....	35
<i>Figura 13</i> Zonificación de tipo de sedimento según revisión bibliográfica.....	38
<i>Figura 14</i> Gráfico de barras de contenido de MO por muestras tomadas.....	39
<i>Figura 15</i> Presencia de equinodermos en la zona de toma de muestras de sedimento.....	40
<i>Figura 16</i> Diferentes tonalidades (grisáceas y pardas) en el sedimento.....	40
<i>Figura 17</i> Gráfico de promedio de MO clasificado por edad de mangle.....	40
<i>Figura 18</i> Presencia de mortalidad de manglar (zona de manglares de +20 años).....	41
<i>Figura 19</i> Gráfico con valores de DBD en cada estación de muestra	42
<i>Figura 20</i> Velocidad máxima de corriente en fase de sicigia del 20 de marzo del 2019.....	48
<i>Figura 21</i> Velocidad máxima de corriente en fase de cuadratura del 28 de marzo del 2019.....	48
<i>Figura 22</i> Velocidad máxima de corriente en fase de sicigia del 15 de agosto del 2019	49
<i>Figura 23</i> Velocidad máxima de corriente en fase de cuadratura del 24 de agosto del 2019	49
<i>Figura 24</i> Velocidad de corriente en condiciones de reflujos durante las 5:00 a 8:00 am, en Sicigia (marzo 6).....	51
<i>Figura 25</i> Velocidad de corriente en condiciones de reflujos durante las 9:00 a 12:00 am, en Sicigia (marzo 6).....	51
<i>Figura 26</i> Velocidad de corriente en condiciones de flujo durante la 13:00 a 16:00 pm, en Sicigia (marzo 6).....	52
<i>Figura 27</i> Mapa de topografía favorable a lo largo del canal exterior del Estero Salado.....	53
<i>Figura 28</i> Topografía y batimetría en 3D de la zona de estudio	53
<i>Figura 29</i> Salinidad promedio en la época seca en el Estero Salado	56
<i>Figura 30</i> Salinidad promedio en la época húmeda en el Estero Salado.....	56
<i>Figura 31</i> Velocidad y magnitud de vientos promedio en el Estero Salado	58
<i>Figura 32</i> Mapa unificado de zonas óptimas de desarrollo de manglar en el Estero Salado.....	59
<i>Figura 33</i> Ubicación de zonas óptimas de desarrollo de manglar excluyendo camarónicas en ramal exterior del Estero Salado	60

Figura 34 Portada de la guía propuesta.....	61
----------------------------------------------------	----

Índice de tablas

Tabla 1 Listado de servicios ecosistémicos que brinda el manglar	5
Tabla 2 Resumen de taxonomía del manglar rojo	6
Tabla 3 Variables identificadas para la conservación de manglares.....	9
Tabla 4 Iniciativa dada por el Ministerio del Ambiente para la remediación de manglar	16
Tabla 5 Obtención y reconocimiento de datos	20
Tabla 6 Procesamiento de Datos y evaluación	20
Tabla 7 Obtención de resultados	20
Tabla 8 Datos de Batimetría y marea disponibles.....	21
Tabla 9 Edad de muestra según su código de muestra	23
Tabla 10 Parámetros de rugosidad y turbulencia utilizados en la calibración del modelo	31
Tabla 11 Clasificación de Curvas de Nivel según Elevación y Condición para el Manglar.....	33
Tabla 12 Mapa de zonas de acreción (en color rojo) desde los años 2018 a 2020	37
Tabla 13 Detalle de resultados de granulometría láser de muestras de sedimentos	42
Tabla 14 Resultados de DBD por estación y por edad de mangle	44
Tabla 15 Datos observados versus datos simulados de enero del 2019 de los mareógrafos: C2, Puerto Nuevo y Posorja.....	45
Tabla 16 Fechas y condiciones de marea de las velocidades tomadas	46
Tabla 17 Datos de salinidad promedio medidos in situ en los años de 1996 y 1997	54
Tabla 18 Salinidades máximas y mínimas promedio (‰) en el Estuario del Estero Salado Fuente: INOCAR - 2008	54
Tabla 19 Clasificación de rangos de salinidad para el crecimiento de manglar.....	55
Tabla 20 Estimación de costos del proyecto. Etapa de estudios previos.....	62
Tabla 21 Aproximación de costos para la etapa de plantación y mantenimiento por hectárea	64
Tabla 22 Resumen de costos estimados para una campaña de restauración de manglar.....	65
Tabla 23 Costos totales y valor económico de los SE del manglar por hectárea.	66

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El bosque de manglar es un ecosistema útil para el balance del medioambiente y para la humanidad. Sin embargo, es un sistema vulnerable que puede desarrollarse cuando las condiciones físicas de la costa y de energía son las adecuadas (Woodroffe C. D., 1983).

Dentro del ecosistema del Estero Salado (ES), el género de manglar predominante es el género *Rhizophora*, cuyas condiciones permiten su mayor dispersión y supervivencia. De todas maneras, estas poblaciones pueden ser afectadas por actividades antrópicas y/o naturales, reduciendo su número con el pasar del tiempo.

La restauración de manglar nace como alternativa para luchar contra su pérdida y cada año, se realizan esfuerzos y acciones para rescatar este valioso ecosistema, el cual actúa como una barrera natural para mitigar el impacto del oleaje y proteger la franja costera del Golfo de Guayaquil. Sin embargo, uno de los errores más comunes que se realizan durante las campañas de restauración de manglar es el desconocimiento de las zonas más idóneas para el crecimiento de plantaciones, elevando el porcentaje de mortalidad de las plántulas restauradas.

En este proyecto, se diseña una metodología con el propósito de identificar aquellas condiciones físicas óptimas para el crecimiento del género *Rhizophora mangle* en el Estero Salado. Para así determinar las áreas más propicias para la exitosa plantación de propágulos de esta especie.

1.2 Descripción del problema

Los manglares representan una respuesta natural a problemas globales como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad. Su supervisión, conservación y restauración son ahora más esenciales que nunca (Teutli Hernández, Herrera-Silveira, Cisneros-de la Cruz, & Roman-Cuesta, 2020).

Con el paso del tiempo, este ecosistema ha experimentado grandes pérdidas debido en su mayoría a las actividades antropogénicas. A nivel mundial, los esfuerzos para proteger estos ecosistemas se están intensificando (World Wildlife Fund, 2021). Y a nivel nacional el Ministerio del Ambiente ha implementado el Plan de Acción Nacional para Conservar los Manglares del Ecuador Continental, el cual es crucial para impulsar la protección, la recuperación y el uso sostenible de los manglares (Ministerio del Ambiente, 2019).

Se han implementado diversas estrategias de restauración en áreas afectadas por actividades antropogénicas, donde muchas empresas también realizan la siembra de manglares como parte de sus esfuerzos para compensar los impactos generados. Sin embargo, la eficacia de estos proyectos se ve comprometida debido a la falta de adaptación de las estrategias de restauración a las características específicas de cada sitio. En lugar de ajustarse a las condiciones locales, estas estrategias dependen automáticamente de enfoques estandarizados, como la simple reforestación. Esta falta de adaptación local incrementa el riesgo de que los proyectos no alcancen el éxito deseado (Gutierrez, 2020).

Por lo que es esencial realizar un diagnóstico detallado del sitio para identificar las causas de la pérdida de manglares y definir acciones específicas de restauración. Se debe analizar las variables físicas, químicas y biológicas para asegurar el crecimiento adecuado de propágulos de mangle. Es así como este estudio evalúa las variables físicas óptimas en el manglar del Estero Salado en Ecuador y proporciona una guía para identificar y evaluar áreas aptas de restauración.

1.3 Justificación del problema

El manglar, a pesar de su gran importancia ecosistémica, enfrenta actualmente graves amenazas. Los esfuerzos y estrategias dirigidos a su recuperación y preservación se ven limitados,

ya que no se adaptan de manera adecuada a las características y condiciones específicas de cada sitio y deben ser correctamente sustentados por los estudios previos que deben realizarse antes de realizar una campaña de reforestación. Cada especie de mangle presenta umbrales de tolerancia y requiere condiciones físicas particulares.

En el Ecuador, esta información espacial es poca o no está disponible dentro de la plataforma del Sistema Nacional de Información (<https://sni.gob.ec/datos-abiertos/>), lo que impide que las entidades, empresas y/o población pueda iniciar campañas de reforestación de manglar al no conocer los sitios más aptos para su desarrollo o, si realizan la campaña, se expone a que se tenga una tasa de mortalidad alta de plántulas reforestadas al no satisfacer las necesidades ecológicas que estas necesitan. Por lo tanto, resulta crucial identificar las variables determinantes para la prosperidad de un sitio donde se ha plantado manglar, asegurando así su reproducción y aprovechando los innumerables servicios que brinda a la humanidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un método eficiente y accesible para identificar zonas óptimas de desarrollo de manglar de borde en el canal exterior del Estero Salado, a través del análisis de variables físicas influyentes.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Identificar y caracterizar variables físicas influyentes en el crecimiento del manglar mediante la revisión bibliográfica y la recopilación de datos en el campo.

2. Modelar la hidrodinámica del canal principal del Estero a partir de información de niveles de marea utilizando un modelo matemático en Delft 3D.

3. Identificar, a un nivel de prefactibilidad, las áreas intermareales donde los nuevos propágulos podrían germinar con éxito.

1.5 Marco teórico

Uno de los ecosistemas costeros más importantes para el ecosistema y el bienestar humano es el bosque de manglar. Este tipo de bosque es endémico de las regiones tropicales y subtropicales, presente en casi todos los continentes del mundo. Se encuentra en las zonas intermareales y representan el 0,4% de la superficie de bosque del planeta, con más de 15,2 millones de hectáreas (Sandilyan & Kathiresan, 2012).

Tabla 1

Listado de servicios ecosistémicos que brinda el manglar

Beneficios del bosque de manglar
<ul style="list-style-type: none">• Protección costera contra oleaje, inundaciones, tsunamis.• Disminución de erosión (captación de sedimentos)• Hábitat de etapas tempranas de organismos• Generador de empleo para comunidades aledañas• Ecoturismo• Protección contra inundaciones y tormentas

En los últimos años, se reconoce al bosque de manglar como una manera de proteger el borde costero, al actuar a modo de barrera natural al atenuar la fuerza del oleaje con su estructura de raíces. La altura de ola se disminuye entre un 13 a 66% al pasar por un sistema de raíces de manglar y la presencia de los árboles representa un obstáculo para el viento y su capacidad de formación de olas. Integrar al manglar como una manera de proteger las costas (mayormente

conocido como “*Soft engineering*”) puede tener igual o más beneficios que una obra de protección costera convencional.

1.5.1 Manglar de borde o de franja

El bosque de manglar puede clasificarse dependiendo del área en donde se encuentran, es decir, su clasificación fisiográfica. En Ecuador encontramos el manglar de borde, ribereño y de cuenca hidrográfica (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2014).

El manglar de borde se sitúa en primera fila, en la zona intermareal. Este tipo de manglar tiende a inundarse fácilmente (aproximadamente 700 veces al año). El género *Rhizophora spp* es el dominante en esta categoría, siendo la especie *Rhizophora mangle*, mejor conocida como mangle rojo, la predominante. Esta especie posee una estructura robusta, la cual le permite soportar las condiciones presentes en el borde litoral. Soporta grandes variabilidades de salinidad. Posee raíces aéreas a modo de zancos, las cuales le permiten establecerse en sustratos fangosos e inestables (Guerrero Calderón, 2022).

Tabla 2

Resumen de taxonomía del manglar rojo

Reino: Plantae	<p>Figura 1</p> <p><i>Taxonomía del manglar rojo.</i></p>  <p>Nota. Figura de Gil Sánchez en la plataforma Dribbble.</p>
Superdivisión: Spermatophyta	
Clase: Magnoliopsida	
Orden: Rhizophorales	
Género: Rhizophora	
Nombre científico: <i>Rhizophora mangle</i>	
Subreino: Tracheobionta	
División: Magnoliophyta	
Subclase: Rosidae	
Familia: Rhizophoraceae	
Especie: mangle	

https://dribbble.com/shots/16450992-The-red-mangrove-Rhizophora-mangle

El género *Rhizophora* se caracteriza por tener una reproducción rápida debido a la gran resiliencia de sus hipocótilos o propágulos vivíparos. Los propágulos maduros tienen una forma alargada de “J” con un extremo en punta lo que les permite transportarse por amplias zonas, véase la figura 2, (Sousa, Kennedy, & Mitc, 2003).

Figura 2

Distribución de Rhizophora mangle.



Nota: En color verde, lugares donde la especie es nativa. En color morado, donde fue introducida. Obtenido de (Royal Botanic Gardens, 2023)

Cuando recién se despegan de la planta madre, los hipocótilos flotan en forma horizontal, pero a medida que la parte inferior se llena de agua salada, puede mantenerse a flote de manera vertical y establecerse en el lodo (Cornejo, 2014). Según el experimento realizado por (Davis, 1940), los propágulos de *R. mangle* se transportan de manera horizontal y demoraban aproximadamente 60 días en establecerse y enraizarse en aguas muy saladas. En aguas con menor porcentaje, este proceso era más rápido. Luego de enraizarse, el propágulo naturalmente se endereza.

1.5.2 Rhizophora mangle en Ecuador

El bosque de manglar se extiende todas las provincias del litoral ecuatoriano, concentrándose en su mayor parte en el norte del país, en la provincia de Esmeraldas y más al sur, en el Golfo de Guayaquil. De toda la extensión de manglar en el país, un 90% constituye a la especie de *Rhizophora mangle*. Nuestro manglar es considerado como “el más alto del mundo”, reporta individuos con alturas mayores a 50 metros y con 1.65 metros de diámetro del tronco. Algunos botánicos hipotetizan que estas características son obtenidas debido a su favorecedor hábitat y adecuadas condiciones climáticas y del suelo (Acosta Solis, 1961).

La extensión del manglar ha sido sujeta a cambios en los últimos años. Se estima que en 1969 existían 203 624 hectáreas de manglar. Este número ha disminuido debido a la actividad antropogénica, principalmente por el aumento de establecimientos para el cultivo de camarón, a 147 228 ha en el año 2006. Sin embargo, se reportado un aumento de extensión (aproximadamente 161 835 ha) debido a las acciones de reforestación y remediación del bosque de manglar realizadas por entidades como el Ministerio del Ambiente (MAE), asociaciones de cangrejeros y concheros (Ministerio del Ambiente, 2017). La implementación de políticas que regulan el uso de los recursos bióticos del manglar también contribuye a la protección de este ecosistema (CLIRSEN, 2006).

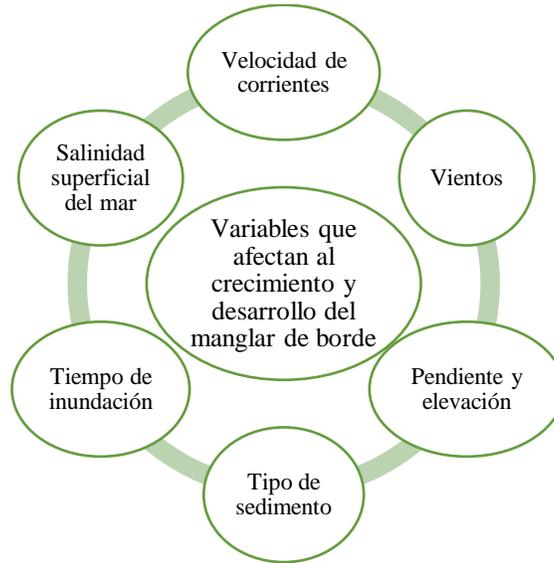
1.5.3 Condiciones físicas requeridas para el desarrollo del manglar

Uno de los fallos más grandes a la hora de querer reforestar manglar es plantar especies de manera empírica, es decir, sin conocer las características físicas, químicas y biológicas de las mismas que le permitirán sobrevivir o no en su entorno; incluso pueden causar un desequilibrio a ecosistemas preexistentes.

Para el género *Rhizophora*, existen múltiples variables físicas que pueden afectar su crecimiento. Véase la figura 3.

Figura 3

Variables que afectan al crecimiento y desarrollo del manglar de borde



En el estudio para la conservación de manglar realizado en la Gran Bahía de Xiamen en el suroeste de China, se identifican las variables más influyentes para el desarrollo de manglar. La tabla 3 exhibe los diversos intervalos de las variables físicas, abarcando desde niveles considerados inadecuados hasta condiciones perfectamente propicias para el desarrollo del manglar de borde.

Tabla 3

Variables identificadas para la conservación de manglares

	Inadecuado	Desfavorable	Neutral	Favorable	Perfectamente favorable
Pendiente (%)	>4%	3%–4%	2%–3%	1.5%–2%	0%–1.5%
Velocidad de corriente	Alto	Moderadamente alto	Moderado	Moderadamente bajo	Bajo
Velocidad de viento	Alto	Moderadamente alto	Moderado	Moderadamente bajo	Bajo
Elevación (m)	> 4	3–4	2.5–3	2.5- 1.75	0–1.75
Tiempo de inundación mareal (h)	>12	10–12	0–1, 9–10	1–2, 6–9	2–6
Salinidad superficial del mar (UPS)	>45	40–45	35–40	30–35	0–30

Nota. Estudio realizado por (Jie, Bingchao, Luzhen, & Alexandros, 2022)

1.5.3.1 Velocidad de corriente

La velocidad de corrientes marinas es una variable crucial para el desarrollo de manglares. Los propágulos solo pueden prosperar en zonas de baja energía donde exista bajo o nulo riesgo de erosión costera (Kairo, 1995). Zonas con alta energía son poco adecuadas para los propágulos al impedir su establecimiento. Los propágulos necesitan un tiempo luego de asentarse en un sitio para poder enderezarse y enraizarse. Durante este período son vulnerables a los cambios de marea y al oleaje bruscos. Además, por el continuo lavado debajo de las raíces, los sedimentos y nutrientes necesarios para su desarrollo son afectados.

Las costas ecuatorianas poseen un carácter meso-mareal, es decir con un rango de mareas de 2 m como mínimo a 4 m como máximo. Para este tipo de estuarios, las velocidades máximas por lo general ocurren entre el nivel máximo y mínimo de marea, también llamada pleamar y bajamar (Vera, 2003). En el canal del Morro, zona exterior del estuario del Golfo de Guayaquil, se reportan valores históricos de velocidades de corriente promedio de aproximadamente 1.63 m/s como máxima velocidad hasta de 0.5 m/s como mínima (Stevenson, 1981).

1.5.3.2 Velocidad de viento

Esta variable afecta de manera distinta en las diferentes edades del manglar. Por ejemplo, si se refiere a los hipocótilos, el viento es un principal factor que determina el transporte de los propágulos. Los propágulos que poseen una menor densidad son transportados de manera más fácil por los canales. Al poseer una dispersión horizontal y, a veces vertical, la velocidad de viento afecta medianamente a su trayectoria de dispersión (Van der Stocken, y otros, 2015). En manglares

adultos, los vientos fuertes y tormentas tropicales causan una gran mortalidad de árboles, así como cambios en sus procesos bioquímicos.

Los vientos en el Golfo de Guayaquil se caracterizan por provenir tanto del mar como de la tierra, por lo tanto, poseen carácter irregular. En la estación establecida por el INOCAR en la isla Puná, los vientos poseen una magnitud de 3 m/s y predomina la dirección SW y W. (Gálvez & Regalado, 2007)

1.5.3.3 Pendiente y topografía

Las raíces de *Rhizophora mangle* están adaptadas para zonas de poca pendiente, donde exista un ingreso continuo de la marea. Sus raíces aéreas están diseñadas para extenderse incluso en terrenos con desniveles, presentando una mayor altura en zonas frente al oleaje y menores alturas en su parte posterior (Vanegas Giraldo, 2015).

Los aportes anuales de sedimentos a una zona, al elevar la topografía, permiten al manglar colonizar el sitio. Los niveles de topografía aptos varían dependiendo si se trata de un mangle adulto o una plántula. Según un estudio realizado en Sinaloa, México por la UNAM, los niveles topográficos para un mangle rojo adulto varía de entre -15.8 cm a 55.2 cm de altura mientras que para una plántula estos niveles se estrechan (-0.8 a 37.2) (Flores-Verdugo, Agraz Hernández, & Martínez-Cordero, 1995).

1.5.3.4 Tiempo de inundación o hidropériodo

Esta variable es de suma importancia tanto para la reforestación de manglar como para la creación de nuevas zonas de desarrollo natural. El hidropériodo es la característica de los humedales de estar o no inundados, es decir la duración y frecuencia con la que un sitio se inunda,

así como la profundidad que alcanza el agua. Está influenciado en su mayoría por la entrada de marea y la variación de la topografía de la zona. En menor escala, las afluentes de ríos e inundaciones provocadas aguas arriba afectan al hidropériodo.

Períodos de baja o alta inundación pueden tener efectos contrarios en los manglares. En zonas de baja frecuencia de inundación, puede afectar al aporte de nutrientes mientras que zonas con mayor frecuencia de inundaciones eleva los niveles de estrés de las plantas (Krauss, Doyle, Twilley, Rivera-Monroy, & Sulliv, 2006). Períodos de baja o alta inundación pueden tener efectos contrarios en los manglares. En zonas de baja frecuencia de inundación, puede afectar al aporte de nutrientes mientras que zonas con mayor frecuencia de inundaciones eleva los niveles de estrés de las plantas (Krauss, Doyle, Twilley, Rivera-Monroy, & Sulliv, 2006). Según el estudio realizado por (Reyes & Tovilla, 2002), las plántulas de manglar rojo enfrentaron una mortalidad mayor al 60% al no cumplir con sus necesidades de tiempo de inundación.

1.5.3.5 Salinidad

La salinidad se considera uno de los factores abióticos más influyentes en la distribución y abundancia del manglar en el borde costero. El nivel de salinidad es vital para el manglar, siendo capaz de sobrevivir desde aguas dulces hasta hipersalinas. Esta capacidad de adaptación varía según la especie de manglar. El manglar de borde está expuesto a la salinidad promedio del mar (35 PSU), mucho mayor que sus otras dos clasificaciones, demostrando su adaptabilidad a altos niveles de salinidad.

La salinidad actúa como un limitante en el crecimiento del manglar. A mayores niveles, los árboles pueden presentar un tamaño menor, como los manglares de los Everglades, Florida

(Koch & Snedaker, 1997). Los hipocótilos son más sensibles a ambientes con una alta salinidad que los ejemplares adultos (Chapman, 1976).

Dentro de los ramales superiores del Estero Salado se presentan valores promedios de salinidad superficial de 12 hasta 24 PSU (Avilés, 1989) hasta valores superiores a 35 en la zona exterior de Posorja (Arreaga Vargas, 2000).

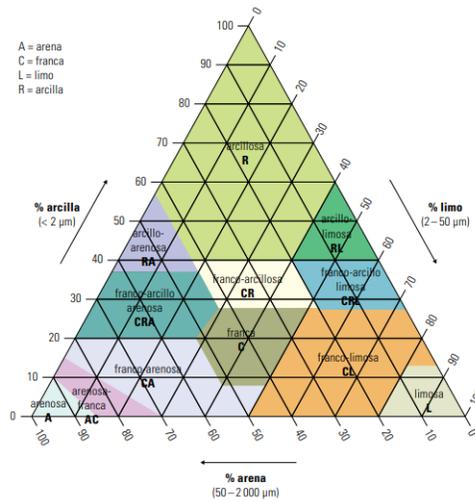
1.5.3.6 Características de sedimentos

Los suelos sirven como el medio que poseen los manglares para la captación de sus nutrientes. El suelo del manglar se considera un suelo saturado, dada su capacidad de acumular agua. Se considera una de las variables más difíciles para estudiar debido a la complejidad de la obtención de muestras en los sitios deseados.

La composición mecánica del suelo, mejor conocida como la textura, se considera fundamental para los sedimentos, pues está relacionada directamente con la fertilidad, transporte y retención de agua de un suelo. Se clasifican en doce tipos de texturas diferentes, las cuales pueden ser agrupadas en tres tipos: arenosa, limosa y arcillosa. El diámetro de la partícula para cada uno es de 50 a 2.000 micrómetros para la arena, de 2 a 50 micrómetros para el limo y para la arcilla valores menores a 2 micrómetros, véase la figura 4.

Figura 4

Triángulo de textura de sedimentos según la edafología.



Nota. Tomado de (Siebe, Jahn, & Stahr, 1996)

La densidad aparente del suelo se considera una variable fundamental para determinar la producción primaria y/o porcentaje de carbono en el sedimento, así como la estimación de la cantidad de nutrientes del suelo (Siebe, Jahn, & Stahr, 1996). Es la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y su volumen total, incluyendo el espacio entre los poros. Permite identificar el arreglo de las partículas sólidas y los espacios porosos presentes en la estructura del suelo. Para suelos de manglar, la densidad aparente puede variar desde valores menores a 0.2 g/cm^3 en suelos orgánicos y porosos, hasta valores de 2 g/cm^3 en suelos muy compactados y mineralizados (Campos & Moreno-Casasola, 2009).

