

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MARÍTIMA Y CIENCIAS DEL MAR

Evaluación y Modelamiento del Cambio de Línea de Costa en
Condiciones Naturales y bajo Influencia de Obras de Protección Costera.
Caso de Estudio: Libertador Bolívar, Santa Elena-Ecuador

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

**Ingeniero Oceanográfico
&
Ingeniera Oceanográfica**

Presentado por:

Rommel Javier Caiza Quinga

Sophia Pierina Nativí Merchan

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi madre y familia por ser un apoyo constante durante todo el camino y por aguantar mis múltiples desplantes en las reuniones al tener que cumplir mis obligaciones como estudiante. A todos los amigos que adquirí en esta etapa de mi vida. A mis profesores los cuales han sido guía fundamental en mi proceso de aprendizaje, llevándome algo de cada uno de ellos, a todos aquellos que en algún momento me dieron su apoyo. A mis abuelas Rosa y Amada. Y a mi tía, Rosa Judith, quien tuvo que partir antes que nosotros, pero que siempre estuvo es mis caídas hasta de forma literal.

Sophia Nativí Merchán

Dedico el presente trabajo a mis padres, José y Germania que con su apoyo y entrega me han permitido culminar una etapa más de mi vida, a mi hermana Dejanera y amigos que me han dado ánimos para seguir adelante, mis profesores de Espol quienes con gran devoción han impartido sus conocimientos con el fin de construir buenos profesionales.

Rommel Javier Caiza Quinga

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por permitirnos cumplir esta meta, a nuestras familias por apoyarnos y comprendernos, a nuestros tutores Carlos Martillo e Ivan Saltos que con gran paciencia nos han sabido guiar durante el desarrollo de este proyecto, a la MSc. Gina Andrade que fue un pilar fundamental para poder realizar el levantamiento de información, al igual que los estudiantes del curso de oceanografía costera 2019 I-Término. A nuestros amigos que nos han ayudado en el desarrollo de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Rommel Caiza y Sophia Nativi y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

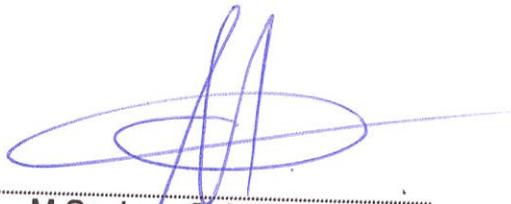


Sophia Pierina
Nativí Merchán

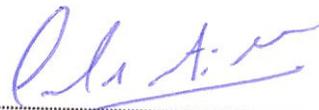


Rommel Javier
Caiza Quinga

EVALUADORES



M.Sc, Ivan Saltos Andrade
PROFESOR DE LA MATERIA



Dr. Carlos Eduardo Martillo
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Ecuador cuenta con una extensión aproximada de 2860 Km de largo de zona litoral desde el río Mataje al norte, hasta el río Zarumilla al Sur, donde gran porcentaje de la población se asienta en las zonas costeras, siendo de gran importancia recreativa y económica para el país; por lo cual se requiere conocer los procesos que afectan sus costas y como estas evolucionan a lo largo del tiempo, para tales fines se tomó como caso de estudio las playas Libertador Bolívar y Playa Bruja, ubicadas en la provincia de Santa Elena, junto a la vía del Pacífico o ruta estatal E15. La zona de estudio abarca 2 km, con antecedentes erosivos y retroceso de línea de costa que no habían sido cuantificados, pero que presentan estructuras de revestimiento construidas con el fin de proteger la población de Libertador Bolívar y la vía E15.

Para pronosticar la tendencia futura del cambio de línea se hizo uso del modelo one-line 'LITLINE', el cual se calibró con imágenes aéreas para el período 2006-2013 y se usó como datos de entrada: 1) oleaje del hindcast WaveWacthIII y llevado hacia aguas someras con el modelo MIKE21 SW, 2) batimetría de carta náutica IOA-105, 3) topografía levantada en campo con drones 4) información de campo usando la metodología del programa de Observación del Ambiente Litoral (LEO), usada a su vez para evaluar la amenaza por erosión costera mediante indicadores.

Como resultado se obtuvo que las zonas de Libertador Bolívar y Playa Bruja se erosionan a una tasa de alrededor de 50 cm al año. Categorizando el sitio en tres rangos de amenaza: resultando un 45% de amenaza alta, 46% media y 9% baja. La modelación al 2025, bajo condiciones naturales y sin considerar los revestimientos existentes, muestra una tendencia a la erosión, mientras los resultados con escolleras costa afuera en Playa Bruja, muestra una acreción del sitio, se observó erosión en la zona norte adyacente.

Palabras Clave: línea de costa, LITLINE, amenaza, erosión costera, MIKE 21, imágenes aéreas.

ABSTRACT

Ecuador has an approximate coastline of 2860 km from the Mataje River to the north, to the Zarumilla River to the South, where a large percentage of the population sits in coastal areas, being of great recreational and economic importance for the country; Therefore, it is necessary to know the processes that affect its coasts and how they evolve over time, for such purposes Libertador Bolivar and Playa Bruja beaches, located in the province of Santa Elena, were taken as a case study, next to Pacific route or state route E15. The study area covers 2 km, with erosive evidence and receding coastline that had not been quantified, but which have cladding structures built in order to protect the population of Libertador Bolivar and the E15 road.

For the prediction of the future trend of the coastline changing, it was used a one-line model 'LITLINE', which was calibrated with aerial images for the period 2006-2013 and used as input data: 1) WaveWacthIII Hindcast waves and taken to shallow waters with the MIKE21 SW model, 2) IOA-105 nautical chart bathymetry, 3) field surveying with drones and 4) field information using the methodology of the Coastal Environment Observation (LEO) program, used its time to assess the threat of coastal erosion through indicators.

As a result, it was obtained that the areas of Libertador Bolivar and Playa Bruja erode at a rate of around 50 cm per year. Categorizing the site into three threat ranges: resulting in a 45% high, 46% average and 9% low threat. The modeling to 2025, under natural conditions and without considering the existing coatings, shows a tendency to erosion, while the results with offshore jets in Playa Bruja, shows an accretion of the site, erosion was observed in the adjacent northern area.

Keywords: *coastline, LITLINE, threat, coastal erosion, MIKE 21, aerial images*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Área de Estudio	4
1.3.1. Ubicación	4
1.3.2. Climatología	5
1.4. Marco Teórico	5
1.4.1. Condiciones hidrodinámicas	5
1.4.2. Transporte de sedimentos	9
1.4.3. Modelos numéricos	9
1.4.4. Amenaza por erosión costera	16
CAPÍTULO 2.....	19
2 Metodología.....	19
2.1. Levantamiento de información bibliográfica y de campo	19
2.1.1. Oleaje	20
2.1.2. Marea	20
2.1.3. Batimetría	20
2.1.4. Imágenes aéreas	20

2.1.5. Topografía	21
2.1.6. Mediciones litorales	22
2.2 Transporte litoral	29
2.3. Cuantificación de cambio de línea de costa mediante imágenes aéreas.....	31
2.4. Modelaje del cambio de la línea de costa	32
2.4.1. Archivos de entrada	33
2.4.2. Calibración y validación	39
2.5. Amenaza por erosión costera	41
2.5.1. Indicadores de amenaza	41
2.5.2. Cálculo de la amenaza.....	41
2.5.3. Representación espacial de la amenaza.....	43
CAPÍTULO 3	45
3 Resultados	45
3.1. Mediciones litorales	45
3.1.1. Oleaje	45
3.2. Corriente litoral	50
3.3. Perfiles de playa	51
3.4. Tipo de rotura de la ola	54
3.5. Clasificación granulométrica de la zona de estudio.....	56
3.6. Estado Morfodinámico de la playa	58
3.7. Transporte litoral in situ.....	58
3.8. Cuantificación de cambio de línea de costa por fotogrametría	59
3.9. Dinámica de la línea de costa mediante el uso de un modelo numérico	66
3.9.1. Archivos de entrada	66
3.9.2. Transporte litoral (LITDRIFT)	71
3.9.3. Línea de costa modelada.....	72
3.10. Amenaza por erosión costera	76
CAPITULO 4	77
4 Discusión y Conclusiones.....	77
4.1. Discusión	77
4.2. Conclusiones	80
4.3. Recomendaciones	81
BIBLIOGRAFÍA	82
APÉNDICE.....	86

I.- Imágenes aéreas	86
II.- Rutinas de Matlab para descarga de datos de WaveWatch III y estadístico del oleaje.....	87
III.- Rutina Rstudio para análisis retroceso de berma.....	89
IV.- Mapa batitopo zona de estudio Libertador Bolivar	91
V.- Mapas de evolución de la berma.....	92
VI.- Salidas de campo.....	94
VII.- Fotografías salidas de campo	105