El contenido de materia orgánica en los suelos de los manglares proviene de diversas fuentes. Desde descargas fluviales, la producción primaria de organismos como fitoplancton y la vegetación adyacente y los detritos de materia en descomposición. Altos contenidos de materia orgánica indican la alta productividad del suelo. En un perfil de suelo, la materia orgánica se concentra en las capas superficiales mientras que en niveles inferiores se presenta disminución

debido a los procesos de mineralización del suelo (Lara-Domínguez , Martínez, Saíñz Hernández, & Vásquez Reyes, 2021).

1.5.3.7 Esfuerzos para reforestación de manglar realizados alrededor del mundo y en el Ecuador.

Alrededor del mundo, los esfuerzos para la reforestación del manglar son realizados con múltiples propósitos. Por ejemplo, en las costas de la Florida el manglar se ha reforestado con el propósito de evitar la erosión costera al ser un gran captador natural de sedimentos (Teas, 1977). En Malasia, se utiliza al manglar como fuente de madera para carbón natural (Chan, 1996) y en Filipinas como hábitat natural para las edades tempranas de peces comerciales (Primavera, 1995).

El bosque de manglar, a pesar de ser un ecosistema de carácter complejo, se considera sencillo de restaurar. Sin embargo, la probabilidad de éxito de una reforestación se reduce a la mitad (Ellison, 2000). Adicionalmente, es muy difícil que un manglar reforestado pueda ser tan saludable que un bosque natural. Sin embargo, cualquier esfuerzo para proteger y/o recuperar el ecosistema es válido en la actualidad.

Figura 5

Reforestación activa de manglar.



Nota. Obtenido de <https://www.undp.org/timor-leste/news/undp-supports-private-public-partnership-mangrove-restoration>

En el Ecuador existe el programa Socio Manglar, creado en el año 2021 a partir de la iniciativa Socio Bosque, el cual permite que quienes protegen el bosque de manglar reciban un incentivo económico fijo dependiendo del área protegida, véase la tabla 4.

Tabla 4

Iniciativa dada por el Ministerio del Ambiente para la remediación de manglar

Área protegida de manglar	Monto
100 a 500 hectáreas	\$ 7.000 USD
500 a 1000 hectáreas	\$ 10.000 USD
Mayor a 1001 hectáreas	\$ 15.000 USD

Nota. Obtenido de (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2014)

La iniciativa tiene como meta incluir hasta 100 mil hectáreas de toda la extensión de manglar del territorio ecuatoriano con el propósito de consolidar concesiones con fines de conservación y explotación responsable y sustentable (**Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2017**).

CAPÍTULO 2

2.1 Metodología

2.1.1 Descripción de la zona de estudio

El estuario del Guayas, ubicado en la costa del Pacífico de América del Sur, destaca como el ecosistema estuarino más extenso en la región (Marín Jarrín, Marín Jarrín, Borbor Córdova, Espinoza Celi, & Domínguez Granda, 2022). Se caracteriza por poseer tanto un estuario interior como uno exterior. El golfo de Guayaquil representa el estuario exterior, mientras que el estuario interior abarca tres áreas:

- 1) El estuario del río Guayas
- 2) La Reserva Ecológica del Estero Manglares de Churute
- 3) La Reserva Faunística de Producción Estero Salado.

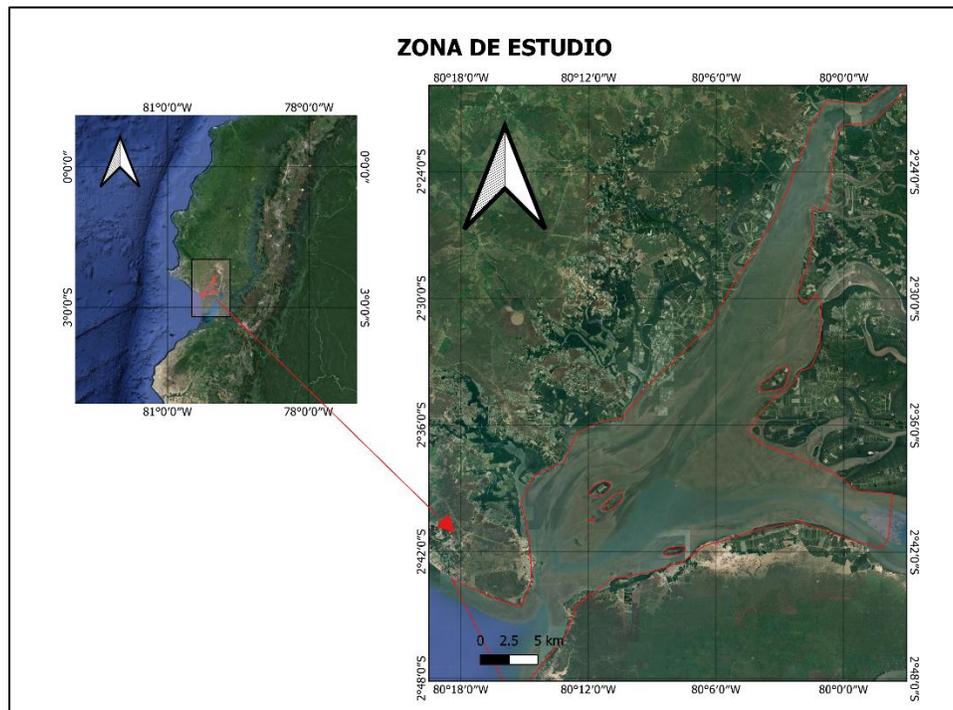
La zona de estudio (figura 6) corresponde al Estero Salado, ubicado en el estuario interior, en la porción noroeste del Golfo de Guayaquil, al suroeste del puerto de la ciudad y se extiende aproximadamente 66 km hasta Posorja. El Estero Salado, ha sido identificado como parcialmente mezclado y puede considerarse como una unidad ambiental autónoma. De hecho, este estuario interior está dividido por una barrera natural de islas y canales que separa el Estero Salado del río Guayas. Como resultado, las aguas marinas fluyen directamente a través del canal de El Morro hacia el Estero Salado, con una contribución mínima de agua dulce proveniente del río Guayas a través del canal de Cascajal, junto con las corrientes de marea (Álvarez Arroyo, Pérez Cayeiro, & Macías Bedoya, 2015).

Además, el Estero Salado experimenta una dinámica física de mareas semidiurnas. Estas mareas están compuestas por dos pleamares y dos bajamares en algo más de 24 horas con pequeñas desigualdades diurnas. La amplitud de la marea varía en el golfo de 1.5 m durante la fase de

cuadratura a 2.3 m en la fase de sicigia. Debido a la compleja geometría del sistema estuarino y la fricción hidráulica, la onda de marea experimenta una gradual deformación hacia el interior del estuario.

Figura 6

Diagrama de la zona de estudio



Este trabajo identificó y analizó cinco variables físicas que influyen en el desarrollo del manglar en el Estero Salado: condiciones de tipo de suelo, velocidad de corriente, topografía, salinidad y vientos. Este proceso se llevó a cabo en 5 etapas de trabajo:

1. Revisión bibliográfica de variables físicas y obtención de datos.
2. Reconocimiento de la zona de estudio con imágenes satelitales ópticas.
3. Caracterización de la zona de control y toma de datos en campo.
4. Realización de modelo hidrodinámico.
5. Procesamiento de datos y realización de mapas con los datos obtenidos.

Tabla 5*Obtención y reconocimiento de datos*

Datos disponibles	Programas de reforestación realizados alrededor del mundo – Bibliografía obtenida.
	Vientos de la plataforma WAVEWATCH-II.
	Datos de salinidad de expediciones pasadas.
	Modelo digital del Terreno proporcionado por CADS.
Datos de campo tomados in-situ	Características de sedimentos obtenidas en campo.
Datos para el modelo	Datos de marea (armónicos y datos in-situ).
	Batimetría de cartas náuticas.
Imágenes satelitales	Imágenes ópticas para identificación de zonas posibles.

Tabla 6*Procesamiento de Datos y evaluación*

Salinidad, topografía e imágenes satelitales	QGis y ArcGis	
Características de sedimentos	Análisis de laboratorio realizado en FIMCM, FCNM y FICT.	Densidad aparente del suelo, materia orgánica y granulometría
Velocidad de corrientes	Hecho en Delft 3D Open Source, Excel, R Studio en Matlab.	Calibración y validación del modelo. Corrida del modelo

Tabla 7*Obtención de resultados*

Mapa con rangos permisibles de zonas óptimas para el desarrollo de manglar	Realizado con herramientas de geo-proceso (ArcGis y QGis)
	Referido a los valores de tolerancia del género <i>Rhizophora</i> .

2.1.2 Revisión bibliográfica de variables físicas y obtención de datos

Para la primera etapa era necesario acceder a datos de la zona de estudio como batimetría, topografía y mareas para esto las principales fuentes de datos fueron proporcionadas por el Centro de Agua y Desarrollo Sostenible CADs y datos de INOCAR. En la tabla 8 se detalla los datos disponibles.

Tabla 8

Datos de Batimetría y marea disponibles

Batimetría	Marea
<p>Estero Salado Ramales (UTM Zone 17 EPSG:32717)</p>	<p>INOCAR: Armónicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2011 Puerto Nuevo • 2008 Isla Puná • 2003 Posorja • 2014 Data de Posorja, • 2012 Puerto Hondo, Puente Zigzag <p>Históricos de marea:</p>
<p>Batimetría IOA WGS64 realizada por Ignace Pekermans de la Universidad de Amberes- Golfo de Guayaquil (Exterior e interior del estero Salado y Río Guayas) a partir de Cartas náuticas del INOCAR</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Enfilada C2 • Enfilada E1 • Puerto Hondo • Tres bocas <p>Marea por hora:</p>
<p>Shapefile de Batimetría 2018 y 2020 (Cartas digitalizadas referidas al MLWS) sin corrección</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2016-2019 Río Guayas, Puerto Bolívar, Posorja, Libertad • 30 de nov 2018 - 31 dic 2019 Data Posorja • 8 de dic 2018 - 31 de dic 2019 Puerto Nuevo • 10 de Ene 2018- 27 de dic 2019 Puná <p>Datos de marea de Jan de Nul de 2018 al 2019</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mareógrafo E1 • Mareógrafo + Base D2 • Mareógrafo C2 • Mareógrafo Muelle Janec - Posorja • Mareógrafo + Base Pilot Station

De igual manera, se accedió a un modelo de elevación digital (MDT) del golfo proporcionado por CADs. Además, se recopiló datos de salinidad medidos en épocas seca y

húmeda durante varios años (1996, 1997, 2012, 2017), obtenidos a través de investigaciones anteriores mediante revisión bibliográfica. Los datos de viento, provenientes de WAVEWATCH-II para el período histórico de 2003 a 2020, fueron procesados con las herramientas Matlab y R Studio.

2.1.3 Reconocimiento de la zona de estudio con imágenes satelitales ópticas

En la fase inicial de identificación de áreas para reforestación, se utilizó imágenes satelitales ópticas de la misión Copernicus SENTINEL-2, se seleccionó las bandas 2, 3 y 4 para analizar cobertura de agua, vegetación y uso del suelo. Se desarrolló un código en Google Earth Engine para descargar imágenes con menos del 20% de nubosidad, en el cual se delimitó un polígono en la zona de estudio con las fechas específicas. Se empleó el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) para evaluar cambios en cuerpos de agua. Este índice utilizó las bandas de Infrarrojo Cercano (NIR) y Verde Visible (Green) para identificar cuerpos de agua y cambios sutiles en su composición. Se seleccionó imágenes anuales de 2018, 2019 y 2020 para las estaciones seca y lluviosa. Utilizando QGIS y ArcGIS, se transformó las imágenes y se empleó la herramienta de Intersección para identificar áreas con cambios significativos. Las áreas con cambios bruscos en la inundación, afectando el desarrollo de manglares, fueron categorizadas como no aptas.

2.1.4 Caracterización de la zona de control y toma de datos en campo

Para analizar el tipo de suelo en el que crece el manglar en la zona de estudio, se recolectó muestras del suelo en el Bajo Zapatero, ubicado en el centro del canal del Morro véase la figura 7. Este lugar se estableció como zona de control debido a su fácil acceso. Se estimó que tiene alrededor de veinticinco años desde su aparición, según los habitantes locales. En este bajo y en

otros cercanos, las plántulas de manglar han crecido con el tiempo hasta formar un pequeño bosque. La acumulación de sedimentos alrededor ha permitido que las plántulas se expandan a áreas circundantes del bajo.

El trabajo de campo se llevó a cabo en los meses de junio, julio y agosto, que corresponden a la temporada seca. Se identificó siete estaciones, extrayendo tres muestras de suelo en cada una con una distancia de tres metros entre ellas, obteniendo un total de 21 muestras de sedimento de manglar de diversas edades. La Tabla 9 proporciona detalles sobre la edad aproximada del manglar en cada estación. La clasificación del manglar consideró como "joven" a la plántula alejada del grupo de árboles, enraizada cerca del agua y la primera en inundarse. El "mangle adulto de 20 años" fue aquel árbol de 2-3 metros de altura cerca del grupo de árboles, con raíces extendidas y poca o nula presencia de flores. Finalmente, el "mangle adulto de 40 años" se refirió a un árbol de 30 metros con raíces aéreas altas y gruesas.

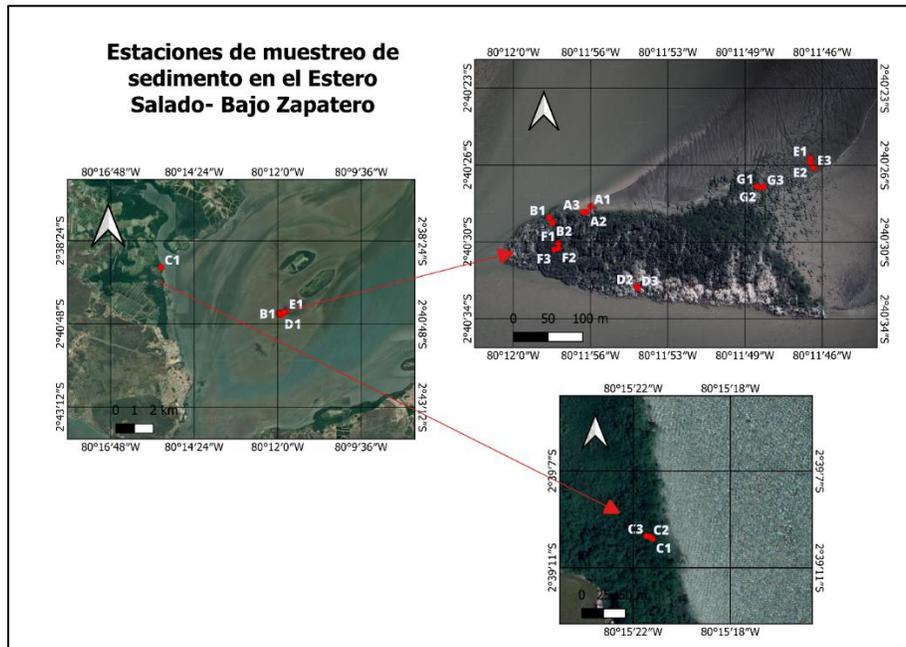
Tabla 9

Edad de muestra según su código de muestra

<i>Código Muestra</i>	<i>Edad de manglar</i>
A1, A2, A3 – E1, E2, E3 – G1, G2, G3	Manglar joven
B1, B2, B3 – D1, D2, D3 – F1, F2, F3	Manglar adulto (20 años)
C1, C2, C3	Mangle adulto (+40 años)

Figura 7

Mapa de zona de toma de muestras - Bajo Zapatero



Posteriormente se trabajó en el laboratorio donde las muestras fueron sometidas los siguientes ensayos:

Granulometría por tamiz

Se llevó a cabo el análisis granulométrico por tamiz para determinar la distribución de tamaños de partículas en las muestras de sedimento. Este método implicó la separación de partículas mediante tamices con aberturas variadas, revelando el tamaño máximo de agregado en cada uno y, por ende, la textura del suelo. Los porcentajes de peso de las partículas retenidas en cada tamiz se expresó en relación con el peso total de la muestra, los cuales se obtuvieron con la ecuación (2.1). Estos porcentajes retenidos se calcularon de forma parcial y acumulativa para cada malla. Se realizó el cálculo de error para conocer si hubo pérdida de muestra durante el proceso del tamizado utilizando la ecuación (2.2). Utilizando el coeficiente de curvatura ecuación (2.3) y el coeficiente de uniformidad ecuación (2.4), se realizó la curva granulométrica. Esta

representación gráfica facilitó la visualización precisa de los diferentes tipos y texturas de suelos presentes en la muestra.

$$\text{Porcentaje retenido parcial} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa total}} * 100 \quad (2.1)$$

$$\% \text{ de error} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa total}}{\text{Masa total}} * 100 \quad (2.2)$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.3)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (2.4)$$

Granulometría láser

Para realizar este análisis, se empleó el equipo Horiba LA-300, que medía el tamaño de partículas en diversos materiales. Su principio de funcionamiento se basaba en la medición mediante un espejo láser, que calculaba la distribución del tamaño de las partículas a partir de la distribución de la intensidad de la luz dispersada generada tras la irradiación láser sobre las partículas.

Contenido de materia orgánica

Se empleó el método de ignición o calcinación para determinar la cantidad de materia orgánica en el suelo o sedimento. Este procedimiento implicó la descomposición térmica controlada de toda la materia orgánica presente. Se calentó una cantidad preestablecida de muestra en un crisol de cerámica durante 6 a 8 horas a temperaturas entre 350 y 440°C. Tras el enfriamiento, se registró el peso final de la muestra. El contenido de materia orgánica se calculó como la diferencia entre los pesos inicial y final de la muestra, dividida por el peso inicial, multiplicada por 100%, según la ecuación (2.5). Es esencial que la muestra esté libre de humedad antes de realizar el cálculo del contenido de materia orgánica.

Contenido de materia orgánica:

$$\%MO = \left[\frac{P1-P2}{P2-C} \right] * 100 \quad (2.5)$$

Donde:

- **P1:** peso del suelo antes de la calcinación
- **P2:** peso del suelo después de la calcinación
- **C:** peso del crisol

Densidad Aparente del suelo (Bulk Density)

La densidad aparente del suelo, también conocida como densidad aparente seca (BD por sus siglas en inglés "Bulk Density"), representó el peso del suelo seco dividido por el volumen total del suelo, como se indica en la ecuación (2.6). Este volumen abarcó la suma de los volúmenes ocupados por sólidos y poros que podían contener aire o agua, o ambos.

$$\text{Soil Bulk Density} = \frac{\text{Peso suelo seco}}{\text{Volumen del anillo}} \quad (2.6)$$

Para caracterizar el tipo de suelo en el resto del canal se utilizó datos del Estudio de Impacto ambiental realizado previo al dragado del canal de acceso del año 2018. Y posteriormente utilizando QGIS se realizó un mapa que identifica los tipos de sedimentos presentes en el Estero.

2.1.5 Realización de modelo hidrodinámico.

Para la obtención de la velocidad de corriente se construyó un modelo hidrodinámico del canal del estero en el módulo de Flow en Delft 3D. El modelo Delft3D es un conjunto de herramientas de modelización numérica tridimensional desarrollado por el instituto de investigación Deltares en los Países Bajos. Este software puede utilizarse en modo 2D o 3D para simular flujos, olas, transporte de sedimentos, calidad del agua, así como procesos morfodinámicos y ecológicos en áreas costeras, ríos, ensenadas, estuarios o lagos

Uno de sus módulos, y el que se utilizó para este proyecto, Delft3D-FLOW, es un programa de simulación hidrodinámica multidimensional. Su objetivo principal es simular los patrones de

flujo en masas de agua mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible, teniendo en cuenta los supuestos de Boussinesq. Estas simulaciones consideran las variaciones de mareas, condiciones meteorológicas y oleaje. Además, las ecuaciones se calculan sobre una malla escalonada, ya sea rectilínea o curvilínea, mediante un método de diferencias finitas.

Set up del modelo hidrodinámico en Delft 3D-FLOW

Datos disponibles:

- *Batimetría*

El conjunto de datos batimétricos fue proporcionado por el Centro de Agua y Desarrollo sostenible, esta data fue obtenida de cartas náuticas del Instituto Oceanográfico Nacional de la Armada del Ecuador (INOCAR). Para completar aquellas áreas donde no hubo datos se utilizó batimetría de la plataforma GEBCO. Las profundidades en los canales internos alcanzaron hasta aproximadamente 20 m aumentando hacia la desembocadura del golfo donde en la zona más externa las profundidades variaron entre 800 y 1000 m.

- *Mareas*

Los datos para las condiciones de borde fueron datos de armónicos de marea de las estaciones de INOCAR: Data Posorja, Puerto Nuevo y Puna. Para la calibración del modelo se utilizó datos de nivel de marea de mareógrafos de Jan de Nul los cuales consistieron en mediciones horarias para el año 2019.

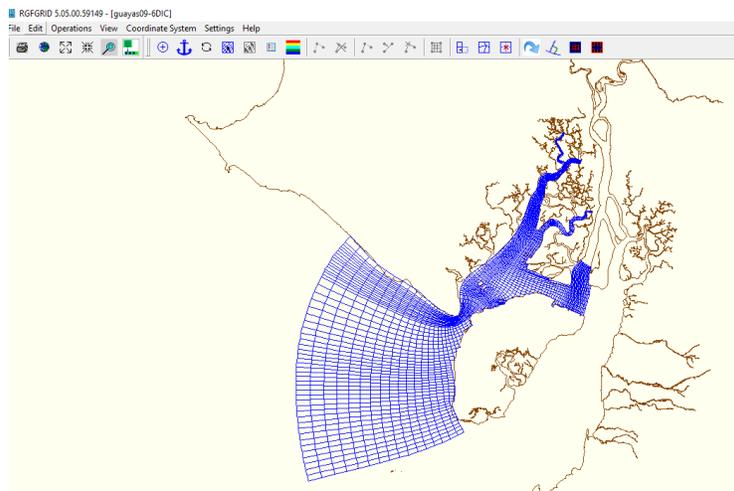
Construcción de la grilla y extensión del dominio

La grilla abarcó parte del Golfo de Guayaquil, desde Anconcito hasta aproximadamente Puerto Nuevo, extendiéndose hacia el interior del estero Salado y también cubrió una porción del canal de Cascajal, como se observa en la figura 8. El dominio total de estudio constó de 182 celdas

en la dirección M y 134 celdas en la dirección N, abarcando aproximadamente 3500 km². La resolución espacial de la malla variaba entre 250 m y 1 km. Construida con el programa RGFGRID de Delft3D en coordenadas esféricas, la malla curvilínea se diseñó tras un ejercicio preliminar que evaluó la influencia de la zona del río Guayas en los niveles de marea en el canal del Estero Salado, mostrando cambios no significativos. Por esta razón, la malla no se extendió hacia la zona del río, también debido a la falta de datos actualizados para esa región.

Figura 8

Extensión de la grilla a lo largo del Estero Salado y parte del Golfo de Guayaquil

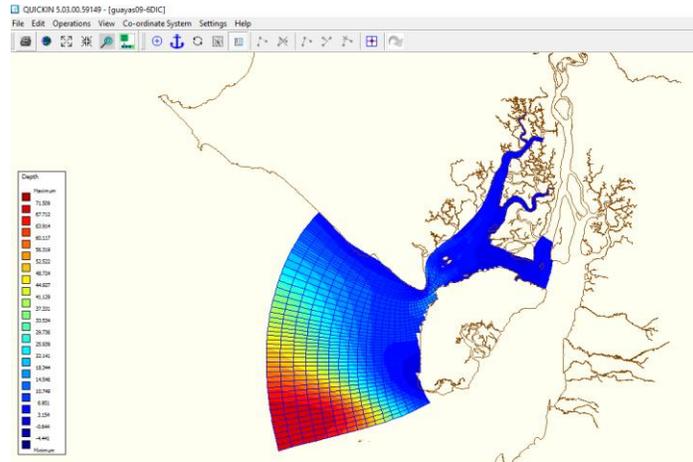


Generación de batimetría

Se generó un archivo (. *dep) con los datos de batimetría tipo .shp proporcionados por CADs detallados anteriormente véase la figura 9. Este archivo se creó en la herramienta QUICKIN de Delft3D programa que sirve la generación, interpolación, manipulación y visualización de variables que varían espacialmente como la batimetría.

Figura 9

Batimetría interpolada utilizando el módulo QUICKIN de Delft 3D

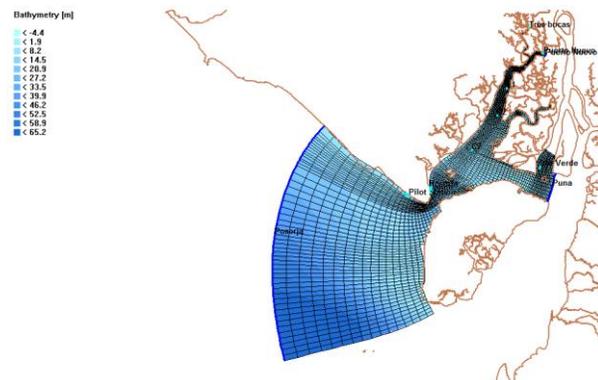


Condiciones de Borde

Las condiciones de límites abiertos representaron la influencia del mundo exterior y se definieron lejos de las áreas de interés. El modelo incluyó un límite abierto ubicado en la boca del estuario exterior. Para este estudio, se utilizaron como condición de frontera abierta los componentes armónicos de marea del mareógrafo de Posorja, situado en el extremo de la sección límite. Para mejorar la sección de Cascajal, se colocó una condición de borde con datos de Puná en el extremo este y, finalmente, se añadió un borde en el extremo interno con armónicos de marea de Puerto Nuevo, como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Condiciones de borde (Posorja, Puerto Nuevo y Puná) ubicadas a lo largo de la grilla



Calibración y validación

El modelo fue calibrado ajustando dos parámetros físicos: el coeficiente de fricción de Manning y la viscosidad de Eddy. Los valores óptimos de estos parámetros se determinaron mediante la comparación entre los datos simulados de nivel de agua y los datos medidos por cinco mareógrafos de Jan de Nul ubicados a lo largo del estero (E1, D2, C2, Muelle Janec, Base Pilot Station), como se muestra en la figura 11 y dos mareógrafos de INOCAR (Posorja y Puerto Nuevo). Se llevaron a cabo varias simulaciones, calculando su nivel de correlación. El período de tiempo utilizado para el proceso de calibración fue el mes de enero de 2019.

Figura 11

Mapa donde consta la ubicación de mareógrafos de Jan De Nul



Para calibrar el modelo con respecto al coeficiente de fricción de Manning se consideró valores tomados de la tesis de Viteri 2016 “Estudios de escenarios de derrame de hidrocarburos en el medio marítimo de la base naval sur de Guayaquil”, en donde se estimó la rugosidad en función de varios criterios. Los canales del área de estudio se definieron como lentos, con fondo uniforme, sin piedras, con vegetación, presencia de meandros y tipo de fondo limo, por tal motivo se

establecieron valores de 0.025-0.030–0.035 y 0.040. Por otro lado, la calibración de la viscosidad turbulenta se llevó a cabo mediante la afinación de su magnitud en un intervalo que abarcó desde 10 m²/s hasta 100 m²/s. Según (Deltares, 2016) , en el caso de áreas extensas de mareas con una dimensión de cuadrícula que supera los cientos de metros, como en este estudio, los valores convencionales de viscosidad de remolino se sitúan dentro de dicho rango.

Tabla 10

Parámetros de rugosidad y turbulencia utilizados en la calibración del modelo

Coefficiente de fricción de Manning	
Canales lentos con fondo uniforme, sin piedras, tipo de fondo limo, pozos profundos.	0.025-0.030
Igual que el anterior, pero con más piedras y algo de vegetación.	0.035-0.040
Viscosidad turbulenta	
áreas extensas de mareas con una dimensión de cuadrícula que supera los cientos de metros	10-50-100 m ² /s.

Indicadores estadísticos:

Se utilizo dos indicadores estadísticos para evaluar el mejor ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning y viscosidad turbulenta en el modelo:

Coefficiente de correlación el cual varió de 0 a 1 e indicó qué tan bien el modelo replicó los datos observados o qué tan similar fue el comportamiento de ambos conjuntos de datos del nivel del agua. Cuanto mayor fue su valor, mejor fue la correlación entre ambos conjuntos de datos.

Root-mean-square error (RMSE), Raíz del Error Cuadrático Medio, este parámetro midió la discrepancia absoluta entre las predicciones y las observaciones. Un RMSE más alto indicó un mayor error o diferencia entre ambos conjuntos de datos. En consecuencia, los valores ideales de RMSE se acercaron a cero, indicando una mejor concordancia entre las predicciones y las observaciones.

Una vez que el modelo fue calibrado y validado, se lo empleó para calcular la velocidad de corriente en diversas condiciones climáticas y fases lunares durante el flujo y reflujo de marea en la zona de estudio. Se creó gráficos y videos utilizando la herramienta QUICKPLOT para su posterior análisis.

2.1.6. Procesamiento de datos y realización de mapas con los datos obtenidos.

Esta fase implicó el procesamiento de los resultados derivados tanto del trabajo de campo como del laboratorio, junto con los obtenidos a través del modelo y los datos recopilados, como el Nivel de Elevación Digital, mediciones de salinidad y viento. Estos datos fueron procesados y analizados mediante el uso de herramientas como Matlab y QGIS, con el fin de generar mapas que representaran los rangos óptimos de las variables físicas.

Se obtuvo la topografía de la zona intermareal utilizando cartas náuticas del INOCAR de los años 2018 y 2020 a una escala de 1:100.000. En QGIS, se georreferenciaron las cartas, se vectorizaron componentes como la línea de costa y puntos de batimetría, y se realizó la interpolación mediante el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW) para procesar datos de elevación. Además, se emplearon modelos digitales de terreno proporcionados por CADS y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para obtener curvas de nivel en la zona de Posorja y el Canal exterior del Estero Salado.

Se llevó a cabo una reclasificación de la elevación dentro de la zona. Las curvas de nivel se categorizaron en cinco clases según la elevación y su importancia para el manglar. Cada categoría se identificó con colores únicos para facilitar su distinción (tabla 11).

Tabla 11*Clasificación de Curvas de Nivel según Elevación y Condición para el Manglar*

Condiciones del manglar	Elevación (en metros)	Colores únicos
Inadecuado	$> 4 $ m	Rojo
Desfavorable	$ 3 - 4 $ m	Naranja
Neutral	$ 2 - 3 $ m	Amarillo
Favorable	$ 1 - 2 $ m	Verde claro
Adecuado	$< 1 $ m	Verde

Se descargaron los datos de vientos de la plataforma WAVEWATCH-II, ya que no se contaba con información del sitio de estudio. Se obtuvieron datos del punto con coordenadas (X: 278.75, Y: -3) utilizando Matlab. Se desarrolló un script en R Studio para procesar los datos, realizar la limpieza y representar gráficamente una rosa de vientos con los valores promedio de la región para su análisis. La rosa de vientos, basada en histogramas, mostró la frecuencia de ocurrencia de los vientos en diferentes direcciones (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

En cuanto a los datos de salinidad recopilados en estaciones húmeda y seca durante diferentes años, se utilizó herramientas como ArcGIS y QGIS. Se georreferenció las estaciones de toma de datos, vinculándolas con sus valores medidos. Luego, se interpoló estos puntos para estimar los valores a lo largo del canal del estuario en ambas estaciones, proporcionando así una representación más completa de la distribución de la salinidad en la zona.

CAPÍTULO 3

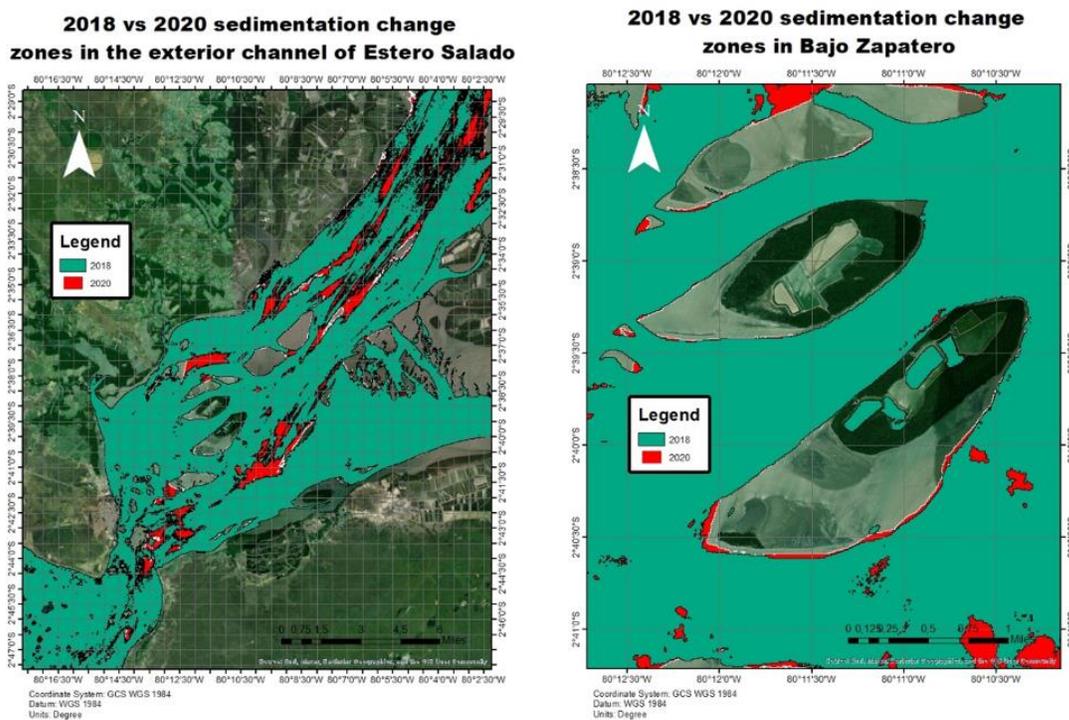
3.1 Resultados y análisis

3.1.1 Evolución en la zona de estudio de 2018 a 2020

Al realizar la comparación de las imágenes satelitales ópticas de los años 2018 y 2020, se evidenció cambios especialmente en la zona superior del estuario interior y en el estrechamiento del estuario a la altura de Punta del Morro y Punta Trinchera (figura 12).

Figura 12

Mapa de zonas de acreción (en color rojo) desde los años 2018 a 2020



La región central del canal de El Morro, que incluye las islas Manglecito Chico, Manglecito Grande y bajo Zapatero, así como otros afluentes sin nombre, reveló una acumulación leve de sedimentos en la porción sur, próxima al bajo Zapatero. Las formas alargadas e irregulares a lo largo del canal no fueron consideradas áreas óptimas, ya que pudieron corresponder a sedimentos en suspensión, identificados de manera incorrecta como zonas de acumulación.

Otra área donde se observó notable acumulación de sedimentos es en la intersección triangular entre el canal de El Morro y el canal de Cascajal. En relación con esto, el bajo más cercano al estrechamiento destacó por la variación de área más marcada entre todos los bajos centrales. Contrariamente, las áreas de erosión fueron evidentes en la zona norte de los bajos centrales, muy cerca de la isla Manglecito Grande. Sin embargo, los playones al norte de la isla Puná también exhibieron los patrones más pronunciados de erosión durante el período de dos años.

3.1.2 Características de sedimentos

En la región del Bajo Zapatero, se identificó la presencia principalmente de arenas finas y medias mal gradadas, tanto en el análisis mediante granulometría con tamiz como en el análisis por láser, los resultados se detallan en la tabla 12.

Según la Evaluación de Impacto Ambiental realizada en el canal en 2018, el Estero Salado presentó materiales de fondo suelto, principalmente arenoso limoso y limoso arenoso. Esta composición es constante desde la parte norte del estero hasta la boya 50, donde el contenido de arena aumentó significativamente, superando el 40% de composición. Sin embargo, en la sección del canal del Morro, se observó material más grueso, con la presencia de bancos arenosos y afloramientos rocosos entre las boyas 10 y 12 del canal de navegación. En la zona de conexión con el canal de Cascajal, se notó la presencia de material fino, véase la figura 13.

Por lo tanto, esto indicó que en las zonas más externas del canal donde hay mayor energía hay una mayor presencia de material grueso en comparación con las áreas internas, debido a las condiciones de oleaje y mareas.

Tabla 12*Detalle de resultados de granulometría láser de muestras de sedimentos*

Código muestra	D50-mm (Tamizado)	D50-mm (Láser)	Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo	Tipo de manglar
A1	0.213	0.121	SP	Arena fina	Mangle joven
A2	0.246	0.113	SP	Arena fina	
A3	0.257	0.087	SP	Arena fina	
B1	0.228	-	SP	Arena fina	Mangle adulto (+20)
B2	0.208	-	SP	Arena fina	
B3	0.224	-	SP	Arena fina	
C1	0.474	0.108	SP	Arena Media-fina	Mangle adulto (+40)
C2	0.483	0.079	SP	Arena Media-fina	
C3	0.576	0.126	SP	Arena Media-fina	
D1	0.229	-	SP	Arena fina	Mangle adulto (+20)
D2	0.227	-	SP	Arena fina	
D3	0.216	-	SP	Arena fina	
E1	0.226	-	SP	Arena fina	Mangle joven
E2	0.228	-	SP	Arena fina	
E3	0.216	-	SP	Arena fina	
F1	0.216	0.154	SP	Arena fina	Mangle adulto (+20)
F2	0.224	0.141	SP	Arena fina	
F3	0.229	0.258	SP	Arena fina	
G1	0.210	0.167	SP	Arena fina	Mangle joven
G2	0.217	0.143	SP	Arena fina	
G3	0.222	0.121	SP	Arena fina	

Figura 13

Zonificación de tipo de sedimento según revisión bibliográfica



El manglar prospera de manera óptima en áreas con sedimentos finos, como limos y arcillas. Esto sugirió que los lugares más propicios para el desarrollo de las plántulas incluirían aquellos con este tipo de sedimentos, incluyendo también las zonas con arena. En consecuencia, el canal presentó un tipo de sedimento altamente adecuado para el crecimiento del manglar.

Entre las dieciocho muestras recolectadas durante el trabajo de campo, las muestras C de manglar adulto con más de 40 años, obtenidas en el lado oeste del canal del Morro, destacaron por su elevado contenido de materia orgánica como se observa en la figura 14. Estas muestras presentaron una alta retención de líquidos, similar a la porosidad de una esponja, y exhibían un

color café parduzco debido a la presencia de raíces de diversos tamaños entre el sedimento y hojarasca, indicando la presencia de materia orgánica fresca, véase la figura 16.

Además, se observó una mayor diversidad de especies alrededor de la ubicación de la muestra C, que incluyó crustáceos, moluscos y una variedad de insectos. En contraste, las muestras de sedimento tomadas alrededor de mangles jóvenes y adultos de más de 20 años mostraron variaciones en el color, desde tonos grises que evidenciaban mineralización, poca oxigenación y compactación del sedimento (INECOL, 2022), hasta tonos café claro, indicadores de presencia de materia orgánica en descomposición. También se detectó la presencia de organismos en la superficie del suelo, como equinodermos y poliquetos véase las figuras 15 y 16.

Figura 14

Gráfico de barras de contenido de MO por muestras tomadas

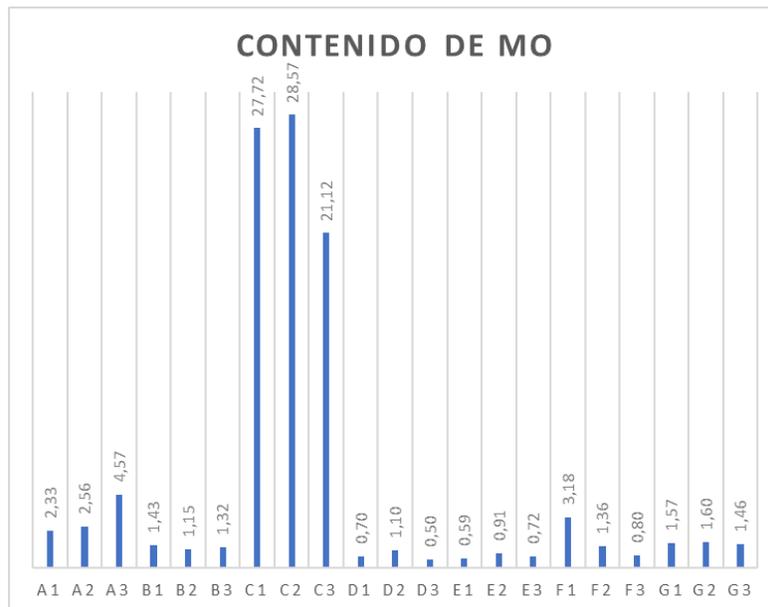


Figura 15

Presencia de equinodermos en la zona de toma de muestras de sedimento



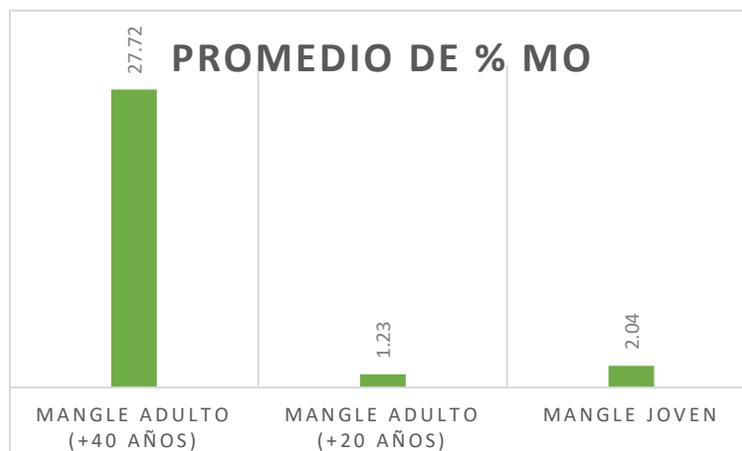
Figura 16

Diferentes tonalidades (grisáceas y pardas) en el sedimento



Figura 17

Gráfico de promedio de MO clasificado por edad de mangle



Se registró una densidad aparente significativamente menor en la zona de manglares con más de 40 años, en contraste con las muestras obtenidas en las áreas de mangle joven y de 20 años, que exhibieron valores más altos y características similares entre ambas edades de manglar véase la figura 19. Para más detalle en la tabla 13 se muestran los resultados de densidad aparente.

En la región donde se tomaron las muestras B, ubicada en la zona sur de la isla, se observó una mortalidad de árboles de manglar y la formación de acumulaciones de arena (dunas) como se observa en la figura 18. Debido a su ubicación en el suroeste, esta área acumulaba más sedimentos oceánicos, como arena, que sepultaron las raíces aéreas del manglar, ocasionando su muerte.

Los suelos con una textura fina, una estructura sólida y niveles elevados de materia orgánica exhibieron una densidad aparente inferior en comparación con los suelos de textura gruesa, con una estructura menos definida y bajos niveles de materia orgánica. La presencia abundante de materia orgánica y valores más bajos de densidad aparente mostraron ser condiciones más favorables para la proliferación del manglar.

Figura 18

Presencia de mortalidad de manglar (zona de manglares de +20 años)



Figura 1919

Gráfico con valores de DBD en cada estación de muestra

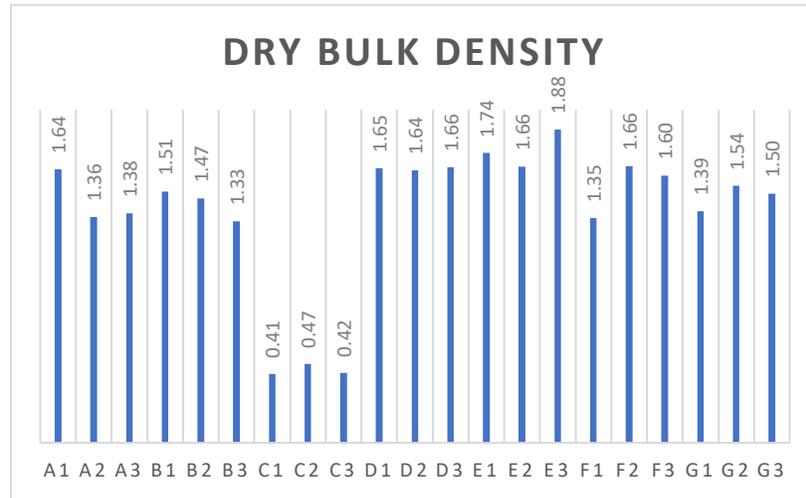


Tabla 13

Resultados de DBD por estación y por edad de mangle

Código Muestra	Densidad aparente g/cm ³	Edad de manglar
A1	1,64	Mangle joven
A2	1,36	
A3	1,38	
B1	1,51	Mangle adulto (+20)
B2	1,47	
B3	1,33	
C1	0,41	Mangle adulto (+40)
C2	0,47	
C3	0,42	
D1	1,65	Mangle adulto (+20)
D2	1,64	
D3	1,66	
E1	1,74	Mangle joven
E2	1,66	
E3	1,88	
F1	1,35	Mangle adulto (+20)
F2	1,66	
F3	1,60	
G1	1,39	Mangle joven
G2	1,54	
G3	1,50	

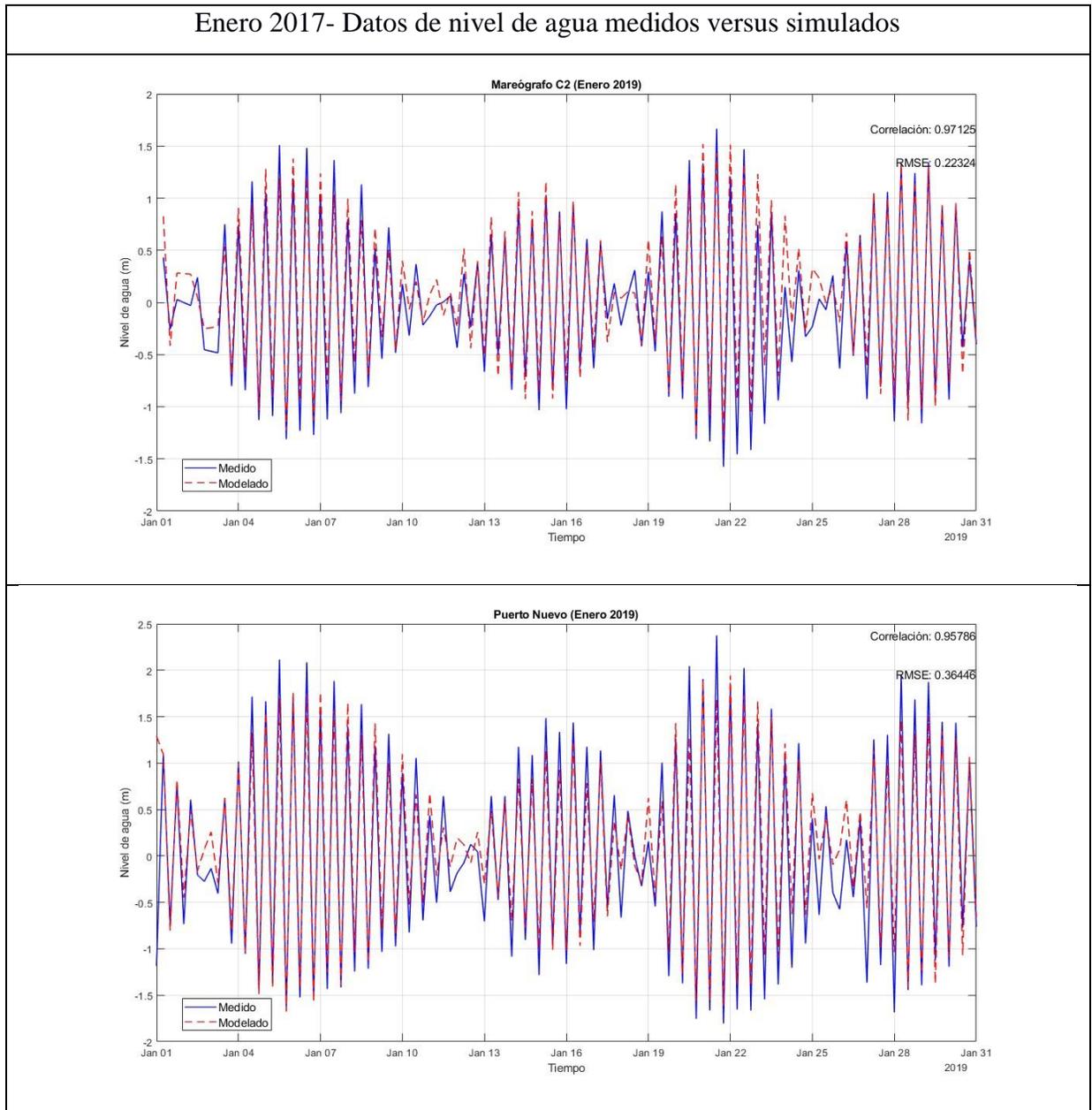
3.1.3 Óptimo ajuste del modelo para obtener la velocidad de corriente

En promedio la mejor simulación se obtuvo con un coeficiente de fricción de Manning de $0,0275 \text{ s/m}^{1/3}$ y viscosidad de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ obteniendo una gran similitud entre los datos medidos y simulados. En la Tabla 14, se presentan las gráficas de datos medidos vs. simulados para tres estaciones de marea en enero de 2019 (C2, Puerto Nuevo y Posorja). Las estaciones Pilot, Janec y Posorja, al ubicarse en zonas más externas del canal, exhibieron un mejor ajuste con valores más altos de rugosidad y viscosidad, indicando una mayor heterogeneidad. En contraste, en las estaciones D2 y C2, ubicadas en el centro del canal, el mejor ajuste se logró con una rugosidad promedio y viscosidad baja.