ABREVIATURAS

GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
SNGRE	Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
IGM	Instituto Geográfico Militar
LEO	Littoral Environment Observation Program
CERC	Coastal Engineering Research Center
DoC	Depth of Closure
ONU	Organización de las Naciones Unidas
EIRD	Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
APDRC	Asia Pacific Data Research Center
CIPAT	Centro de Investigación y proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra.
REGME	Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador
ASTM	American Society for Testing and Materials
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
FAO	Food and Agriculture Organization
MLWS	Mean Low Water Springs
MWL	Mean Water Level
SRC	Sistemas de Referencia de Coordenadas

SIMBOLOGÍA

S_{xx}	Vector x del esfuerzo de radiación
S_{yy}	Vector y del esfuerzo de radiación
H_s	Altura significativa
T	Periodo
H_b	Altura significativa en la rompiente
G	Granulometría
W_s	Velocidad de caída del sedimento
B	Pendiente de playa
Ω	Parámetro de Dean
ξ_b	Parámetro de Iribarren
C_u	Coefficiente de uniformidad
C_c	Coefficiente de curvatura
D_{50}	Diametro medio del grano
$\sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$	Desviación estándar de los sedimentos
m	metros
mm	milímetros

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla de Indicadores para determinar la Amenaza según la propuesta de Gornitz (1994) .	18
Tabla 2.1 Referencias de estudios realizados en Libertador Bolívar y Playa Bruja	19
Tabla 2.2 Coordenadas de estaciones	23
Tabla 2.3 Comparación entre parámetros obtenidos en campo de acuerdo a registros previos verus la salida de campo junio 2019.	24
Tabla 2.4 Parámetros morfodinámicos para la clasificación de playa	29
Tabla 2.5 Clasificación de los indicadores que conforman la Amenaza por Erosión Costera	42
Tabla 3.1 Altura de las olas observadas en cuadratura y sicigia y el promedio de altura para cada estación.	46
Tabla 3.2 Promedio de periodo por estación	49
Tabla 3.3 Promedio de dirección de oleaje y línea de playa por estación	50
Tabla 3.4 Corriente Litoral (m/s) por estación	50
Tabla 3.5. Pendientes de perfiles en la fase de cuadratura y sicigia	52
Tabla 3.6 Clasificación del tipo de ola en Libertador Bolívar según el parámetro de Iribarren	55
Tabla 3.7 Estado morfodinámico de la playa según el Parámetro de Dean	58
Tabla 3.8 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Playa Bruja - Libertador Bolívar	62
Tabla 3.9 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Zona Norte	62
Tabla 3.10 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Zona Sur	63
Tabla 3.11 Clasificación de Indicador de Erosión	63
Tabla 3.12 Climatología del oleaje en aguas profundas	67
Tabla 3.13 Parámetros de sedimentos por perfil transversal	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fotografías del área de estudio, A) Libertador Bolívar 2018, B) Playa Bruja Junio del 2019 (Autores, 2019)	2
Figura 1.2 Mapa de la Zona de Estudio, Comuna Libertador Bolívar Provincia de Santa Elena (Autores, 2019)	4
Figura 1.3 Cambio de la línea de costa, (Artagan, 2017).....	12
Figura 1.4 Esquema hipotético de un perfil de playa en equilibrio. (Larson, 1987)	13
Figura 2.1 Instalación del equipo de topografía (Autores, 2019).....	21
Figura 2.2 Mapa de estaciones de mediciones litorales (Autores, 2019)	22
Figura 2.3 Puntos de muestreo de sedimentos a lo largo del perfil de playa.	25
Figura 2.4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ASTM D 2487.	26
Figura 2.5 Esquema para realizar el perfil de la playa usando nivel y estadía.	27
Figura 2.6 Caracterización morfodinámica de la playa.	28
Figura 2.7 Imagen georreferenciada de la zona de estudio utilizando QGIS.	31
Figura 2.8 Esquema gráfico de la metodología de modelaje en LITLINE (Fadhi,2014) ..	33
Figura 2.9 Perfiles transversales en las 5 estaciones.	34
Figura 2.10 Perfil transversal de la playa con su respectiva tabla de valores.	34
Figura 2.11 Velocidad de caída de esferas de cuarzo en aire y agua (Vanoni, 2006) ..	38
Figura 2.12 Calibración LITLINE para diferentes alturas activas (Autores, 2019)	40
Figura 3.1 Oleaje in situ observado (Autores, 2019).....	47
Figura 3.2 Altura de olas observadas en cuadratura para cada estación (Autores, 2019)	47
Figura 3.3 Altura de olas observadas en sicigia para cada estación (Autores, 2019) ...	48
Figura 3.4 Promedio del periodo por estación (Autores,2019).....	49
Figura 3.5 Velocidad litoral promedio por estación (Autores, 2019).....	51
Figura 3.6 Clasificación del tipo de playa según su pendiente (FAO, 2009)	51
Figura 3.7 Perfiles de playa en cuadratura, 8/06/2019 (Autores, 2019)	53
Figura 3.8 Perfiles de playa en sicigia, 8/06/2019 (Autores, 2019)	53
Figura 3.9 Pendiente promedio de perfiles de playa (Autores, 2019)	54
Figura 3.10 Tipo de ola rompiente de acuerdo al parámetro de Ibarren (Autores, 2019)	56
Figura 3.11 Distribución del D ₅₀ promedio por perfil de playa (Autores, 2019).....	57
Figura 3.12 D ₅₀ promedio por perfil de playa (Autores, 2019).....	57
Figura 3.13 Transporte litoral promedio in situ para cada perfil en cuadratura y sicigia (Autores, 2019)	59
Figura 3.14 Evolución de la Berma del 2000 al 2013 en Libertador Bolívar (Autores, 2019).....	60
Figura 3.15 Evolución de la Berma en Playa Bruja del 2000 al 2013 (Autores,2019) ...	61
Figura 3.16 Zonificación de erosión por retroceso de la Línea de Costa para el período 2000 – 2013 (Autores, 2019).....	64
Figura 3.17 Zonificación del retroceso de la línea de costa período 2000-2006 (Autores, 2019).....	64