Finalmente, las estaciones Puerto Nuevo y E1, en la zona más interna del canal, presentaron un mejor ajuste utilizando valores mínimos de rugosidad y viscosidad. Se obtuvieron valores óptimos para los indicadores estadísticos, con R^2 cercanos a 1 y RMSE cercanos a 0 (ver Tabla 15). Además, se observó que el modelo aplicado para simular el nivel del agua fue más sensible a las variaciones en el coeficiente de Manning que a las de la viscosidad de Eddy.

Tabla 14

Datos observados versus datos simulados de enero del 2019 de los mareógrafos: C2, Puerto Nuevo y Posorja



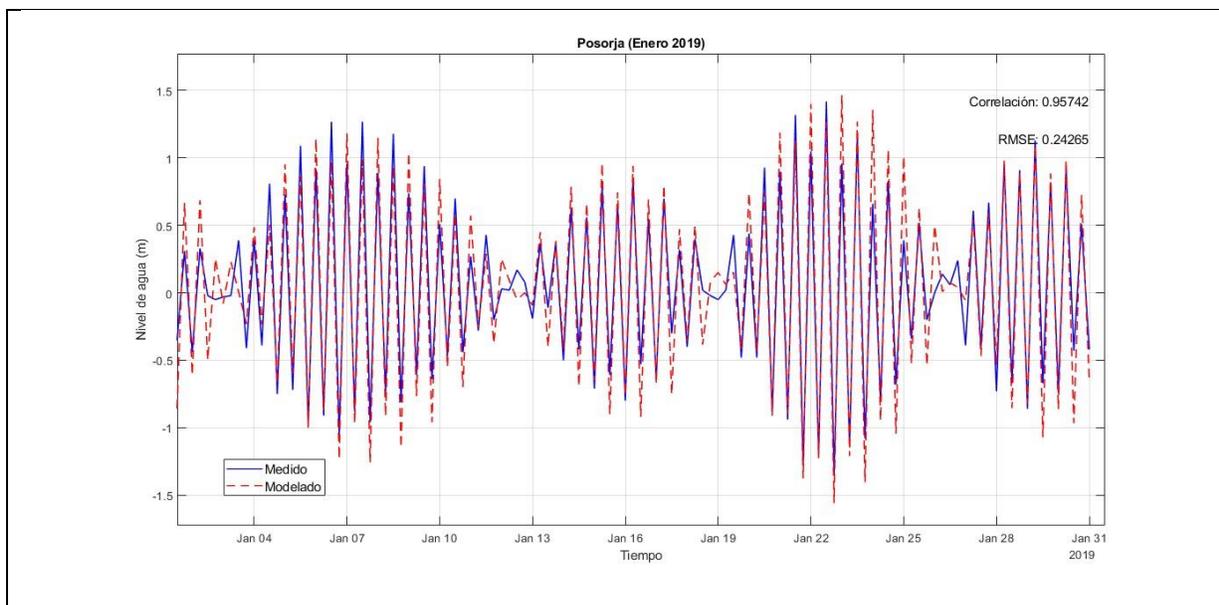


Tabla 15

Resumen de los resultados de la calibración del nivel del agua

Simulación	Tiempo	Rugosidad (Coeficiente de Manning)	Viscosidad de Eddy	R2	RMSE
1	Del 1 al 31 de enero 2019	0.025	10	0.9706	0.2677
2		0.025	50	0.9709	0.2673
3		0.025	100	0.9711	0.2665
4		0.0275	10	0.9714	0.2647
5		0.0275	50	0.9713	0.2652
6		0.0275	100	0.9711	0.2657
7		0.03	10	0.9700	0.2723
8		0.03	50	0.9698	0.2734

Los gráficos de nivel de agua simulados versus medidos de todas las estaciones de marea con los diferentes valores de rugosidad y viscosidad se pueden ver en el Anexo E. Y en el Anexo F se encuentra los valores de correlación y del Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE) obtenidos de cada una de las estaciones de marea que se evaluaron.

3.1.4 Velocidad de corriente

Se examinaron las velocidades de corriente durante las estaciones seca y lluviosa, considerando las fases de sicigia y cuadratura del año 2019 (consulte la tabla 16), con el objetivo de analizar principalmente las velocidades máximas. Además, se observó cómo variaban las velocidades de corriente en condiciones de flujo y reflujo.

Tabla 16

Fechas y condiciones de marea de las velocidades tomadas

	Fecha	Estado de la luna	Mareas
<i>Época lluviosa</i>	6-marzo-2019	Luna nueva	5:27 am bajamar 11:28 am pleamar 5:50 pm bajamar 11:50 pm bajamar
	14-marzo-2019	Cuarto creciente	4:16 am bajamar 10:28 am pleamar 4:36 pm bajamar 10:49 pm pleamar
	20-marzo-2019	Luna llena	4:35 am pleamar 10:42 am bajamar 5:03 pm pleamar 11:11 pm bajamar
	28-marzo-2019	Cuarto menguante	4:32 am bajamar 11:02 am pleamar 4:53 pm bajamar 11:22 pm pleamar
<i>Época seca</i>	7-agosto-2019	Cuarto creciente	3:46 am bajamar 10:10 am pleamar 4:19 bajamar 10:38 pleamar
	15-agosto-2019	Luna llena	5:19 am pleamar 11:18 am bajamar 5:32 pm pleamar

			11:38 pm bajamar
	24-agosto-2019	Cuarto menguante	4:41 am bajamar 10:58 am pleamar 5:19 pm bajamar 11:36 pm pleamar
	30-agosto-2019	Luna nueva	4:56 am pleamar 10:59 am bajamar 5:16 pm pleamar 11:24 pm bajamar

Los gráficos de velocidad expuestos debajo revelan que, durante la época lluviosa, las velocidades fueron superiores con valores de 1.4 m/s en comparación con la época seca. Se observó un flujo más intenso en la boca y cabecera del estuario, especialmente en áreas más estrechas y alrededor de los bajos centrales. Contrariamente, en la región baja y central de los bajos, donde se encuentra el bajo Zapatero, la velocidad fue menor (0.6 a 0,8 m/s). En consecuencia, en las áreas con sedimentos más finos, la corriente tendía a ser predominantemente menor. Por ende, las áreas con disminución de corriente fueron propicias para la acumulación de sedimentos, lo que pudiera resultar en la formación de nuevos bancos de arena con el tiempo. Por otro lado, en las zonas donde la corriente se incrementa, se observó erosión de los sedimentos.

Máximas velocidades en sicigia y cuadratura:

Época lluviosa – marzo 2019

Figura 20

Velocidad máxima de corriente en fase de sicigia del 20 de marzo del 2019

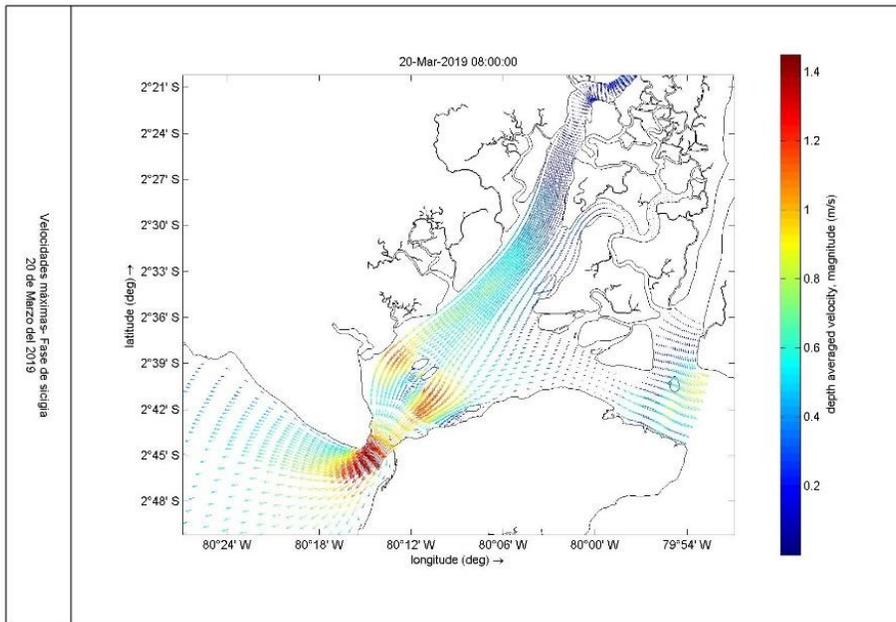
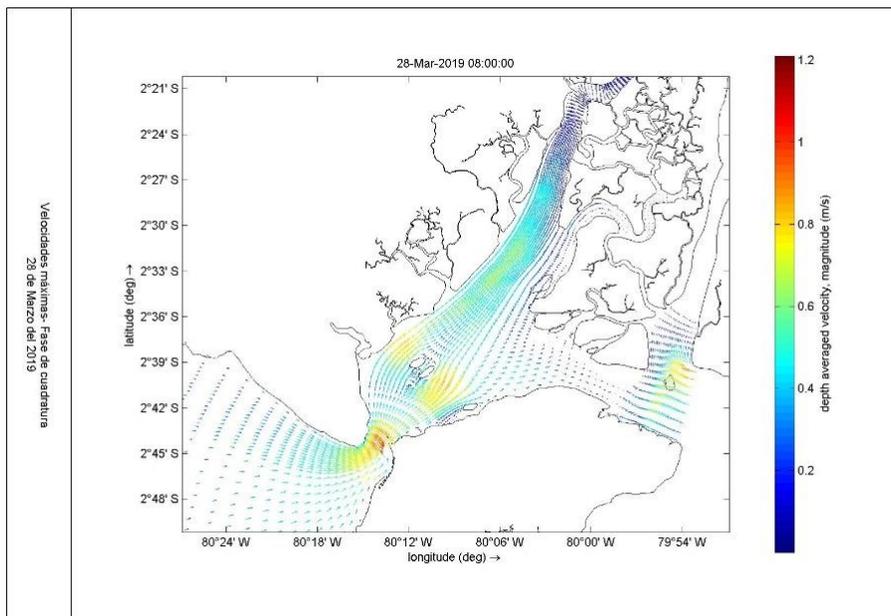


Figura 21

Velocidad máxima de corriente en fase de cuadratura del 28 de marzo del 2019



Época seca – agosto 2019

Figura 22

Velocidad máxima de corriente en fase de sicigia del 15 de agosto del 2019

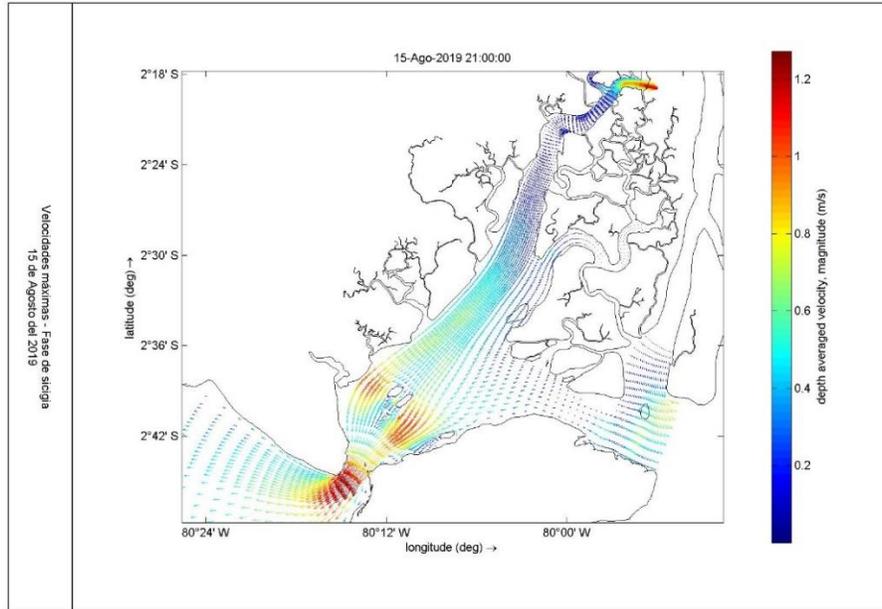
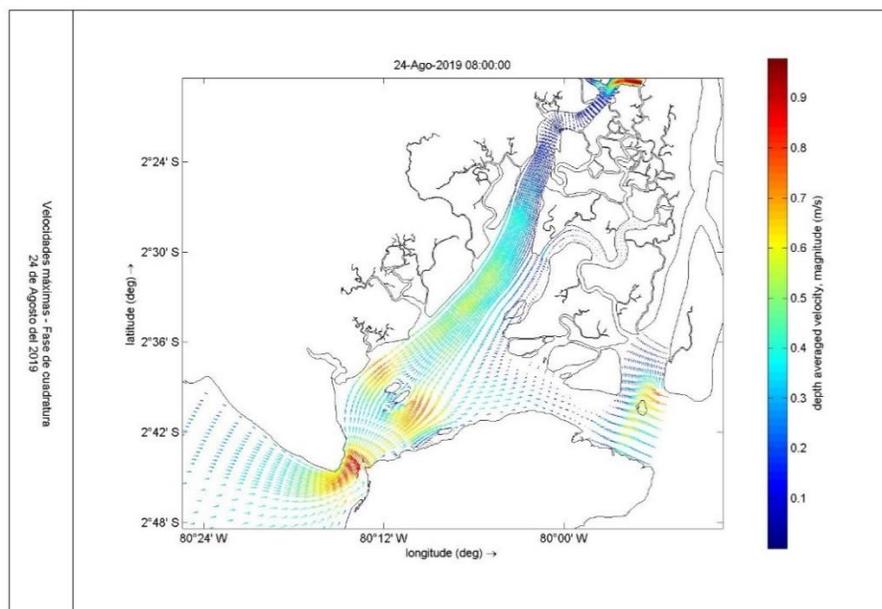


Figura 23

Velocidad máxima de corriente en fase de cuadratura del 24 de agosto del 2019



Además, al analizar cómo se comporta las corrientes en flujo y reflujo, las velocidades máximas de marea solían manifestarse alrededor de la mitad de los ciclos de flujo y reflujo, tanto en la boca como en la cabecera del canal, especialmente durante las mareas de sicigia. Al contrario, las velocidades mínimas se observaron en momentos de estoas, pleamar y bajamar, es decir, en los minutos previos y posteriores al punto donde la marea alcanza su altura máxima o mínima. Estas velocidades mínimas se localizaron en la sección intermedia del canal o en fases de cuadratura. En las ilustraciones 24, 25 y 26 se observa las velocidades en magnitud y dirección de un ciclo de marea en época lluviosa (6 de marzo del 2019).

En consecuencia, se descartó la cabecera (cercana al Pto. Marítimo) y desembocadura (entre Punta del Morro y Punta Trinchera) del estuario como áreas propicias para el crecimiento del manglar, mientras que la zona central, superior e inferior de los bajos, al igual que a lo largo del canal, indicaron ser zonas óptimas para el crecimiento de manglares del género *Rhizophora spp.*, al presentar velocidades menores.

Figura 24

Velocidad de corriente en condiciones de refluo durante las 5:00 a 8:00 am, en Sicgia (marzo 6)

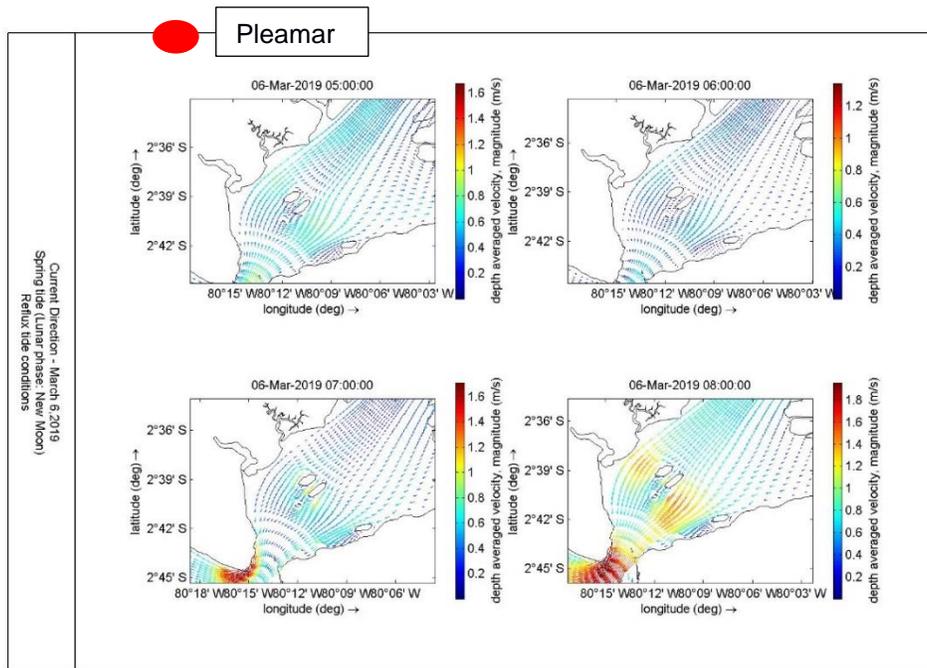


Figura 25

Velocidad de corriente en condiciones de refluo durante las 9:00 a 12:00 am, en Sicgia (marzo 6)

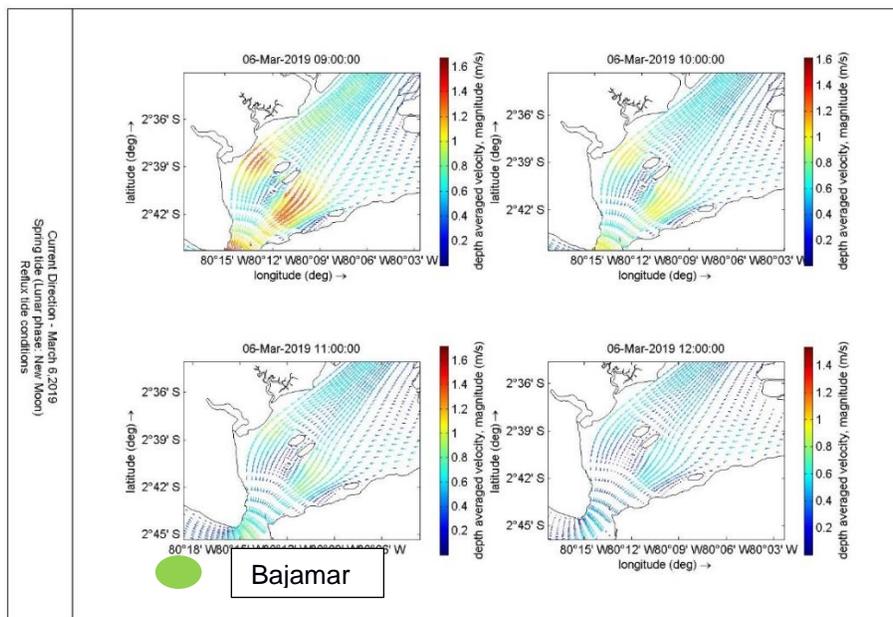
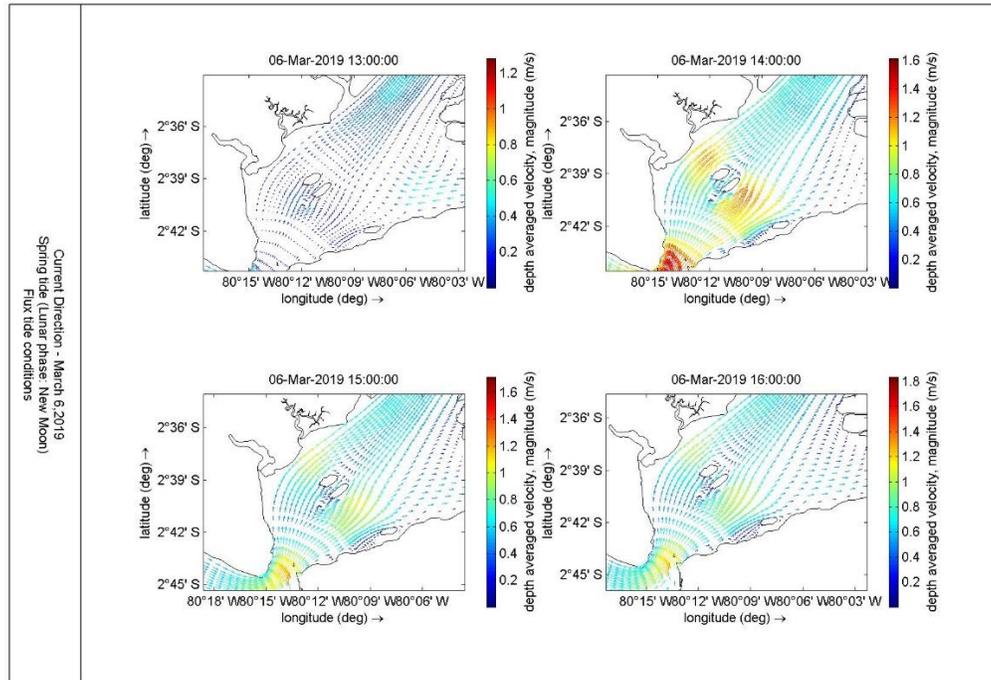


Figura 26

Velocidad de corriente en condiciones de flujo durante la 13:00 a 16:00 pm, en Sicigia (marzo 6)



3.1.4 Topografía

La topografía de la región subrayó la idoneidad del área para el florecimiento de manglares, ya que más del 50% de su superficie se consideró óptima para el crecimiento de manglares del género *Rhizophora spp.* Este favorable escenario se debió a la baja elevación de la zona, que se sitúa en proximidad a la región intermareal. La combinación de estos factores creó un entorno propicio para el establecimiento y desarrollo de los manglares, contribuyendo así a la riqueza y diversidad del ecosistema costero. En la Figura 27, se presenta un mapa topográfico en el cual las áreas de color verde indican una topografía adecuada y dentro de los rangos ideales, mientras que las zonas de color rojo representan valores fuera del rango óptimo. Por otro lado, en la Figura 28,

se presenta una representación tridimensional de la topografía, ofreciendo una visualización más detallada de esta variable.

Figura 27

Mapa de topografía favorable a lo largo del canal exterior del Estero Salado

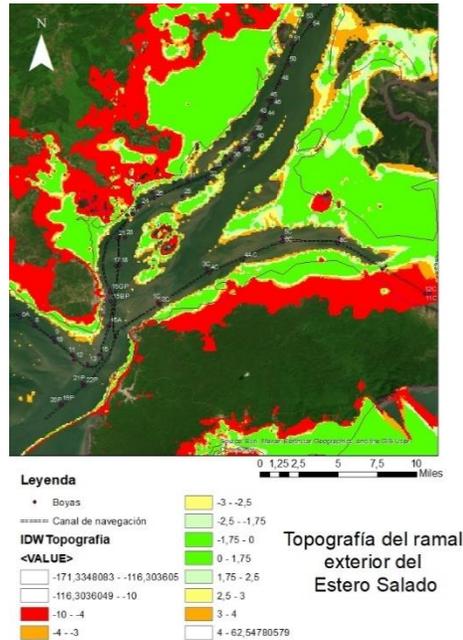
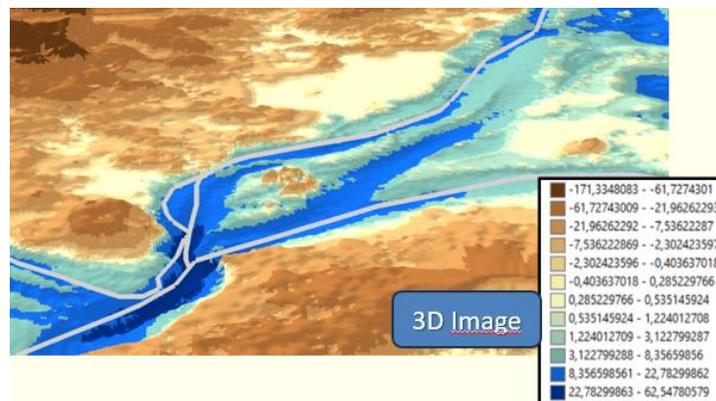


Figura 28

Topografía y batimetría en 3D de la zona de estudio



3.1.5 Salinidad

En enero de 2012, durante la época húmeda, se observó variabilidad en la salinidad a lo largo del Estero Salado. En la parte interna del estero, la salinidad alcanzó valores superiores a 24

PSU, con un máximo de 28,35 PSU. En la entrada del estero, la salinidad más alta fue de 21,77 PSU, mientras que dentro del Canal Cascajal fue de 19,4 PSU. Es relevante mencionar que la cabecera del Estero Salado, que no recibe aporte de agua dulce, tuvo una baja salinidad (12 a 23 ppm) debido a las corrientes de marea que llevan agua desde el río Guayas hacia el estero (GeoEstudios, Consulsua, 2012).

La distribución de la salinidad en el estuario es afectada por las estaciones seca y húmeda. En 2016 y 2017, durante la temporada de lluvias, la salinidad en el Estero Salado fue baja (10,33 PSU). Al comenzar la temporada seca, la salinidad aumentó, alcanzando un máximo de 28,50 PSU. La salinidad en el Estero fue notablemente mayor que en Manglares Churute, al este de la Isla Puná, señalando la influencia del agua dulce debido a la precipitación y la falta de aporte del río Guayas en el Estero Salado (Marín Jarrín, Marín Jarrín, Borbor Córdova, Espinoza Celi, & Domínguez Granda, 2022).

En la tabla 17 se observan los valores de salinidad promedio en el Estero entre las Islas Manglecito y por la Boya 54 del canal de navegación. Además, en la tabla 18 se observan mediciones de salinidad a lo largo del canal desde la cabecera hasta la boca del estero.

Tabla 17

Datos de salinidad promedio medidos in situ en los años de 1996 y 1997

Ubicación	Época	
	Seca (agosto 1996)	Húmeda (abril 1997)
Entre Islas Manglecitos	29.31	18.2
Boya 54	26.13	16.02

Tabla 18

Salinidades máximas y mínimas promedio (‰) en el Estuario del Estero Salado Fuente: INOCAR - 2008

Época	Estación	Seca	Húmeda
--------------	-----------------	-------------	---------------

Condición de marea	(Desde la cabecera a la boca)	Cuadratura min/máx	Sicigia min/máx	Cuadratura min/máx	Sicigia Min/máx
Estero Salado	1	26.5/27.9	27.3/29.2	15.1/16.1	14.4/16.2
	2	27/28.5	27.8/30.2	15.3/15.8	15/16.7
	3	27.2/28.7	28.6/30.6	15.5/16.4	14.8/17.1
	4	28.9/29.8	29/31.2	14.4/15.9	15.8/19.2
	5	29.4/30.4	30.3/31.4	15.4/17.9	17.8/19.8
	6	31.4/31.7	32.7/33.7	19.6/24.6	19.1/24.9
	7	31.4/32.8	33.2/33.8	14.6/16.1	16.5/18

En base de todos los datos recopilados, especialmente las salinidades máximas registradas, se dividió la zona del canal según sus niveles de salinidad. Se observó que durante la época lluviosa la concentración de salinidad fue mayor que en la época húmeda, y esta concentración aumentó de la cabecera a la boca, como se muestra en las ilustraciones 29 y 30. Sin embargo, la salinidad en la zona destacó idoneidad del área para el crecimiento de manglares en ambas estaciones. El 100% de la zona se consideró óptima para el florecimiento de manglares del género *Rhizophora spp.*, ya que presentó valores de salinidad dentro del rango de 0-30 UPS (perfectamente favorable) y de 30-35 UPS (favorable), como se detalla en la tabla 19.

Tabla 1919

Clasificación de rangos de salinidad para el crecimiento de manglar

	Inadecuado	Desfavorable	Neutral	Favorable	Perfectamente favorable
Salinidad Superficial (‰) UPS	>45	40–45	35–40	30–35	0–30

Figura 29

Salinidad promedio en la época seca en el Estero Salado

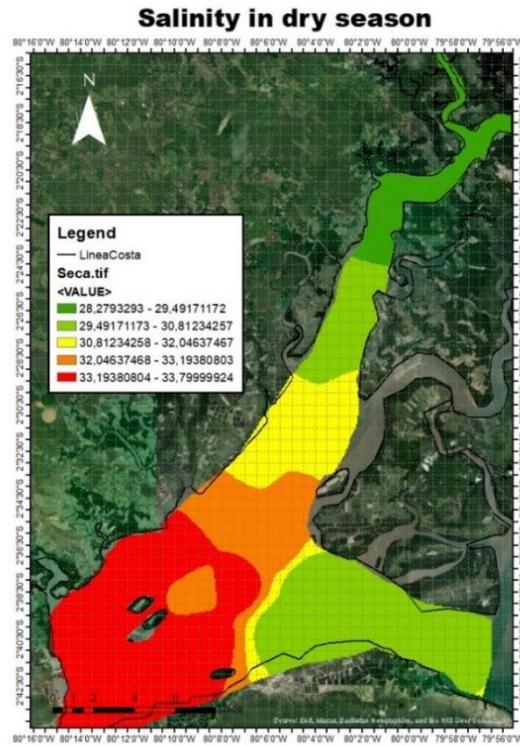
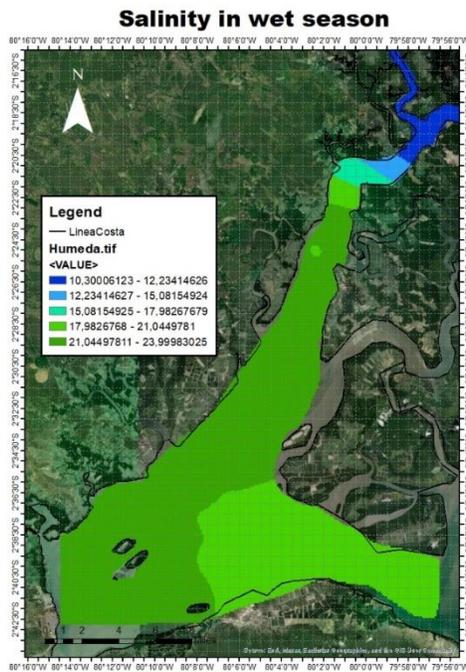


Figura 30

Salinidad promedio en la época húmeda en el Estero Salado



3.1.6 Vientos

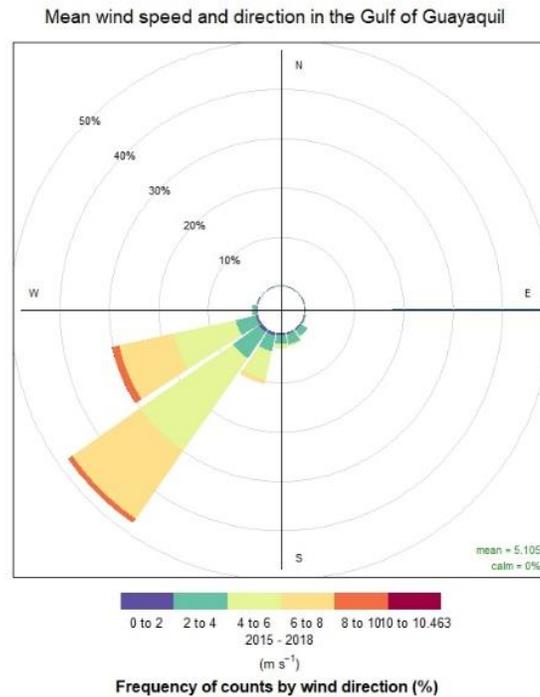
De acuerdo con datos históricos recopilados antes de las operaciones de dragado en 2018, provenientes de la estación del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en 2013, específicamente para la estación Isla Puná – sector Bellavista, se observó que la dirección predominante de los vientos fue suroeste (SW), con una velocidad promedio de 3-4 m/s. Estos vientos suelen incrementar su velocidad hacia finales del año.

Los datos recopilados del WW-II sobre la velocidad y dirección de los vientos indicaron que, en promedio, provenían del suroeste con magnitudes que variaban predominantemente entre 4 y 8 m/s. Se registraron también vientos de magnitudes más bajas, oscilando entre 2 y 6 m/s, con direcciones oeste, sur y sureste. Por otro lado, las direcciones norte, noreste y noroeste experimentaron velocidades apenas alcanzando los 2 m/s en períodos específicos véase la figura 31. Estos hallazgos proporcionaron una visión detallada de la dinámica del viento en la región, información crucial para comprender el impacto potencial en diversos aspectos del entorno marino y costero.

Esto sugiere que, al encontrarse Ecuador en una región libre de tormentas y huracanes, con velocidades promedio del viento de 5,1 m/s, el manglar podría desarrollarse de manera favorable en la zona del estero. Su crecimiento se vería afectado solo en presencia de vientos de magnitudes significativas.

Figura 30

Velocidad y magnitud de vientos promedio en el Estero Salado



3.1.7 Zonas Óptimas de desarrollo de manglar identificadas

Considerando las variables físicas previamente obtenidas en conjunto, se identificaron 34 zonas más propicias para el desarrollo del manglar a lo largo del ramal exterior del ES, abarcando un área total de 22,032.52 hectáreas (más detalle en el anexo G). Se vectorizó de manera precisa la ubicación de piscinas camaroneras presentes en la zona para excluirlas del cálculo del área total. La Figura 32 muestra el mapa que identifica las zonas ideales basándose en las cinco variables analizadas previamente (sedimentos, velocidad de corriente, topografía, salinidad y vientos), mientras que la Figura 33 señala las zonas excluyendo las camaroneras.

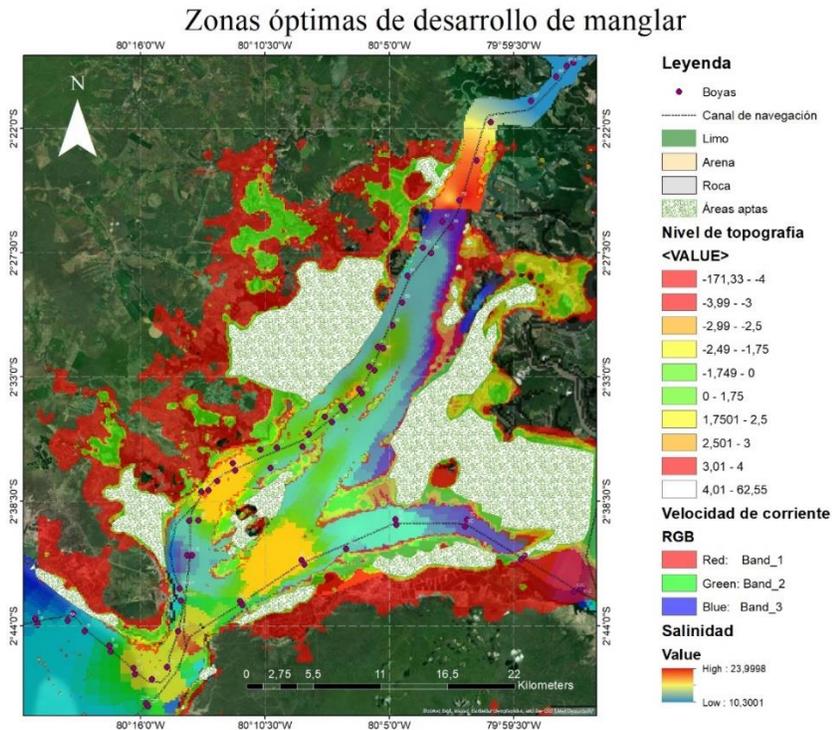
Según la publicación del World Resources Institute en 2008, una hectárea de manglar está valorada económicamente en 35,600 USD en comparación con los 8,360 USD de hectárea de piscinas camaroneras. Cabe resaltar que en este último valor no se considera subsidios a la

producción, multas por contaminación ni proyectos de restauración que una piscina camaronera implica.

Es importante destacar que las piscinas camaroneras en desuso y/o abandonadas en la zona pueden servir también como zona apta para un programa de reforestación. Actualmente existen estudios y proyectos que rehabilitan las piscinas con las condiciones óptimas para que el manglar repueble nuevamente dichos sitios. Además, es crucial recordar que estas áreas fueron identificadas únicamente en función de variables físicas; para un estudio más completo, se deben considerar las demás variables químicas y biológicas y continuar segmentando el área.

Figura 31

Mapa unificado de zonas óptimas de desarrollo de manglar en el Estero Salado



Nota. Realizado en función de salinidad, velocidad de corriente, tipo de sedimentos, vientos y topografía

Figura 32

Ubicación de zonas óptimas de desarrollo de manglar excluyendo camaronerías en ramal exterior del Estero Salado



3.1.8 Diseño de solución

Como propuesta de diseño de solución para el problema se estableció la creación de una guía escrita la cual conglomerada y expresa de una manera didáctica, los aspectos a considerar durante una reforestación de manglar. En la cual se detalló la importancia de la variable a medir o

tomar, un breve marco teórico de la misma, así como el procedimiento de toma de muestra y/o dato junto con el rango óptimo para la reforestación de manglar. Con la ayuda de esta guía, las instituciones que realizan las campañas de reforestación podrían incrementar la tasa de éxito al conocer los estudios previos, las variables necesarias y la técnica adecuada para plantar las semillas o propágulos de manglar. Cabe aclarar que, debido a la limitante de tiempo y restricciones para la realización de nuestro proyecto, la guía no fue completada y las secciones de la guía realizadas durante el desarrollo de este proyecto son las secciones introductorias y la sección 1.1.2 *Variables fisicoquímicas, hidrológicas y del sedimento*. Se espera que la guía sea completada en el futuro con el resto de las variables químicas y biológicas, aspectos ecológicos y técnicas de plantación del manglar, con la realización de más proyectos orientados a la reforestación y mantenimiento de bosques de manglar.

Figura 33

Portada de la guía propuesta



La guía constó de antecedentes, introducción y datos acerca de la especie *Rhizophora mangle*. Posteriormente se dividió en tres fases consideradas para un proyecto de reforestación: antes, durante y después de la plantación de manglar. Este proyecto se enfocó en la fase uno, sección 1.1.2 la cual detalló las variables descritas a lo largo de este documento, su importancia

para el manglar, como debe ser tomada durante una campaña de reforestación y los rangos óptimos para el desarrollo correcto de los hipocótilos.

3.1.9 Estimación de costos

Para la estimación de costos se optó por dividirla en tres fases:

- **Etapa Planificación:** etapa donde se realiza las campañas de muestreo de las diferentes variables con su respectivo análisis para identificar las zonas de manglar óptimas, es decir lo realizado en este proyecto.
- **Etapa Plantación:** etapa de realización de campañas para la recolección de propágulos adecuados y su posterior plantación en el sitio. Esta etapa poseerá valores estimados.
- **Etapa Mantenimiento:** etapa donde se lleva a cabo el control de crecimiento, desarrollo y mortalidad de los propágulos plantados. Esta etapa poseerá valores estimados.

Para obtener datos representativos in-situ alrededor del estero cubriendo la mayor área posible se necesitan mínimo 30 puntos de muestro para lo cual se deberán realizar al menos 5 campañas de muestreo y en cada una se deben tomar muestras en seis puntos de forma espaciada para cubrir toda el área lo mejor posible. Los costos del proyecto en la etapa de estudios previos se detallan en la tabla 20.

Tabla 20

Estimación de costos del proyecto. Etapa de estudios previos

Costos por día de campaña de reforestación - Etapa Salida al campo				
	Actividad	Cantidad	Detalle	Costo por salida (USD)
Salida de campo	Transporte terrestre	No aplica	Ida y vuelta desde Guayaquil-Posorja	\$700.00
	Transporte marítimo	No aplica	Alquiler de bote y pago de operadores de botes	\$300.00

	Personal de seguridad	2	Guardias de seguridad	\$40.00
	Personal Técnico	2	Oceanógrafo	\$90.00
		1	Biólogo o Ing. Ambiental	\$45.00
		1	Ing. Civil o Geólogo	\$45.00
		1	Especialista	\$70.00
TOTAL				\$1,290.00
Total por campañas				\$6,450.00

Trabajo de campo	Materiales para la obtención de muestras de sedimento (Costos fijos)	4	Palas	\$20.00
		4	Guantes	\$16.00
		3	Fundas de muestra	\$9.00
		6	Hielo	\$12.00
		1	Anillos	\$108.00
		8	kopecky (muestra DBD)	
		1	Hielera	\$30.00
			TOTAL	\$195.00
	Renta de equipos especializados	4	Anemómetro	\$500.00
		2	Multiparámetro	
4		Regletas		
4		Nivel		
Trabajo de laboratorio	Renta de equipos de laboratorio para análisis de sedimentos	1	Horno	\$5,000.00
		1	Mufla	
		1	Balanza	
		1	Crisoles	
		8		
		1	Tamizadora	
		4	Mortero	
	5	GPS		
	1	Granulómetro láser		
		Material para análisis de sedimentos (Costos fijos)	3	Bandejas de aluminio
6				
4	Guantes de nitrilo		\$5.00	
			TOTAL	\$5,902.50
		2	Técnico	\$60.00

Trabajo de cómputo	Personal técnico para construcción de modelo computacional	1	Especialista	\$85.00
			TOTAL	\$145.00
TOTAL ESTUDIOS PREVIOS				\$12,692.50

Como se puede apreciar en la Tabla 20, se incluyeron los costos asociados al uso de laboratorios para realizar ensayos en las muestras de sedimentos, así como los costos de los equipos necesarios para llevar a cabo mediciones en campo. Este análisis abarcó un muestreo en 30 puntos alrededor del canal, distribuidos en 5 salidas de campo. El costo total resultante, de \$12,692.50, comprendió la suma de todos los gastos correspondientes a los estudios previos de las variables físicas, abarcando un área aproximada de 1000 a 3000 hectáreas.

- **Post (Etapa de plantación y mantenimiento)**

Los costos de plantación y mantenimiento pueden variar según el sitio donde se desee realizar la campaña de plantación. Según (Lewis, 2001), estos pueden variar desde valores pequeños como \$225 a llegar a valores de más de \$200.000 por hectárea sembrada. Un factor que incrementa el coste de la plantación es el implemento de rehabilitación y reparación del sitio donde se desee reforestar. Para este proyecto, se obvió este punto, tomando como referencia que solo se plantarán los propágulos en los sitios más adecuados, sin realizarse ningún procedimiento previo en el sitio.

Para la estimación de costos de estas etapas, se tomaron valores de campañas de reforestación bibliográficos, los cuales abarcan costos de plantación, mantenimiento, transporte y mano de obra. Estos tuvieron un costo total por hectárea de aproximadamente de 1,410 USD/ha. (Su, Friess, & Gasparatos, 2021).

Tabla 21

Aproximación de costos para la etapa de plantación y mantenimiento por hectárea.

Costo de etapa de plantación y mantenimiento (por hectárea)	
Costo de plantación de propágulos	\$619.00
Costo de mantenimiento	\$73.00
Costo de mano de obra	\$667.00
Costos de transportes	\$51.00

COSTO TOTAL	\$1,410.00
--------------------	-------------------

Nota. Basado en el estudio realizado por (Su, Friess, & Gasparatos, 2021)

Tomando en cuenta el área total apta para la restauración de manglares según sus variables físicas, el costo de plantación y mantenimiento ascendió aproximadamente a un valor de \$31.065.853,20. Sin embargo, para la estimación de costos se tomó en consideración las áreas aptas alrededor de los bajos centrales (zonas aledañas a las Islas Manglecito y al Bajo Zapatero), las cuales sumaron un total de 1,033.42 ha. El valor de la etapa de plantación y mantenimiento en los bajos centrales fue de \$1.457.122,20. Simulando un período de año y 8 meses para instaurar la campaña de reforestación de manglar en los bajos centrales del ES, se obtuvo la tabla 22 con el resumen de actividades:

Tabla 22

Resumen de costos estimados para una campaña de restauración de manglar

Tabla de actividades a realizar durante una campaña de reforestación de manglar																				
Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	Mes 19	Mes 20	
Etapa planificación					*Etapa plantación											*Etapa mantenimiento				
1era campaña de toma de muestras	2da campaña de toma de muestras	3era campaña de toma de muestras	4ta campaña de toma de muestras	5ta campaña de toma de muestras	Recolección de plántulas adecuadas	Campañas de plantación en las zonas óptimas											Control rutinario de crecimiento		Control rutinario de crecimiento	
Obtención de licencias de programas a utilizar (Matlab, Delft, ArcGis, etc.)	Limpieza de datos de campo	Limpieza de datos de campo	Limpieza de datos de campo	Modelación de datos de velocidad de corriente en el modelo																
Preparación de modelo en Delft 3D	Elaboración de grilla	Colocación de condiciones iniciales	Digitalización de datos para las variables (topografía, vientos, pendiente, salinidad)	Construcción de mapas con ubicaciones de variables obtenidas.																
Obtención de imágenes satelitales históricas	Revisión de planos batimétricos, cartas náuticas, MDT.	Análisis de muestras en el laboratorio (Granulometría, Densidad Aparente y MO)	Análisis de muestras en el laboratorio (Granulometría, Densidad Aparente y MO)	Análisis de muestras de suelo en el laboratorio (Granulometría láser)																

Resumiendo, el desglose de costos en una única tabla según sus tres fases, si se desea realizar una campaña de reforestación de manglar en los bajos centrales del ES, se obtuvo un valor total de \$ 1,469,814.70. Es un valor alto, sin embargo, considerando los valores estimados por

(Solá, 2016) para cada hectárea del Golfo de Guayaquil (aproximadamente entre \$67.763,71 y \$74.410,07), la inversión de una campaña de reforestación de manglar con un alto nivel de éxito sería de apenas un 2% del valor estimado de los servicios ecosistémicos que brinda el manglar en la misma área.

Tabla 23

Costos totales y valor económico de los SE del manglar por hectárea.

Costos totales de una campaña de reforestación de manglar	
Etapa de planificación	\$ 12.692,50
Etapa de plantación	\$ 1.381.682,54
Etapa de mantenimiento	\$ 75.439,66
TOTAL	\$ 1.469.814,70
Valor estimado de los SE (ganancias)	
Promedio de Valor Estimado VE del manglar/ha	\$ 71.086,89
VE estimado/ha	\$73.462.613,86

También se debe considerar que la etapa de planificación es de vital importancia, pues la tasa de mortalidad de propágulos se eleva si no se consideran las variables que el manglar necesita para sobrevivir, haciendo que la campaña de reforestación sea en vano y causando pérdidas económicas.

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Los resultados de este proyecto ofrecen una metodología sencilla y accesible para la obtención de variables físicas que facilitan la sectorización de zonas óptimas para el desarrollo de manglar de borde de la especie *Rhizophora mangle* en el canal exterior del Estero Salado. Más allá de simplemente presentar los resultados obtenidos para cada una de estas variables, la guía propuesta proporciona una detallada descripción sobre cómo obtener dichos datos y realizar mediciones en campo, mejorando así el análisis de las zonas.

Es destacable la alta predisposición de las áreas de sedimentación para ser zonas propicias al desarrollo de nuevas plántulas de manglar, respaldada por el sistema estuarino único propio del Golfo de Guayaquil, así como sus condiciones físicas favorables. El manglar del Estero Salado, a diferencia de otras partes del mundo donde se ha investigado anteriormente la posibilidad de repoblación no presenta considerables restricciones naturales para desarrollar esta iniciativa.

En la zona de estudio, predominan los sedimentos finos, salvo en las cercanías de la desembocadura. En el área del Bajo Zapatero, se observan niveles elevados de materia orgánica, especialmente en las zonas con manglares más desarrollados. Estas características se complementan con una baja densidad aparente del suelo. Las salinidades y velocidades del viento se mantienen en rangos óptimos (por debajo de 30 PSU y 8 m/s, respectivamente) en toda la zona, garantizando un crecimiento adecuado de las plántulas. Sin embargo, las diferencias notables en el nivel topográfico y la velocidad de corriente permiten la sectorización de áreas propicias para la plantación de nuevos brotes en la zona del Estero Salado.

La realización de estudios posteriores que identifiquen otras variables físicas como el tiempo de inundación, u otras condiciones químicas y ecológicas, podrían mejorar la clasificación

de áreas óptimas y proporcionar una ubicación más precisa de los sitios idóneos para plantar nuevos brotes.

La modelación de la hidrodinámica del canal principal del Estero utilizando el modelo computacional matemático en Delft 3D permitió una comprensión más profunda de su hidrodinámica, contribuyendo así al análisis integral del entorno. No obstante, se sugiere perfeccionar el modelo incluyendo condiciones de oleaje y sedimentos para lograr una representación más realista de la variable de velocidad de corriente.

A nivel de prefactibilidad, se identificaron alrededor de 20 000 ha de áreas intermareales propicias para el exitoso desarrollo de nuevos propágulos de manglar. Esta identificación temprana ofrece una valiosa orientación para las futuras fases del proyecto, con una inversión aproximada de \$12,000 en estudios previos. Esta inversión asegura que los costos de plantación, considerablemente más elevados, debido al material técnico y al personal requerido, sean aprovechados con pérdidas económicas menores y una mayor supervivencia de las plántulas.

Del mismo modo, se debe considerar que, el repoblar bosques de manglar, significa un aumento en los ingresos nacionales por los diversos servicios ecosistémicos que este brinda a la población humana, los cuales pueden ser aprovechados en diferentes áreas como la pesca, acuicultura y protección costera.

La difusión de conocimientos específicos sobre las prácticas adecuadas de reforestación no solo contribuye a prevenir pérdidas económicas y ecológicas, sino que también brinda una mayor seguridad a las entidades interesadas en la restauración del manglar. Proporcionar a la comunidad local y otras partes interesadas las herramientas necesarias no solo fomenta la participación en la reforestación, sino que también fortalece el vínculo entre la comunidad y el manglar, promoviendo así una gestión sostenible a largo plazo.