Figura 3.18 Zonificación del retroceso de la línea de costa período 2006-2013 (Autores, 2019).....	65
Figura 3.19 Perfiles transversales extraídos de QGIS (Autores, 2019).....	66
Figura 3.20 Modelamiento altura significativa en veril de 15m (Autores, 2019)	68
Figura 3.21 Modelamiento de altura significativa en la rompiente [H] (Autores, 2019)..	69
Figura 3.22 Distribución del “Geometrical Spreading” por perfil de playa (Autores, 2019)	70
Figura 3.23 “Geometrical Spreading” promedio por perfil de playa (Autores, 2019)	70
Figura 3.24 Transporte litoral promedio del período 2006-2013 para cada perfil (Autores, 2019)	72
Figura 3.25 Retroceso de la línea de costa 2006-2013 (Autores, 2019)	73
Figura 3.26 Posición de bermas, período 2006 – 2013 (Autores, 2019)	73
Figura 3.27 Retroceso de la berma 2019-2025, sin muro de protección (Autores, 2019)	74
Figura 3.28 Propuesta de protección costera para el área de Playa Bruja propuesto por Cansing & Mena (2018)	75
Figura 3.29 Cambio de línea de costa por estrucutras 2019-2025 (Autores, 2019)	75
Figura 3.30 Niveles de amenazas por erosión costera bajo condiciones oceanográficas (Autores, 2019)	76

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Corriente Costera	7
Ecuación 1.2 Relación Pelnar-Considerere	12
Ecuación 1.3 Conservación de la masa.....	13
Ecuación 1.4 Transporte de sedimentos	14
Ecuación 1.5 Transporte dimensional de carga	15
Ecuación 1.6 Continuidad para volumen de sedimentos	15
Ecuación 1.7 Indicador de Amenaza	17
Ecuación 2.1 Coeficiente de Uniformidad.....	25
Ecuación 2.2 Coeficiente de Curvatura	25
Ecuación 2.3 Cotas de terreno con nivel	27
Ecuación 2.4 Parámetro de Dean.....	29
Ecuación 2.5 Variables de la amenaza	43
Ecuación 2.6 Normalización	43
Ecuación 3.1 Parámetro de Iribarren.....	55

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Ecuador cuenta con una longitud de costa aproximada de 2860 km comprendida, al Norte por el Río Mataje y al sur por el río Zarumilla, este perfil costero está en constante cambio debido a la presencia de diversos factores, tales como, oleaje, transporte litoral, aumento del nivel del mar, fenómenos climatológicos, entre otros. Es así que, el estudio de los cambios morfodinámicos de las zonas costeras se convierten en un eje fundamental para la planificación territorial de los GADs Costeros así como también para la determinación del Riesgo por parte del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE).