4.1.2 Recomendaciones

Dada la limitación del presente proyecto en abordar únicamente cinco variables cruciales para la reforestación de manglar, se enfatiza la necesidad de realizar una recopilación exhaustiva y un análisis completo de las variables físicas restantes durante las actividades de campo. Es imperativo considerar factores como la pendiente e hidroperíodo, los cuales desempeñan un papel fundamental en la selección de zonas y éxito de la reforestación. Se insta a llevar a cabo un muestreo detallado de los sedimentos, descartando aquellas muestras que no se ajusten a los períodos de estudio predefinidos. Además, para garantizar una distribución espacial más precisa de los sedimentos, se recomienda realizar un muestreo amplio con un número significativo de muestras en el área de estudio.

Cabe destacar que este proyecto se basó mayoritariamente en la utilización de variables obtenidas de manera remota, utilizando información satelital, herramientas de geoprocso y modelos numéricos computacionales. Dada la escasez de información in-situ para la caracterización de la zona del Estero Salado, se propone realizar campañas periódicas de muestreo en campo. La recolección directa de datos permitirá una mayor precisión en la comprensión de las condiciones locales y fortalecerá las bases para futuros proyectos de reforestación.

Como primer paso hacia la implementación efectiva de la reforestación, se sugiere realizar salidas exploratorias para reconocer el sitio específico, identificar áreas de proliferación natural de propágulos y evaluar la mortalidad de árboles. Estas salidas facilitarán la selección preliminar de los sitios más adecuados. Además, se enfatiza la importancia de mantener y actualizar continuamente la información sobre las variables tomadas y, durante la etapa de mantenimiento

de la campaña de reforestación, las plántulas sembradas, considerando la posibilidad de cambios en las condiciones debido a factores naturales o antropogénicos.

La monitorización constante de estas zonas se vuelve esencial para asegurar la vigencia y relevancia de los datos a lo largo del tiempo, permitiendo evaluar la efectividad de la reforestación. Además, se alienta a incorporar diferentes análisis, como estudios de calidad del agua, análisis geotécnicos y contabilidad de la biodiversidad locales. Estos análisis contribuirán significativamente a monitorear el estado de salud del bosque de manglar a reforestar, elevando la tasa de éxito del proyecto a niveles aún mayores y garantizando su sostenibilidad a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Solis, M. (1961). Los Manglares del Ecuador. *Revista Geográfica*, 69-88.
- Álvarez Arroyo, A. V., Pérez Cayeiro, M. L., & Macías Bedoya, A. M. (2015). *Criterios de zonificación ambiental: estudio de caso Estero Salado de Guayaquil-Ecuador*. Revista Científica ECOCIENCIA. Obtenido de <https://oti.formacionsostenible.org/wp-content/uploads/2016/12/584f21a90dafd.pdf>
- Arreaga Vargas, P. (2000). Análisis del comportamiento de la salinidad (Intrusión salina) en el sistema Río Guayas-Canal de Jambelí como parte del cambio climático. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 37-49.
- Avilés, A. (1989). *Calidad de agua del Estero Salado*. Obtenido de DSpace ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6258/2/Calidad%20de%20Agua%20del%20Estero%20Salado.pdf>
- Ayukai, T., & Wolanski, E. (1997). Importance of Biologically Mediated Removal of Fine Sediments from the Fly River Plume, Papua New Guinea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 629-639.
- Biesen, L. V. (1998). Development of a marine G.I.S. with the view on the monitoring and modelling of the Guayas estuary and the Estero Salado in Ecuador. *IEEE Oceanic Engineering Society. OCEANS'98*.
- Campos, C. A., & Moreno-Casasola, P. (2009). Suelos hidromórficos. En *Breviario para escribir, observar y manejar humedales* (págs. 111-130). Xalapa.
- Chan, H. (1996). Mangrove reforestation in peninsular Malaysia: a case study in Matang. *Restoration of Mangrove*, 64-76.
- Chapman, J. V. (1976). *Mangrove vegetation*.
- CLIRSEN. (2006). Actualización del Estudio Multitemporal de Manglares, Camaroneras y Áreas Salinas en la Costa Continental Ecuatoriana. *Convenio de cooperación técnica entre el CLIRSEN y el Programa de manejo de recursos costeros (PMRC)*.
- Cornejo, X. (Ed.). (2014). *Plants of the South American Pacific Mangrove Swamps (Colombia, Ecuador, Perú)* (Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Guayaquil ed.). Guayaquil: Publicaciones del Herbario GUAY.
- Davis, J. H. (1940). The ecology and geologic role of mangroves in florida. *Publications of the Carnegie Institution of Washington*(517), 303-412.

- Deltares. (2016). *Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics.*
- El suelo: historias bajo las raíces de los manglares.* (s.f.). Obtenido de Instituto de Ecología: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1718-el-suelo-historias-bajo-las-raices-de-los-manglares>
- Ellison, A. M. (2000). Mangrove Restoration: Do We Know Enough? *Restoration Ecology*, 2019-229.
- Flores-Verdugo, F. J., Agraz Hernández, C. M., & Martínez-Cordero, F. J. (1995). Programa de reforestación de manglares por el desarrollo acuícola de AquaNovaBoca Cegada (Nayarit): Evaluación ecológica integral y medidas de mitigación. *Evaluación ecológica integral y medidas de mitigación. Anteproyecto*, 35. Obtenido de Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental, CIAD y Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Gálvez, H., & Regalado, J. (2007). Características de las precipitaciones, la temperatura del aire y los vientos en la costa ecuatoriana. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 201-205.
- GeoEstudios, Consulsua. (2012). *Dragado del canal acceso del Puerto Marítimo de Guayaquil. Modelación matemática.* Guayaquil. Obtenido de [https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/Dragado/3\)%20DRAGADO%20FULL%20CANAL%20ACCESO%20GYE%202012/Capitulo16%20MODELACION%20MATEMATICA%20DE%20SEDIMENTOS%20EN%20EL%20CANAL/Capitulo16%20100712.pdf](https://www.guayaquil.gob.ec/wp-content/uploads/Documentos/Dragado/3)%20DRAGADO%20FULL%20CANAL%20ACCESO%20GYE%202012/Capitulo16%20MODELACION%20MATEMATICA%20DE%20SEDIMENTOS%20EN%20EL%20CANAL/Capitulo16%20100712.pdf)
- Guerrero Calderón, J. M. (2022). Composición, distribución y estructura de los manglares de borde de las comunas Bajo Alto y La Puntilla - El Guabo, Provincia de El Oro, Ecuador 2021. *Universidad Estatal Península de Santa Elena.* Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/8861/1/UPSE-TBM-2022-0029.pdf>
- Gutierrez, Y. (17 de Noviembre de 2020). No más ensayo y error, para restaurar manglares con éxito ahora existe una guía. *Los bosques en las noticias.* Obtenido de <https://forestsnews.cifor.org/69538/no-mas-ensayo-y-error-para-restaurar-manglares-con-exito-ahora-existe-una-guia?fnl=en>
- INECOL. (2022). *El suelo: historias bajo las raíces de los manglares.* Obtenido de Instituto de Ecología: <https://inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/1718-el-suelo-historias-bajo-las-raices-de-los-manglares>

- Jibaja, C. R. (2018). Estudio de Impacto Ambiental del proyecto construcción, operación, mantenimiento, cierre y abandono del dragado de profundización y mantenimiento del canal de acceso a las terminales portuarias marítimas y fluviales, públicas y privadas de Guayaquil. *Municipalidad de Guayaquil*.
- Jie, S., Bingchao, Y., Luzhen, C., & Alexandros, G. (13 de Mayo de 2022). Priority areas for mixed-species mangrove restoration: the suitable species in the right sites. *Environmental Research Letters*, 17(6).
- Kairo, J. (1995). *Artificial regeneration and sustainable yield management of mangrove forests at Gazi bay, Kenya*. Obtenido de University of Nairobi Library: <http://erepository.uonbi.ac.ke:8080/xmlui/handle/123456789/25283>
- Koch, M. S., & Snedaker, S. C. (1997). Factors influencing *Rhizophora mangle* L. seedling development in Everglades carbonate soils. *Aquatic botany*, 87-98.
- Krauss, K., Doyle, T., Twilley, R., Rivera-Monroy, V. H., & Sulliv, J. K. (2006). valuating the relative contributions of hydroperiod and soil fertility on growth of south Florida mangroves. *Hydrobiologia*, 569(1), 311-324.
- Lara-Domínguez , A. L., Martínez, M., Saínz Hernández, E., & Vásquez Reyes, V. M. (2021). *El suelo: historias bajo las raíces de los manglares*. Obtenido de Instituto de Ecología de Colombia: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/1718-el-suelo-historias-bajo-las-raices-de-los-manglares>
- Lewis, R. R. (4-8 de April de 2001). Mangrove Restoration - Costs and Benefits of Successful Ecological Restoration. *Proceedings of the Mangrove Valuation Workshop, Universiti Sains Malaysia*. Salt Springs, Florida, USA. Obtenido de <https://www.fao.org/forestry/10560-0fe87b898806287615fceb95a76f613cf.pdf>
- Marín Jarrín, M. J., Marín Jarrín, J. R., Borbor Córdova, M. J., Espinoza Celi, M. E., & Domínguez Granda, L. (2022). *Dinámicas estacionales en el estuario interior del Guayas, Ecuador*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costera “José Benito Vives de Andrés”. Obtenido de <http://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/1125/925>
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Guía de derechos y deberes de las organizaciones custodias del manglar*. (C. I. Ecuador, Ed., & O. d. Instituto Humanista para la Cooperación con los Países en Desarrollo, Trad.) Guayaquil: Ministerio del Ambiente del Ecuador. Obtenido de

- Conservation.org: <https://www.conservation.org/docs/default-source/ecuador-documents/guia-custodios-manglares.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Plan Nacional para la conservación de manglares en el Ecuador Continental*. Obtenido de <https://www.conservation.org/docs/default-source/ecuador-documents/pan-manglares-ecuador.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Árboles y arbustos de los manglares del Ecuador*. Quito: Ministerio de Ambiente del Ecuador.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (26 de Agosto de 2014). *Manual para incentivo a conservación y uso sustentable del manglar*. Obtenido de Gobierno del Ecuador: https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-10/Documento_Manual%20%20Incentivo%20Conservaci%C3%B3n%20Manglar.pdf
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2017). *Ministra Lorena Tapia dio inicio al programa de conservación Socio Manglar*. Obtenido de Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica: <https://www.ambiente.gob.ec/ministra-lorena-tapia-dio-inicio-al-programa-de-conservacion-socio-manglar/>
- Miranda, R. (Febrero de 2022). *ESTUDIO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CARBONO EN SUELOS DE MANGLAR EN ECUADOR CONTINENTAL*. Obtenido de Universidad de Especialidades Espíritu Santo: <http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/3437/1/Miranda%20MU%C3%91OZ%202022.pdf>
- Primavera, J. H. (1995). Mangroves and brackishwater pond culture in the Philippines. *Asia-Pacific Symposium on Mangrove Ecosystems*, 303-309.
- Reyes, M., & Tovilla, C. (2002). Restauración de áreas alteradas de manglar con *Rhizophora Mangle* en la costa de Chiapas. *Madera y Bosques*, 103-114.
- Royal Botanic Gardens. (2023). *Rhizophora Mangle*. Obtenido de Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30061148-2>
- Sandilyan, S., & Kathiresan, K. (2012). Mangrove conservation: a global perspective. *Biodivers Conserv*, 21, 3523–3542. doi:<https://doi.org/10.1007/s10531-012-0388-x>
- Siebe, C., Jahn, R., & Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*.

- Solá, M. (2016). Impacto económico de la pérdida de los servicios ambientales del manglar en Guayas. Quito, Ecuador. Obtenido de Pontificia Universidad Católica del Ecuador: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11508/Marcela%20Sola->
- Sousa, W. P., Kennedy, P. G., & Mitc, B. J. (Mayo de 2003). Propagule Size and Predispersal Damage by Insects Affect Establishment and Early Growth of Mangrove Seedlings. *Oecologia*, 135(4), 564-575. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/4223624>
- Stevenson, M. (1981). Variaciones estacionales en el Golfo de Guayaquil, un estuario tropical. *Boletín Científico y Técnico - Instituto Nacional de Pesca*, 1-133. Obtenido de Instituto Nacional de Pesca.
- Su, J., Friess, D., & Gasparatos, A. (2021). *A meta-analysis of the ecological and economic outcomes of mangrove restoration*. Nature Communications.
- Teas, H. J. (1977). Ecology and Restoration of Mangrove Shorelines in Florida. *Environmental Conservation*, 4(1), 51-58. doi:<https://doi.org/10.1017/S0376892900025042>
- Teutli Hernández, C., Herrera-Silveira, J., Cisneros-de la Cruz, D., & Roman-Cuesta, R. (17 de Noviembre de 2020). *Guía para la restauración ecológica de manglares: Lecciones aprendidas*. Obtenido de <https://www.cifor.org/knowledge/publication/7794/>
- Van der Stocken, T., Vanschoenwinkel, B., Dahdouh, F., Bouma, T., De Ryck,, D., & Koedam, N. (22 de Abril de 2015). Interaction between Water and Wind as a Driver of Passive Dispersal in Mangroves. *The PLOS ONE*. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121593>
- Vanegas Giraldo, C. A. (2015). *Análisis del comportamiento hidráulico del Rhizophora mangle frente a eventos medios del oleaje*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55720/1128283086.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vera, T. (5 de Enero de 2003). *Manejo ambiental integrado de la acuicultura del camarón en el golfo de Guayaquil apoyado en sistemas de información geográfica*. Obtenido de Escuela Superior Politécnica del Litoral: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4560>
- Woodroffe, C. (1992). Mangrove Sediments and Geomorphology. *Tropical Mangrove Ecosystems*, 7-41.

Woodroffe, C. D. (1983). Development of mangrove forests from a geological perspective. En H. Teas (Ed.), *Biology and ecology of mangroves* (Vol. 8). Dordrecht: Springer. doi:10.1007/978-94-017-0914-9_1

World Wildlife Fund. (2021). *La situación de los manglares 2021*. Obtenido de <https://www.wwf.org.ec/?uNewsID=368211>

ANEXOS

Anexo A

Detalle de bandas del satélite Sentinel -2

<i>Sentinel -2</i>			
Número de banda	Tipo de banda	Longitud de onda (µm)	Resolución (m)
1	Aerosol	0.43 - 0.45	60
2	Blue	0.45 - 0.52	10
3	Green	0.54 - 0.57	10
4	Red	0.65 - 0.68	10
5	Red Edge 1	0.69 - 0.71	20
6	Red Edge 2	0.73 - 0.74	20
7	Red Edge 3	0.77 - 0.79	20
8	Near Infrared (NIR) 1	0.78 - 0.90	10
8A	Near Infrared (NIR) 2	0.85 - 0.87	20
9	Vapor de agua	0.93 - 0.95	60
10	Cirros	1.36 - 1.39	60
11	SWIR 1	1.56 - 1.65	20
12	SWIR 2	2.10 - 2.28	20

Anexo B

Código de extracción de imágenes satelitales de Google Earth Engine (GEE)

```
// Area of interest
var areaOfInterest =
  ee.Geometry.Polygon(
    [[[-80.34232536241916,-2.9456098668949977],
      [-79.61448112413791,-2.9456098668949977],
      [-79.61448112413791,-2.374938854069414],
      [-80.34232536241916,-2.374938854069414]]]);
// Zoom to area of interest
Map.centerObject(areaOfInterest);
Map.addLayer(areaOfInterest);

// Load Sentinel-2 data
var startDate = '2020-08-01';
var endDate = '2020-12-31';
// Returns all the images between the start date and the end date
```

```

// taken on the area of interest
var sentinelImageCollection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
    .filterBounds(areaOfInterest)
    .filterDate(startDate, endDate);
print("Number of images = ", sentinelImageCollection.size());
var sentinelImageCloud =
    sentinelImageCollection.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',20));
var imageList = sentinelImageCloud.toList(sentinelImageCollection.size());

var dates = imageList.map(function(image) {
    return ee.Image(image).date().format("YYYY-MM-dd");
});

print("Fechas de las imágenes seleccionadas:", dates);
ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
// Visualize using RGB
Map.addLayer(
    sentinelImageCloud,
    {min: 0.0, max: 2000, bands: ['B4', 'B3', 'B2']},
    'RGB');
// Itera a través de la lista de imágenes y aplica el NDWI a cada una.
for (var i = 0; i < sentinelImageCloud.size().getInfo(); i++) {
    var image = ee.Image(sentinelImageCloud.toList(sentinelImageCloud.size()).get(i));
    var date = ee.Image(image).date().format("YYYY-MM-dd");

    // Aplica el NDWI a la imagen.
    var ndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B8']).rename('NDWI');

    // Visualiza la imagen NDWI en el mapa.
    Map.addLayer(ndwi, {palette: ['red', 'yellow', 'green', 'cyan', 'blue']}, 'NDWI ' + i);

    // Exporta la imagen NDWI, especificando el CRS, transformación y región.
    Export.image.toDrive({
        image: ndwi.visualize({min: 0, max: 1}),
        description: 'NDWI_' + i,
        crs: 'EPSG:4326',
        scale: 10,
        region: areaOfInterest
    });
}

```

Anexo C

Imágenes tomadas durante la salidas de campo

Zonas donde se tomaron las muestras (mangle joven, adulto-20 años y adulto-40 años)



Tomas de muestras realizado por autoras



Ensayos de laboratorio de las muestras



Anexo D

Código para extraer rosa de vientos

```
library(readxl)
library(openair)
```

```
# Carga los datos desde el archivo Excel (.xlsx)
datos <- read_excel("C:/Users/ro-ci/Documents/Datos vientos con fecha.xlsx")
```

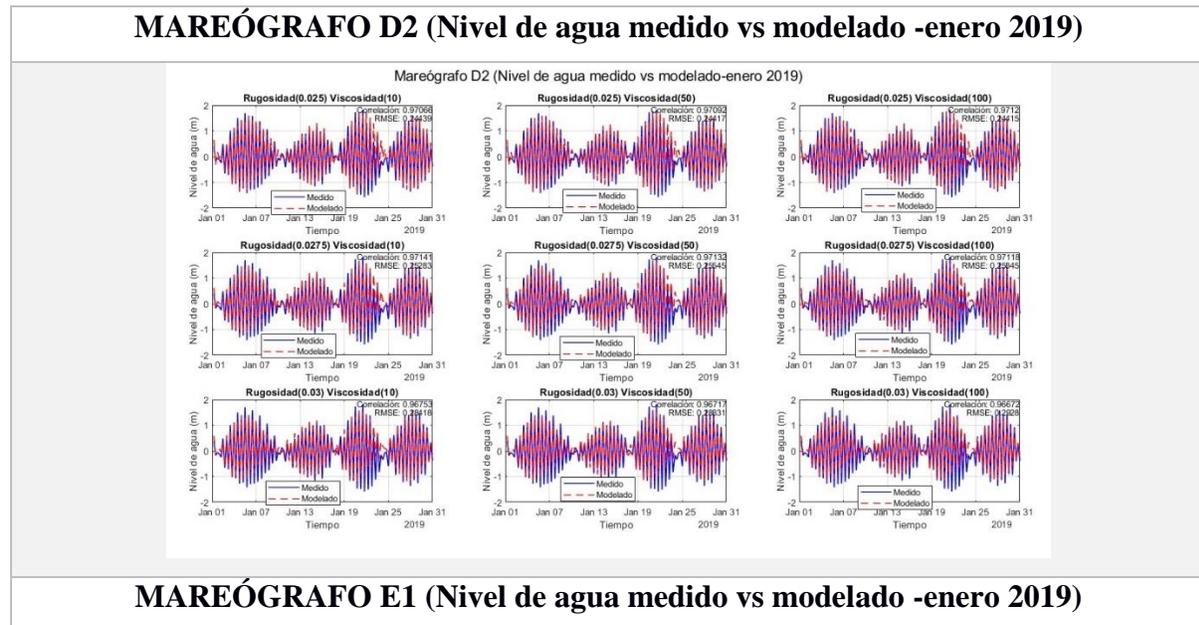
```
# Ajusta el formato de la columna de fecha
datos$Fecha <- as.Date(datos$Fecha, format = "%d/%m/%Y")
```

```
# Agrega una columna para el mes
datos$Mes <- format(datos$Fecha, "%m")
datos$Magnitud <- as.numeric(datos$Magnitud)
print(datos)
```

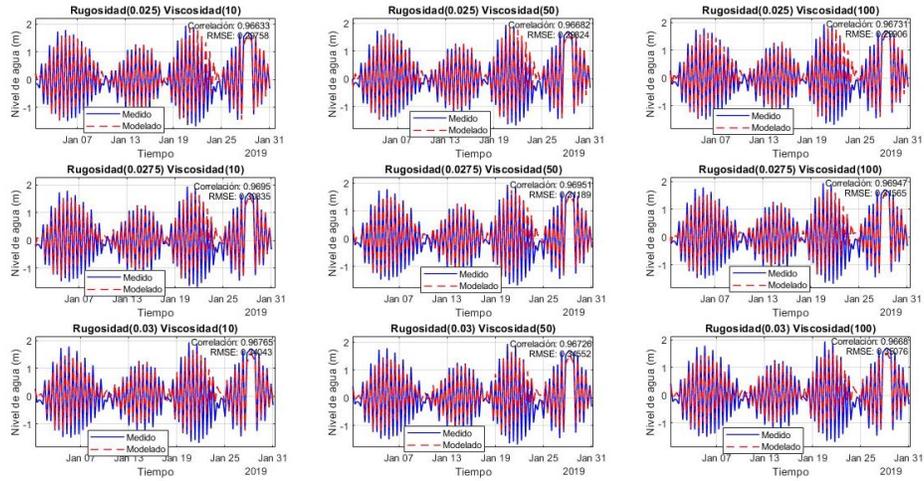
```
# Crea la rosa de los vientos
windRose(datos, ws = "Magnitud", wd = "Direccion", ws2 = NA, wd2 = NA,
  ws.int = 2, angle = 22.5, type = "default", bias.corr = TRUE,
  cols = "default", grid.line = NULL, width = 1, seg = NULL, auto.text = TRUE,
  breaks = 6, offset = 10, normalise = FALSE, max.freq = NULL, paddle = FALSE,
  key.header = "2015 - 2018", key.footer = "(m/s)", key.position = "bottom", key = TRUE,
  dig.lab = 5, statistic = "prop.count", pollutant = NULL, annotate = TRUE, angle.scale = 315,
  border = NA, smooth = TRUE,
  main = "Mean wind speed and direction in the Gulf of Guayaquil",
  cols.legend = 1, rows.legend = 1)
```

Anexo E

Detalle de calibración del modelo computacional en Delft 3D

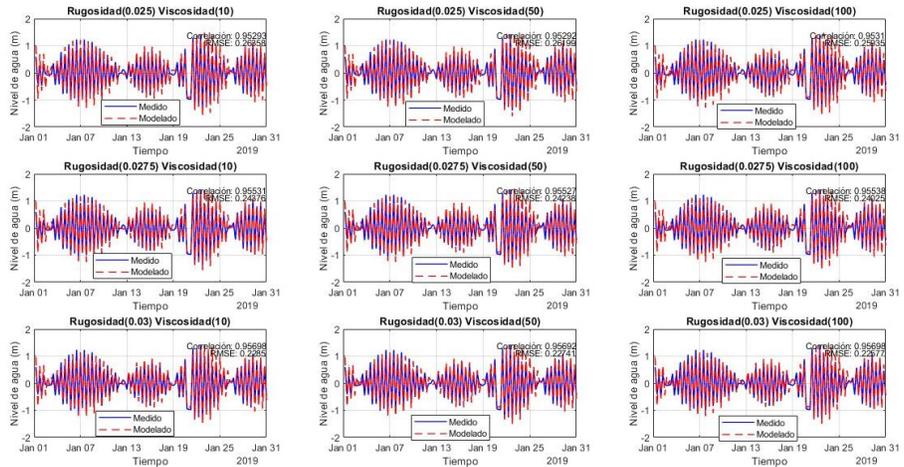


Mareógrafo E1 (Nivel de agua medido vs modelado-enero 2019)



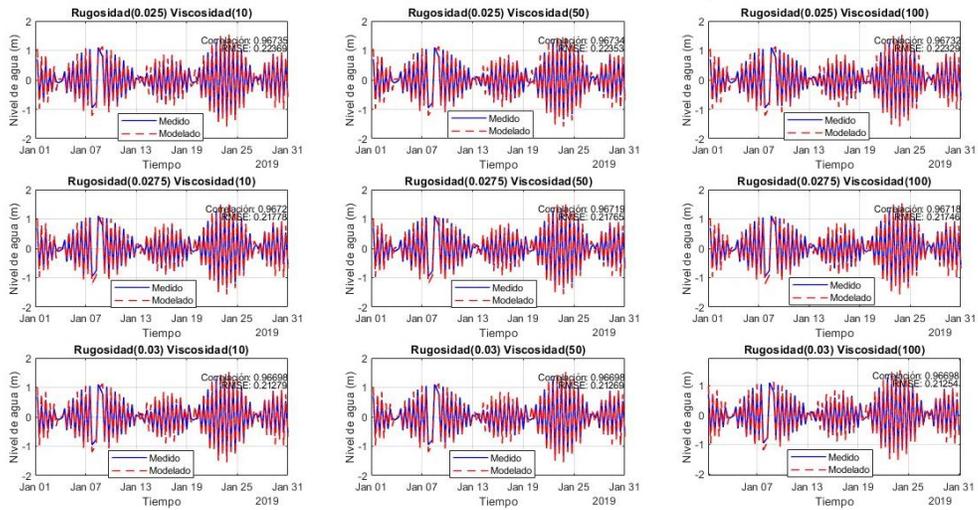
MAREÓGRAFO JANEC (Nivel de agua medido vs modelado -enero 2019)

Mareógrafo Janec (Nivel de agua medido vs modelado-enero 2019)



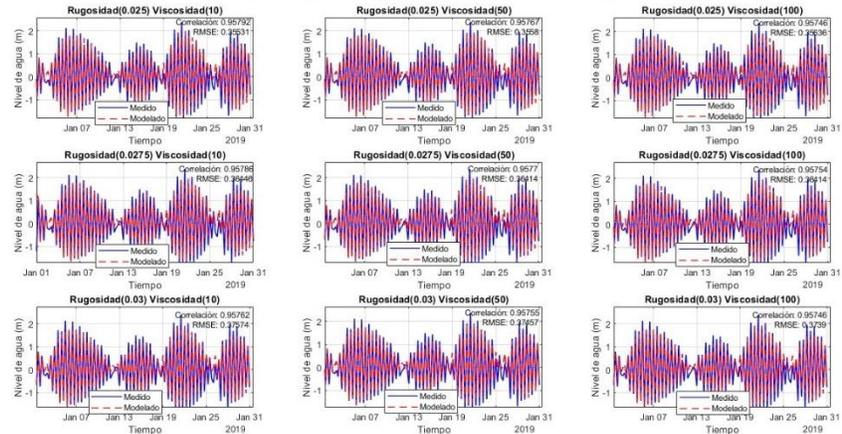
MAREÓGRAFO PILOT (Nivel de agua medido vs modelado -enero 2019)

Mareógrafo Pilot (Nivel de agua medido vs modelado-enero 2019)

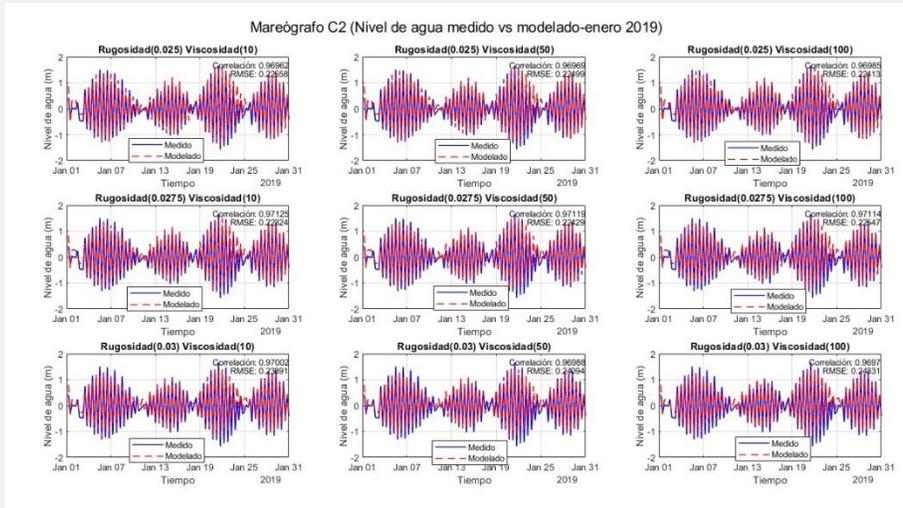


PUERTO NUEVO (Nivel de agua medido vs modelado -enero 2019)

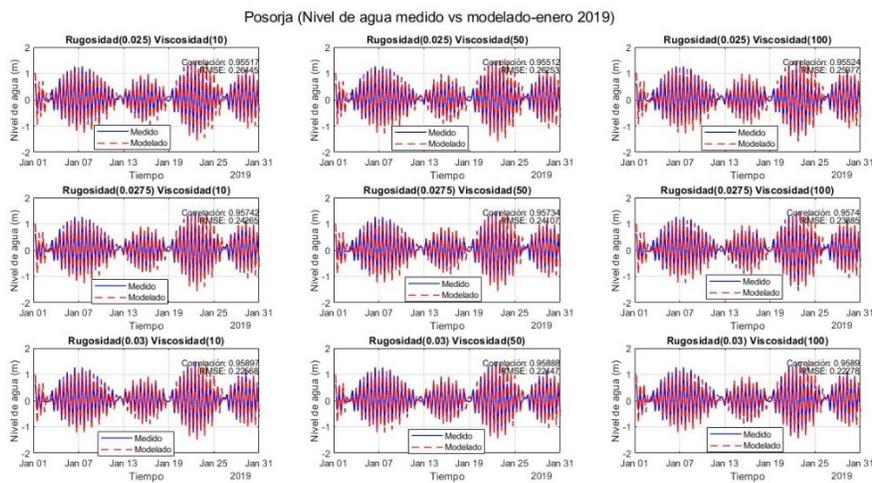
Puerto Nuevo (Nivel de agua medido vs modelado-enero 2019)



MAREÓGRAFO C2 (Nivel de agua medido vs modelado -enero 2019)



POSORJA (Nivel de agua medido vs modelado -enero 2019)



Anexo F

Detalle de correlación de modelo computacional

Correlación entre nivel de agua medido versus simulado									
	0.025-10	0.025-50	0.025-100	0.0275-10	0.0275-50	0.0275-100	0.03-10	0.03-50	0.03-100
D2	0.9707	0.9709	0.9712	0.9714	0.9713	0.9712	0.9675	0.9672	0.9667
C2	0.9696	0.9697	0.9699	0.9713	0.9712	0.9711	0.9700	0.9699	0.9697
E1	0.9663	0.9668	0.9673	0.9695	0.9695	0.9695	0.9677	0.9673	0.9668
Pilot Station	0.9674	0.9673	0.9673	0.9672	0.9672	0.9672	0.9670	0.9670	0.9670
Janec	0.9529	0.9529	0.9531	0.9553	0.9553	0.9554	0.9570	0.9569	0.9570
Posorja	0.9552	0.9551	0.9552	0.9574	0.9573	0.9574	0.9590	0.9589	0.9589

Puerto Nuevo	0.9579	0.9577	0.9575	0.9579	0.9577	0.9575	0.9576	0.9575	0.9575
Promedio	0.9707	0.9709	0.9712	0.9714	0.9713	0.9712	0.9700	0.9699	0.9697
RMSE entre nivel de agua medido versus simulado									
	0.025-10	0.025-50	0.025-100	0.0275-10	0.0275-50	0.0275-100	0.03-10	0.03-50	0.03-100
D2	0.2444	0.2442	0.2442	0.2528	0.2555	0.2584	0.2842	0.2883	0.2928
C2	0.2256	0.2250	0.2241	0.2232	0.2243	0.2255	0.2389	0.2409	0.2433
E1	0.2976	0.2982	0.2991	0.3084	0.3119	0.3156	0.3404	0.3455	0.3508
Pilot Station	0.2237	0.2235	0.2233	0.2178	0.2176	0.2175	0.2128	0.2127	0.2125
Janec	0.2636	0.2620	0.2593	0.2438	0.2424	0.2402	0.2285	0.2274	0.2258
Posorja	0.2644	0.2625	0.2598	0.2427	0.2411	0.2389	0.2257	0.2245	0.2228
Puerto Nuevo	0.3553	0.3558	0.3564	0.3645	0.3641	0.3641	0.3757	0.3746	0.3739
Promedio	0.2678	0.2673	0.2666	0.2647	0.2653	0.2658	0.2723	0.2734	0.2746

Anexo G

Detalle de áreas óptimas para el desarrollo de manglar.

# de zona	Área en hectáreas	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (UTM)	Longitud (UTM)
1	10994,91	-80,00748	-2,604499	610334,864567	9712079,218911
2	3532,883	-80,150242	-2,518843	594469,641573	9721559,574813
3	1100,502	-80,264211	-2,652899	581789,922061	9706748,534459
4	805,5496	-80,049905	-2,681536	605611,651028	9703566,52509
5	763,5889	-80,018976	-2,56915	609059,755316	9715988,017125
6	690,1049	-80,171172	-2,638332	592133,888643	9708352,307682
7	594,4422	-80,317168	-2,711409	575899,371017	9700284,159247
8	585,8558	-80,163415	-2,716366	592990,418872	9699725,470676
9	417,4523	-79,960446	-2,593302	615565,031548	9713312,804963
10	387,7169	-80,051609	-2,398737	605445,165376	9734829,445935
11	308,1508	-80,192727	-2,664312	589735,742328	9705481,989951
12	295,0208	-80,269037	-2,674856	581252,047155	9704321,715735
13	237,3564	-80,1357	-2,493069	596088,187731	9724407,907381
14	208,1638	-80,090036	-2,488547	601165,567219	9724904,204995
15	196,724	-80,036756	-2,504183	607088,329154	9723171,466025
16	138,3798	-80,058375	-2,415996	604691,464951	9732922,006068
17	117,9433	-80,048914	-2,691345	605721,030187	9702482,113446
18	113,2834	-80,273433	-2,629942	580766,289064	9709286,808527
19	99,62716	-80,004587	-2,515073	610664,16454	9721964,878289

20	95,91724	-80,217497	-2,767898	586974,78518	9694032,981367
21	51,23264	-80,035145	-2,487064	607268,832366	9725063,757089
22	51,14212	-80,289034	-2,640981	579031,288192	9708067,528247
23	47,37802	-80,200357	-2,54741	588895,816161	9718405,195838
24	35,17012	-80,199315	-2,677848	589002,458445	9703986,115141
25	31,82458	-80,185899	-2,733194	590489,76254	9697866,933229
26	30,51303	-80,245171	-2,640404	583907,407247	9708128,528023
27	22,23933	-80,024963	-2,450326	608403,90036	9729124,227903
28	20,30178	-80,0264	-2,440141	608244,990252	9730250,333458
29	17,86525	-80,215204	-2,758337	587230,349663	9695089,734048
30	12,50009	-80,170737	-2,724266	592175,797195	9698852,770809
31	12,15665	-80,03214	-2,46886	607604,370339	9727075,96293
32	9,776471	-80,243711	-2,807083	584058,137252	9689703,27299
33	6,688678	-80,235814	-2,793686	584936,887543	9691183,696884
34	0,153211	-80,193686	-2,541687	589637,790101	9719037,358784

Anexo H

Guía para la restauración de manglar de borde en el Estero Salado (sección introductoria y sección 1.1.2)

*esta guía está en desarrollo.

Guía para la restauración del manglar de borde en el Ecuador



PRÓLOGO

En el presente documento, "*Guía para la restauración del manglar de borde en el Ecuador*", se amalgama el conocimiento técnico y la experiencia práctica para abordar los desafíos cruciales que enfrenta este ecosistema en nuestra región.

Los manglares, siendo barreras naturales entre los entornos terrestre y marino, desempeñan un papel fundamental en la protección costera y el mantenimiento de la biodiversidad. sin embargo, se enfrentan a amenazas crecientes, desde los impactos antropogénicos hasta el cambio climático. este manual surge de la recopilación de datos, remotos y en campo, así como de revisión bibliográfica, ofreciendo un enfoque técnico para la restauración efectiva de los manglares de borde en el contexto ecuatoriano. desde la identificación de especies clave hasta las mejores prácticas para la revegetación, cada

apartado está diseñado para proporcionar orientación práctica y basada en la evidencia.

La importancia de esta guía radica en su capacidad para traducir la investigación científica en estrategias aplicables y adaptadas a las condiciones específicas de nuestros manglares. además, se enfoca en la participación de las comunidades locales, reconociendo la importancia de la gestión sostenible y la inclusión de conocimientos tradicionales.

Esperamos que esta guía sirva como una herramienta para los profesionales ambientales, gestores de recursos naturales y aquellos comprometidos con la conservación del manglar. La restauración de los manglares no es solo una tarea técnica; es un imperativo ambiental y social que requiere un enfoque informado y colaborativo.

EL manglar, un ecosistema de excepcional biodiversidad, desempeña un papel crucial al proporcionar una amplia gama de servicios ecosistémicos. Aunque su extensión en la superficie terrestre es inferior al 1%, este bosque se destaca como uno de los más productivos a nivel mundial y actúa como un significativo sumidero de carbono. Capaz de almacenar hasta cuatro veces más carbono en su suelo que un bosque convencional, el manglar contribuye de manera destacada a la reducción de la huella de carbono y al control del efecto invernadero, desafíos actuales que demandan soluciones viables.

Funcionando como una barrera natural contra el impacto del oleaje y eventos meteorológicos extremos, el manglar, con su arraigado sistema de raíces y su capacidad para captar sedimentos, reduce los daños causados por el oleaje en un 40%, minimizando procesos naturales como la erosión. Este ecosistema se erige como el hábitat vital para especies comerciales en diversas etapas de su ciclo de vida, beneficiando así a las pesquerías locales y globales. Además, alberga una rica diversidad de aves, reptiles, mamíferos y comunidades humanas.

En el contexto ecuatoriano, la estimación de la extensión de manglares en 1969 reportó 203,624 hectáreas. Sin embargo, debido a la actividad antropogénica, en especial la expansión de establecimientos para el cultivo de camarón, esta área disminuyó a 147,228.60 hectáreas en 2006. A pesar de estos desafíos, acciones de reforestación y remediación han logrado un aumento reciente en la extensión, aproximándose a 161,835 hectáreas. En el litoral ecuatoriano, tres especies de manglares, manglar rojo (*Rhizophora mangle*), manglar negro (*Avicennia germinans*) y manglar blanco (*Laguncularia racemosa*), son predominantes en las costas y riberas. *Rhizophora mangle* destaca como la especie más extendida y resistente, siendo preferida en programas de reforestación.

Cada especie de manglar presenta rangos de tolerancia específicos para variables ambientales, climáticas y del suelo. La comprensión detallada de estas variables es esencial para garantizar el éxito de los programas de reforestación y restauración de manglares.

DATOS DE LA ESPECIE

Rhizophora mangle

Reino: Plantae	
Superdivisión: Spermatophyta	
Clase: Magnoliopsida	
Orden: Rhizophorales	
Género: Rhizophora	
Nombre científico: <i>Rhizophora mangle</i>	
Subreino: Tracheobionta	
División: Magnoliophyta	
Subclase: Rosidae	
Familia: Rhizophoraceae	
Especie: mangle	

Figura 1 Taxonomía del manglar rojo. Figura de Gil Sánchez en la plataforma Dribbble.
<https://dribbble.com/shots/16450992-The-red-mangrove-Rhizophora-mangle>

- **Nombres comunes:** mangle rojo, mangle colorado, mangle americano, candelón, mangle de concha, mangle gateado, mangle injerto, mangle macho, mangle zapatero.
- **Altura:** 4 a 10 m.
- **Tipo de reproducción:** germinación vivípara

El mangle rojo es una especie típica de ambientes subtropicales y tropicales del planeta. Posee una distribución geográfica que se extiende en ambas costas del continente americano, desde Baja California hasta el noroccidente de Perú y en las islas Galápagos y desde el sur de Florida hasta Brasil y en la región del Caribe. También está presente en las costas tropicales del oeste de África.

Es el más predominante dentro de los bosques de manglar en el Ecuador, estando presente en todas las provincias del litoral ecuatoriano.

Se caracteriza por sus raíces aéreas a modo de zancos o pneumatóforos, los cuales se elevan desde el suelo y permiten al árbol obtener oxígeno del aire, ya que el suelo en el que crece suele ser bajo en oxígeno. El mangle rojo es una especie halófila, es decir, ha desarrollado adaptaciones para sobrevivir en ambientes salinos. Sus raíces son capaces de filtrar la sal del agua antes de que esta sea absorbida por la planta, y sus hojas pueden excretar la sal a través de glándulas especializadas.

Sus semillas, también llamadas hipocótilos, poseen la particularidad de ser capaces de desprenderse de la planta madre y flotar por su cuenta por largas distancias flotando, siendo llevado por las corrientes y vientos hasta colonizar nuevas áreas.

Esto es debido a la peculiar forma de péndulo que le permite ser arrastrado de manera horizontal o vertical. Esta adaptación le ha permitido convertirse en una de las especies más utilizada en los programas de reforestación de bosque de manglar.



Los propágulos enfrentan varios desafíos que le impiden sobrevivir en el sitio donde se asientan. La falta de condiciones adecuadas para su desarrollo, depredación por otras especies como cangrejos y enfermedades causadas por plagas pueden causar grandes niveles de mortalidad de los propágulos.

Es cotizado por su madera, caracterizada por tener una gran resistencia y elasticidad desde los tiempos de la colonia. Se estima que muchos manglares del Golfo de Guayaquil fueron talados para la construcción de pilares, quillas de barcos, rieles de trenes y carbón vegetal. Incluso se tiene reportes que históricamente estos troncos eran incluso exportados hacia las costas peruanas (Austin, 2002).

¿CÓMO SE ESTRUCTURA ESTA GUÍA?

Esta guía está en actual desarrollo, se puede editar esta sección.

Esta guía se compone actualmente de 3 etapas: **antes de la plantación, durante la plantación y después de la plantación.**

Cada etapa se despliega en varios capítulos, los cuales tendrán se desarrollarán del siguiente modo.

- **Fase 1: Antes de la plantación**
 - 1.1 Estudios previos a la selección de un sitio
 - 1.1.1 Toma de variables ecológicas del manglar.
 - 1.1.2 Toma de variables fisicoquímicas, hidrológicas y del sedimento
 - 1.1.2.1 Topografía e hidroperíodo
 - Salinidad superficial
 - Vientos
 - Velocidad de corrientes
 - Características del suelo
 - Densidad aparente
 - Contenido de materia orgánica
 - Textura del suelo
 - Estimación de niveles y flujo de carbono
 - Calidad de hipocótilos recolectados
- **Fase 2: Durante la plantación**
 - Preparación del sitio
 - Técnicas de plantación
 - Identificación de posibles amenazas

- **Fase 3: Después de la plantación**
 - Procesamiento y análisis de datos obtenidos.
 - Utilización de herramientas de geoprocésamiento.
 - Monitoreo de áreas reforestadas.
 - Sostenibilidad a largo plazo.





FASE 1

Antes de la
plantación

1.1.2 VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS, HIDROLÓGICAS Y DEL SEDIMENTO

1.1.2.1 TOPOGRAFÍA E HIDROPERÍODO

INTRODUCCIÓN

La topografía es la ciencia que estudia la configuración y las características físicas de la superficie de la Tierra. Incluye aspectos como la elevación del terreno, la pendiente, y la distribución de las características geográficas. Es relacionada con otras ciencias como la cartografía, la oceanografía, la arquitectura y la arqueología. En el contexto de la restauración de manglares, la topografía del área puede influir en la disponibilidad de agua, el drenaje y la identificación de zonas de mayor y menor inundación. Esta variable es capaz de regular el desempeño de otras variables importante para el desarrollo de plántulas y adultos como la salinidad, al ser el manglar una especie halófila, el potencial redox, otros procesos biogeoquímicos y la disponibilidad de nutrientes dados por el agua.

Por otra parte, el hidroperíodo se refiere al patrón temporal de inundación y desecación en un área determinada. En términos más simples, es la duración y frecuencia de los eventos de inundación en una zona específica. Varios factores afectan el hidroperíodo, principalmente el aporte de agua, los cuales pueden provenir de la lluvia, marea y/o escurrimientos, la microtopografía, la capacidad de infiltración del suelo y la profundidad del nivel freático (Saínez Hernández, Zaragoza Méndez, & Lara-Domínguez, El hidroperíodo, la huella hidrológica de los humedales, 2023). Para los manglares, el hidroperíodo es un factor crítico ya que estos ecosistemas halófitos prosperan en zonas costeras (en la zona intermareal o la ribera de ríos o cuencas) que experimentan cambios periódicos en los niveles de agua debido a la influencia de las mareas. El hidroperíodo es una variable muy influyente en la disponibilidad de oxígeno, nutrientes y otras condiciones ambientales necesarias para el crecimiento saludable de las plantas de manglar.

¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

Para la toma de esta variable en el sitio de estudio se pueden utilizar medidores automáticos de presión, los cuales permiten comprender el flujo y refluo de agua en la columna del suelo. Lo ideal es colocar los equipos en las zonas de inundación y en las zonas más altas. Los equipos son programados para que comiencen a tomar mediciones por periodos de tiempo variados (desde minutos hasta horas de separación de tomas). Si no se cuenta con estos equipos especializados, se recomienda el uso de piezómetros, los cuales son tubos de PVC semi-enterrados de 3 metros de longitud, ranurados cada 5 cm para el paso del flujo de agua. Se coloca una tapa con un sensor, también llamado leveloggers, el cual registra los cambios de presión atmosférica, sumergido al menos a 50 centímetros del nivel freático mínimo (Saínez Hernández, y otros, 2020).



RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

	INADECUADO	DESFAVORABLE	NEUTRAL	FAVORABLE	CONDICIONES PERFECTAS
ELEVACIÓN (METROS)	>4	3-4	3-2,5	2,5-1,75	<1,75
HIDROPERÍODO (HORAS)	10	10-9	9-8	8-6	>6

1.1.2.2 SALINIDAD SUPERFICIAL

INTRODUCCIÓN

La salinidad superficial se refiere a la concentración de sales disueltas en la capa superior de un cuerpo de agua, como un océano, mar, laguna o estuario. Esta medida se expresa generalmente en partes por mil (ppt) o en porcentajes, representando la proporción de masa de sal disuelta respecto al volumen de agua.

La salinidad superficial varía considerablemente en diferentes cuerpos de agua y puede ser influenciada por diversos factores, como la evaporación, las precipitaciones, los aportes de agua dulce desde ríos o arroyos, y la interacción con corrientes oceánicas. En un sistema estuarino, los niveles de salinidad son más altos a la altura de la desembocadura y más bajos en zonas aguas arriba del estuario, donde reciben la afluente de aguas dulces. En los manglares, donde los ecosistemas se encuentran en la interfaz entre ambientes de agua dulce y salina, la salinidad superficial juega un papel crucial en la salud y la distribución de las especies adaptadas a condiciones salinas. Actúa como factor regulador para el crecimiento de manglares. Se ha estimado que los árboles influenciados por aguas más salinas pueden presentar tamaños más reducidos que otros con aguas más dulces. En el contexto de la restauración de manglares, entender y monitorear la salinidad superficial es fundamental para evaluar la idoneidad del sitio y diseñar estrategias de gestión efectivas para mantener un equilibrio adecuado en las condiciones salinas.



¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

La salinidad se mide por medio de la capacidad de conductividad eléctrica de los iones cargados positiva y negativamente. Si la conductividad sube, la salinidad también.

La conductividad se mide al traspasar una corriente eléctrica entre dos nodos. La disminución de voltaje en una distancia determinada puede traducirse en valores de conductividad. Se mide en Siemens. Por otro lado, la salinidad puede ser medida con un hidrómetro, el cual mide la gravedad específica utilizando el principio de Arquímedes de una muestra o un refractómetro, la cual mide la capacidad de la muestra de agua para refractar la luz. La medición con hidrómetro es la más sencilla ya que no se requiere una alimentación eléctrica, no contiene partes móviles y no se descalibra. Utilizando un refractómetro, se necesita una muestra mucho menor, se obtienen resultados más rápidos y precisos. Solo se necesita espolvorear unas gotas de muestras en porta muestra, el cual integra un prisma especializado que mide la concentración de la sal por medio de la refracción de una luz emitida (PCE Instruments, 2022).

RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

	INADECUADO	DESFAVORABLE	NEUTRAL	FAVORABLE	CONDICIONES PERFECTAS
Elevación (metros)	>45	40-45	35-40	30-35	<30

1.1.2.3 VIENTOS

INTRODUCCIÓN

Viento puede entenderse como un flujo de aire que se produce en la atmosfera terrestre. Es de carácter muy cambiante y afecta a todos los procesos climáticos y meteorológicos. Este posee un papel crucial para el desarrollo de manglares, siendo un factor que permite su distribución, así como su mortalidad. El manglar actúa como una barrera natural para vientos huracanados, protegiendo las zonas costeras del impacto de grandes vendavales, sin embargo, vientos fuertes pueden ocasionar erosión en el suelo, causando desniveles que pueden desestabilizar y/o afectar al sistema de raíces del manglar. Además, el daño físico directo a las plantas,

especialmente a las plántulas y árboles jóvenes, es una consecuencia potencial de vientos fuertes que pueden comprometer el crecimiento y la salud de las especies de manglar. Asimismo, los vientos pueden influir en la salinidad del agua al alterar los patrones de marea y facilitar la intrusión de agua salina. En términos de dispersión, los vientos actúan como agentes importantes, transportando semillas de manglares como el manglar rojo hacia nuevas áreas para la colonización.

¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

El viento es una variable vectorial la cual consiste en dos medidas para que sea correctamente medida: magnitud y dirección. La magnitud se mide con un anemómetro y la segunda con una veleta. Algunos anemómetros tienen incluida la veleta. El rumbo dado por la veleta es complementado por el dato de intensidad dado por el anemómetro. El viento es una variable altamente fluctuante. Una medición de viento puede clasificarse en viento instantáneo, la cual consta de una medición por 10 segundos y viento promedio, una toma de datos de alrededor de 10 minutos. por lo que se pueden tomar varias mediciones para obtener un promedio durante el instante de toma de muestra.



Las unidades de medida de viento por lo general son kilómetros sobre metros, metros sobre segundo o nudos, esta última como parte de lenguaje utilizado por marineros y conocedores del mar.

RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

	INADECUADO	DESFAVORABLE	NEUTRAL	FAVORABLE	CONDICIONES PERFECTAS
VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)	Alto >10	Moderadamente alto 10-8	Moderado 8-6	Moderadamente bajo 6-4	Bajo <4

1.1.2.4 VELOCIDAD DE CORRIENTES

INTRODUCCIÓN

La consideración de la velocidad de las corrientes es un aspecto fundamental en los esfuerzos de restauración y reforestación de manglares. En estos proyectos, comprender y respetar la dinámica de las corrientes se vuelve esencial para garantizar el éxito a largo plazo de las iniciativas de recuperación de estos ecosistemas. La velocidad adecuada de las corrientes es crucial para favorecer la oxigenación eficiente del suelo, proporcionando las condiciones óptimas para el desarrollo de las raíces de los árboles de manglar. Al incorporar esta variable en los planes de restauración, se promueve la resiliencia de la vegetación plantada y se maximiza su capacidad para adaptarse al entorno.

Además, al considerar la velocidad de las corrientes, se puede optimizar la distribución de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. La correcta

gestión de este factor contribuye a acelerar la recuperación de la productividad del manglar y a mejorar la biodiversidad asociada.

La eliminación eficiente de sedimentos y la promoción de condiciones adecuadas de salinidad también se benefician al integrar la velocidad de las corrientes en los programas de restauración. Esto asegura la formación de un sustrato propicio para la germinación de semillas y el establecimiento exitoso de nuevos individuos.

En última instancia, la consideración de la velocidad de las corrientes no solo potencia la viabilidad biológica de los manglares restaurados, sino que también fortalece la resistencia del ecosistema frente a posibles perturbaciones. Por lo tanto, es imperativo que los proyectos de restauración y reforestación de manglares aborden meticulosamente esta variable para lograr resultados sostenibles y beneficios duraderos para el ambiente costero.

¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

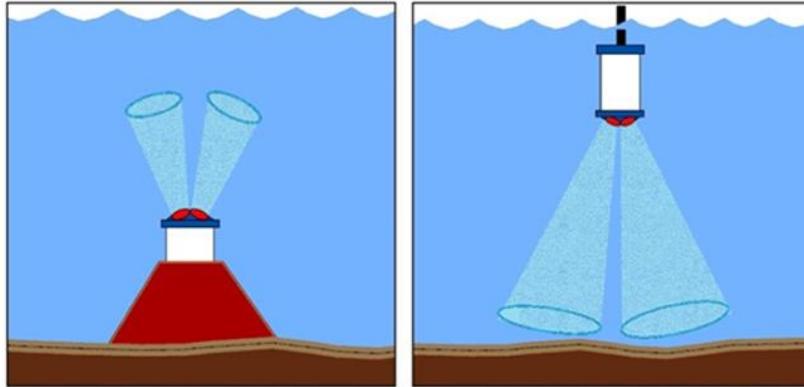
Para determinar esta variable puede utilizarse un molinete o veleta, instrumento realizado de manera sencilla que posee un mástil, boyas y una bandera para su localización. Este equipo se rige por dos métodos diferentes para la toma de datos: el método lagrangiano y euleriano.

Para el método lagrangiano, se sigue el desplazamiento de partículas individuales a lo largo del tiempo. La velocidad se determina midiendo como cambia de posición la veleta y calculando la distancia recorrida. Se pueden obtener datos de trayectoria y velocidad de las corrientes en puntos específicos en un cuerpo de agua. Sin embargo, posee la desventaja que puede ser complicado el rastreo de las partículas en áreas extensas o de difícil acceso.



Con respecto al método euleriano, mide la velocidad de corrientes en puntos determinados y fijos dentro del cuerpo de agua. Se utilizan equipos de medición fijos en un solo punto, como correntómetros o equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler por sus siglas en inglés), en ubicaciones estratégicas a lo largo del curso del agua. Estos equipos miden la velocidad y dirección de corriente en un intervalo de tiempo determinado, sin cambiar su ubicación. Por lo general estos equipos son fondeados y recopilan la información por periodos largos de tiempo. Esta se limpia luego de extraída la data y se obtienen datos de velocidad promedio y las variaciones en la velocidad a lo largo del tiempo y el espacio. Este método proporciona una visión más general de los patrones de corriente en un área determinada y es útil para monitorear grandes extensiones de agua de manera eficiente. Sin embargo, los equipos utilizados para este método son más costosos y no ofrecen información

detallada sobre la trayectoria de partículas individuales como lo hace el método lagrangiano.



RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

	INADECUADO	DESFAVORABLE	NEUTRAL	FAVORABLE	CONDICIONES PERFECTAS
VELOCIDAD DE CORRIENTES (m/s)	Alto > 1,2	Moderadamente alto 1,2 - 1	Moderado 1 - 0,8	Moderadamente bajo 0,7 - 0,4	Bajo < 0,4

1.1.2.5 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Densidad aparente

INTRODUCCIÓN

La densidad aparente del suelo es crucial para evaluar la producción primaria, el contenido de carbono en el sedimento y la disponibilidad de nutrientes. Representa la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y su volumen total, incluyendo los espacios porosos. En suelos de manglar, esta densidad puede variar desde menos de 0.2 g/cm³ en suelos orgánicos hasta 2 g/cm³ en suelos muy compactados (Rodríguez Zúñiga , y otros, 2018).

La densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen, considerando el espacio poroso. Se mide extrayendo una muestra de suelo, secándola en el horno y calculando la relación entre el peso seco y el volumen original. El aumento de la densidad aparente implica mayor resistencia mecánica y menor porosidad, limitando el crecimiento de raíces a niveles críticos. Estos valores críticos varían según la textura del suelo y la especie de planta, afectando la circulación de agua y aire, así como el establecimiento y manejo de las plantas.



¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

Se emplea un cilindro metálico con un volumen ya establecido, al cual se le coloca en uno de sus extremos un cabezal cilíndrico. Este cabezal se golpea con un mazo de goma para presionar y hundir el cilindro en el suelo sin afectar la muestra. Después de clavarlo por completo, se retira del suelo utilizando una herramienta adecuada, con la cual se corta el excedente del extremo clavado. Una vez lleno y nivelado en ambos extremos, se sella con tapaderas de plástico en ambos extremos.

Análisis en el laboratorio:

- Se extrae la muestra de suelo del cilindro, cuyo volumen es conocido.
- La muestra se somete a un proceso de secado en un horno a 60°C durante 48 horas o a 105°C durante 24 horas.
- Después del secado, se pesa la muestra.
- La densidad aparente se calcula dividiendo el peso seco obtenido entre el volumen correspondiente del cilindro.

RANGO DE VALORES ÓPTIMOS

Suelos porosos y bien aireados, con baja densidad aparente, son ideales para que las raíces de las plantas crezcan de manera saludable. por otro lado, suelos compactos con alta densidad aparente tienen problemas de aireación y drenaje, lo que dificulta que las raíces alcancen agua y nutrientes. en estas condiciones, el crecimiento de las plantas se ve constantemente obstaculizado o ralentizado.

Tabla 1: Valores críticos de densidad aparente en función de la textura. Obtenido de (Porta, López Acevedo, & Roquero, 1999)

Textura	Densidad aparente crítica (mg/m ³)
franco arcilloso	1,55
franco limoso	1,65
franco arenoso fina	1,80
arenosa franca fina	1,85

Contenido de Materia Orgánica

INTRODUCCIÓN

La productividad elevada de los manglares se atribuye comúnmente a las tasas significativas de descomposición de hojarasca y al eficiente reciclaje de nutrientes, tanto los originados naturalmente como los provenientes de fuentes humanas. La materia orgánica del suelo, compuesta por cadenas de carbono resultantes de la descomposición de material vegetal o animal, es una parte no mineral del suelo. Su relevancia se evidencia en su capacidad para retener humedad, actuar como barrera contra la erosión, proporcionar un hábitat favorable para diversas especies de invertebrados y almacenar nutrientes.

¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

Se determina el lugar exacto para obtener la muestra, se toma como mínimo 100 gramos de muestra. Utilizando una pala y guantes, se recoge la muestra de sedimento, que se guarda cuidadosamente en una bolsa bien sellada y se almacena en una hielera para mantenerla fría. En caso de no trabajar con la muestra el mismo día, se guarda en el congelador. Además, se etiqueta la bolsa resellable con las características específicas de la muestra.

Posteriormente en el laboratorio: el método de ignición o calcinación para evaluar la materia orgánica implica la destrucción controlada de toda la materia orgánica en una muestra de suelo o sedimento. Se coloca una cantidad conocida de la muestra seca en un crisol de cerámica, se calienta entre 350 y 440°C durante 6 a 8 horas, y después se enfría en un desecador para pesarla. El contenido de materia orgánica se calcula restando el peso inicial del peso final, multiplicando el resultado por 100 y dividiendo por el peso inicial. Es crucial corregir todos los pesos y asegurarse de que la muestra esté completamente seca. Durante la calcinación, la temperatura se mantiene por debajo de 440°C para evitar la destrucción de carbonatos inorgánicos. La posible pérdida de agua estructural en minerales de arcilla se aborda con un pretratamiento utilizando HCl y ácido HF para eliminar la materia mineral.



RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

La acumulación de materia orgánica en los suelos de los manglares depende de la cantidad de material orgánico que entra y las salidas que resultan de la descomposición en condiciones anóxicas/anaeróbicas. La descomposición de material orgánico en los manglares es un proceso complejo que involucra tanto procesos aeróbicos como anóxicos/anaeróbicos. Debido a la falta de oxígeno en estos suelos, la descomposición es baja, lo que favorece un alto almacenamiento de carbono (Rodríguez, 2017). Por lo tanto, los manglares prosperan mejor en áreas con

altos niveles de materia orgánica. Además, el contenido de carbono aumenta a medida que el manglar progresa en etapas más avanzadas de su ciclo de vida.

Textura del suelo

INTRODUCCIÓN

La composición y textura del suelo son factores fundamentales para el crecimiento de los manglares. El mangle rojo (*Rhizophora mangle*) prospera mejor en sedimentos que cuentan con una combinación de arcilla y limo, especialmente cuando estos son ricos en materia orgánica, tienen bajos niveles de oxígeno y experimentan períodos prolongados de inundación.

¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

Es necesario recolectar las muestras durante la bajamar para acceder a la zona intermareal, donde las raíces quedan expuestas. Después, es crucial analizar las muestras, pudiendo realizar hasta tres ensayos dependiendo del tipo de suelo. En el caso de suelos limo-arcillosos, se sugiere llevar a cabo ensayos de hidrómetro y granulometría láser, mientras que, en sedimentos más gruesos, se debe optar por la granulometría a través del tamizado.

Granulometría con tamiz

La granulometría es un método que evalúa la distribución de tamaños de partículas en una muestra de sedimento. Se logra separando las partículas mediante tamices con aberturas específicas que indican el tamaño máximo de cada fracción. Los pesos de las partículas retenidas en cada tamiz se expresan como porcentajes en relación con el total de la muestra. Estos porcentajes, tanto parciales como acumulados, se utilizan para trazar la curva granulométrica, que proporciona una representación visual de los distintos tipos y texturas de suelos presentes en la muestra.



Para realizar el análisis granulométrico de una muestra:

- La muestra se coloca en bandejas de metal y se esparce antes de secarla en el horno.
- Se registra el peso húmedo de la muestra con una balanza.
- La muestra se seca a 60°C durante 48 horas o a 105°C durante 24 horas, y luego se registra su peso seco.
- Se utiliza el método del cuarteo para obtener una muestra representativa.
- Se prepara la tamizadora ordenando los tamices de mayor a menor número.
- La muestra cuarteada se coloca en la parte superior de la torre de tamices y se inicia el proceso de tamizado, que dura aproximadamente 2 minutos.

- Con cuidado, se retira la torre de tamices de la tamizadora.
- Se separan y extraen los materiales retenidos en cada tamiz, pesándolos con una balanza y utilizando brochas para quitar cualquier material adherido.
- Este proceso se repite para cada tamiz y para el contenido que quedó en el fondo.
- Se registran los pesos extraídos de cada tamiz.
- Se realiza el cálculo de la pérdida de material.
- Finalmente, se elabora la curva granulométrica.

Ecuaciones que se utilizan en este ensayo

$$\text{Porcentaje retenido parcial} = \frac{\text{Masa Retenida}}{\text{Masa total}} * 100$$

$$\% \text{ de error} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa total}}{\text{Masa total}} * 100$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

# TAMIZ	ABERTURA	PESO PARCIAL (G)	RETENIDO O ACUMULADO (G)	% RETENIDO	% RETENIDO O ACUMULADO	PASADA	% PASANTE ACUMULADO
#4	4.75 MM						
#10	2 MM						
#40	425 μM						
#60	250 μM						
#80	180 μM						
#100	150 μM						
#120	125 μM						
#140	105 μM						
#170	90 μM						
#200	75 μM						
FONDO							
TOTAL							

Granulometría láser

Este método se basa en la exposición de la muestra a tres láseres, con cierta longitud de onda, los cuales son proyectados para poder identificar el tamaño y distribución de las partículas de sedimento. El equipo detecta y mide la intensidad de la radiación difractada por las partículas que pasan por la trayectoria del haz de luz. Las partículas en general difractan la radiación láser incidente a ángulos específicos en función de su tamaño (Coruña, 2019).

Para llevar a cabo este análisis, se requiere un gramo de muestra seca y tamizada. Esto asegura que no haya restos de raíces u hojas en la prueba, ya que está destinada únicamente a sedimentos finos que pueden permanecer en suspensión en agua destilada. Utilizamos el granulómetro láser Horiba LA-300, diseñado específicamente para medir el tamaño de partículas en diversos materiales. Su principio de funcionamiento se basa en la medición a través de un espejo láser, que calcula la distribución del tamaño de las partículas a partir de la intensidad de la luz dispersada generada al irradiar láser sobre las partículas.



Hidrómetro

Dado que el análisis granulométrico con tamices no es práctico para partículas más pequeñas de 0,076 mm (tamaño del tamiz #200), especialmente en suelos finos, se recurre al ensayo de hidrometría. En este método, se dispersa una muestra de suelo en agua y luego se deja reposar la solución para que las partículas sedimenten individualmente.

- Prepare una solución de 1.000 ml con aproximadamente 50 g de material que ha pasado a través del tamiz #40.
- Agite la solución para lograr cierta uniformidad.
- Deje reposar la solución para que las partículas se sedimenten.
- Tome lecturas con el hidrómetro en diferentes intervalos de tiempo (usualmente a los 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 16 h y 24 h).
- Realice los cálculos correspondientes



RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

Se adapta a una amplia variedad de suelos, pero muestra un crecimiento óptimo en sedimentos de lodo fino presentes en los estuarios de ríos aguas abajo. En particular, alcanza su mayor altura y adopta una forma de crecimiento columnar en los estuarios de los ríos tropicales más grandes, que se caracterizan por tener sedimentos de arcilla fina y lodo negro con altas concentraciones de carbono orgánico y condiciones anaeróbicas con elevadas cantidades de sulfuro. A pesar de ello, también se desarrolla bien en lugares con sedimentos aeróbicos que van desde arenas finas hasta piedras y rocas gruesas, incluyendo murallas de coral (Duke & Allen, 2006).

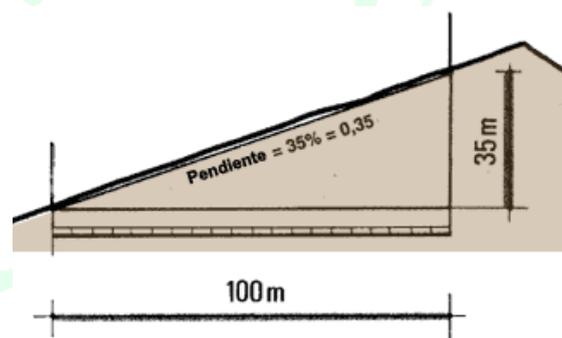
Puede prosperar en suelos de diversas texturas, como arenas, franco arenosas, francas, franco arcillosas arenosas, arcillosas, franco arcillosas y arcillosas arenosas.

1.1.2.6 PENDIENTE

INTRODUCCIÓN

La pendiente del terreno, un factor topográfico crucial, es medir el grado de inclinación de un terreno. Si existe una mayor inclinación, mayor será el valor de la pendiente. Para obtener dicho valor, se calcula la tangente de la superficie, la cual es la división de la altura del terreno con la distancia horizontal medida. Puede expresarse en porcentaje (%) o en grados (°).

La pendiente desempeña un papel significativo en la planificación y ejecución de proyectos de reforestación, especialmente cuando se trata de ecosistemas tan sensibles como los manglares. Los manglares, ecosistemas costeros tropicales y subtropicales, proveen una variedad de servicios ecológicos esenciales, desde la protección de la línea costera hasta la biodiversidad única que albergan. Sin embargo, la restauración y conservación de estos bosques costeros dependen en gran medida de la comprensión de la topografía del terreno.

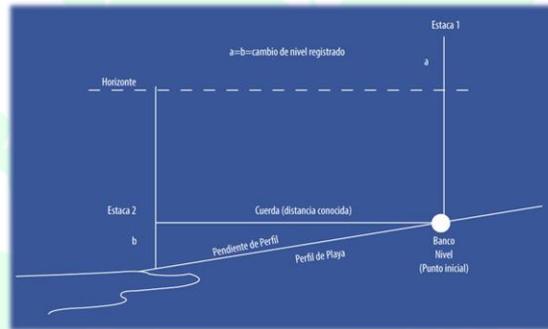


La pendiente de un terreno influye directamente en la hidrología y la dinámica del agua en los manglares. Este factor determinante afecta la distribución del agua salina y dulce, así como el flujo de sedimentos. Una comprensión detallada de la pendiente del terreno se vuelve esencial para diseñar estrategias efectivas de reforestación que maximicen la supervivencia y el crecimiento de las plántulas de manglar.

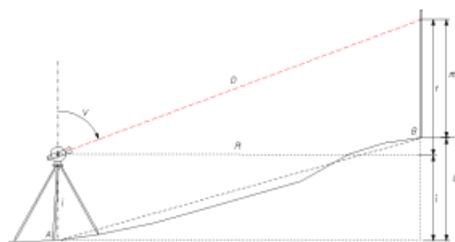
¿CÓMO SE TOMA ESTA VARIABLE?

Para la toma de esta variable puede emplearse el mismo método de medición de la pendiente de una playa arenosa, aplicado a la zona intermareal del manglar. Pueden aplicarse dos métodos diferentes: Método Emery, Método por nivel.

El método Emery se realiza con dos personas. Como se muestra en la figura, el método consiste en 2 estacas graduadas (centímetros) separadas por una distancia conocida (3 m). Esta longitud establece el intervalo de medición para cada punto a lo largo del perfil de playa. Las mediciones con este método requieren tener visibilidad del horizonte. El observador (el cual se coloca en la posición donde se encuentra la estaca 1) identifica el horizonte a través de la parte superior de la estaca localizada más cerca del mar (estaca 2) y determina la altura o desnivel del perfil desde la parte superior de la estaca 1 localizada más cercana al punto inicial del perfil. El observador coloca los resultados en altura dentro de la plantilla de medición.



Para el método por nivel topográfico se emplea dicho equipo, el cual posee una mirilla montada sobre un trípode estable. Como primer paso, se debe nivelar el equipo utilizando su ajuste de burbuja para que esté paralelo al suelo y perpendicular al punto de referencia (punto A). Se establece una elevación de referencia, la cual servirá como punto inicial para las posteriores mediciones. Se apunta el telescopio hasta la regleta colocada a una distancia horizontal determinada y se anotan las tres mediciones dadas por las referencias punto o cruz presente en la mirilla del telescopio. Se anotan dichos valores y se les saca un promedio. Se deben tomar varios puntos en línea recta para tener mejores resultados. Una vez establecidos los valores de pendiente se calculan dividiendo la diferencia de elevación entre esos puntos por la distancia horizontal entre ellos. Este cálculo se realiza para cada par de puntos para obtener la pendiente en diferentes secciones del terreno.



RANGO DE VALORES ÓPTIMOS PARA EL MANGLAR ROJO

	INADECUADO	DESFAVORABLE	NEUTRAL	FAVORABLE	CONDICIONES PERFECTAS
PENDIENTE (%)	>4%	3%–4%	2%–3%	1.5%–2%	0%–1.5%



FASE 2

Durante la
plantación



FASE 3

Después de la
plantación

REFERENCES

- Austin, D. F. (1 de Octubre de 2002). Flora of Puná Island. Plant Resources on a Neotropical Island. *Economic Botany*, 420. Obtenido de [https://bioone.org/journals/economic-botany/volume-56/issue-4/0013-0001_2002_056_0420_FOIPR_2.0.CO_2/Flora-of-Pun%c3%a1-Island-Plant-Resources-on-a-Neotropical-Island/10.1663/0013-0001\(2002\)056\[0420:FOIPR\]2.0.CO;2.short](https://bioone.org/journals/economic-botany/volume-56/issue-4/0013-0001_2002_056_0420_FOIPR_2.0.CO_2/Flora-of-Pun%c3%a1-Island-Plant-Resources-on-a-Neotropical-Island/10.1663/0013-0001(2002)056[0420:FOIPR]2.0.CO;2.short)
- Campos, C. A., & Moreno-Casasola, P. (2009). Suelos hidromórficos. En *Breviario para escribir, observar y manejar humedales* (págs. 111-130). Xalapa.
- Coruña, F. (2019). *Granulometría Láser*. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid: <https://cai.ucm.es/ciencias-tierra-arqueometria/tecnicas-geologicas/tecnicas/granulometria-laser/22/#:~:text=El%20fundamento%20del%20m%C3%A9todo%20se,la%20distribuci%C3%B3n%20de%20las%20mismas.>
- Duke, N. C., & Allen, J. (2006). *Rhizophora mangle, R. samoensis, R. racemosa, R. X harrisonii (Atlantic-East Pacific red mangrove)*. Traditional Trees of Pacific Islands: Their Culture, Environment, and Use.
- PCE Instruments. (2022). *Refractómetro de salinidad PCE-DRS 2*. Obtenido de PCE Instruments: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/refractometro-pce-instruments-refract_metro-de-salinidad-pce-drs-2-det_5847351.htm#:~:text=El%20refract%C3%B3metro%20de%20salinidad%20es,una%20peque%C3%B1a%20cantidad%20de%20muestra.
- Porta, J., López Acevedo, M., & Roquero, C. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Refractómetro de salinidad PCE-DRS 2*. (s.f.). Obtenido de Refract: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/refractometro-pce-instruments-refract_metro-de-salinidad-pce-drs-2-det_5847351.htm#:~:text=El%20refract%C3%B3metro%20de%20salinidad%20es,una%20peque%C3%B1a%20cantidad%20de%20muestra.
- Rodríguez Zúñiga, M., Villeda Chávez, A., Vázquez-Lule, M., Bejarano, M., Cruz López, M., Olgún, S., & Villela Gaytán, R. (2018). *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rodríguez, C. H. (2017). *Existencias de carbono azul y la dinámica histórica de la cobertura de bosque manglar en el área conservación Sipacate Naranjo, Guatemala, Centroamérica*. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA. Obtenido de <http://icc.org.gt/wp-content/uploads/2018/01/Tesis-Carlos-Rodríguez.pdf>
- Saíñz Hernández, E., Lara Domínguez, A. L., Zaragoza, Á., Ibarra, A., Rivera, M., Hernández, M., & López, J. (2020). *Sensores para medir el nivel del agua dentro del suelo*. Obtenido de INECOL: <http://www.ecologia.edu.mx/inecol/index.php/es/component/content/article/17-ciencia-hoy/1219-sensores-para-medir-el-nivel-del-agua-dentro-del-suelo>

Sáinz Hernández, E., Zaragoza Méndez, Á., & Lara-Domínguez, A. L. (09 de Agosto de 2023). *El hidropériodo, la huella hidrológica de los humedales*. Obtenido de CrónicaMX: <https://www.cronica.com.mx/academia/hidropériodo-huella-hidrológica-humedales.html>

Siebe, C., Jahn, R., & Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*.