Considerando que un estudio de toda la costa ecuatoriana requiere una mayor inversión de recursos económicos, tiempo, recolección y obtención de datos se acota espacialmente el área de estudio, en la comuna de Libertador Bolívar provincia de Santa Elena que por medio de testimonios de comuneros se ha logrado conocer que es una sector con grandes procesos erosivos sobretodo en el sector conocido como Playa Bruja donde existe un acantilado que sostiene la carretera de la ruta Spondylus (vía del Pacífico o ruta estatal E15).

Para corroborar estas versiones se analizó espacialmente imágenes satelitales compradas al Instituto Geográfico Militar, para los años 2000 y 2013, se analizó también la imagen de 2006 que fue obtenida de Google Earth. Para comprender los procesos litorales que rigen en Libertador Bolívar se realizó una campaña de medición en la fase lunar de cuadratura correspondiente al 8 de junio del 2019 y en Sicigia el 15 de junio del 2019 siguiendo los lineamientos del programa de Observación del Ambiente Litoral (LEO, por sus siglas en inglés) propuesto por el (CERC, 1984).

En busca de la zonificación de la amenaza por erosión costera se utiliza el software de modelamiento numérico basado en la teoría de 1-línea, lo que permite pronosticar el comportamiento de la línea de costa por al menos 6 años, este corto tiempo de modelación es debido a que en el país no existe un monitoreo continuo lo que limita los datos de entrada (granulometría, topografía y batimetría).

1.1. Justificación

Actualmente Libertador Bolívar es una comuna que depende económicamente del turismo y es conocido como un sitio ameno donde se puede disfrutar de la gastronomía, playa, cultura y artesanía, además a través de la comuna pasa uno de los ejes viales más importantes de la costa ecuatoriana que conecta las provincias de Santa Elena, Manabí y Esmeraldas, como lo es la carretera estatal E15 conocida como Ruta de la Spondylus, un tramo de esta carretera de aproximadamente de 2 kilometros se encuentra sostenida por un acantilado en el sector conocido como Playa Bruja, históricamente esta zona es propensa a fuertes oleajes y agresivos procesos de erosión que ponen en riesgo la integridad de la carretera, viviendas y pobladores de Libertador Bolívar (Cansing & Mena, 2018), en la actualidad Playa Bruja se encuentra cubierta por un muro de protección el cual debido al embate del oleaje y la propia intervención humana (ver Figura 1.1) ha perdido funcionalidad y gran parte de su estructura se ha visto comprometida.



Figura 1.1 Fotografías del área de estudio, A) Libertador Bolívar 2018, B) Playa Bruja Junio del 2019 (Autores, 2019)

En vista de la potencial amenaza que acoge a Libertador Bolívar y Playa Bruja se procede a realizar un estudio de las condiciones litorales de la zona así como, el modelamiento de la línea de costa utilizando el componente Litpack del software Mike Zero con el fin de poder determinar procesos erosivos. En este contexto y bajo las directrices del Marco de Sendai adoptado por unanimidad por los países miembros de las Naciones Unidas en 2015 para la gestión de riesgos de desastres por los próximos 15 años y en cumplimiento con la Prioridad 1 (Comprender el riesgo de desastres) y Prioridad 4 (Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción) se ha considerado como parte esencial para el desarrollo de este proyecto el zonificar la amenaza por erosión costera como primer paso para la determinación, evaluación y análisis del riesgo costero con lo cual permita al SNGRE prever posibles escenarios erosivos que pueda sufrir la costa ecuatoriana generando problemas estructurales y turísticos vinculados a la pérdida de espacios de recreación (Playas).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el cambio de la Línea de Costa de Libertador Bolívar mediante el uso de un modelo numérico bajo condiciones naturales y obras de protección costera.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el cambio de línea de costa mediante fotografías aéreas.
- Modelar el cambio de línea de costa bajo condiciones naturales y bajo influencia de obras de protección costera.
- Comprender el comportamiento de la amenaza por erosión costera en base a los resultados obtenidos.

1.3. Área de Estudio

1.3.1. Ubicación

Libertador Bolívar pertenece a la parroquia Manglaralto de la provincia de Santa Elena, está ubicada en el km 50 de la Ruta Spondylus, y según datos del Censo del 2010 realizado por el INEC tiene una población de 2600 habitantes y con proyecciones para el 2016 de 2871 personas, que se dedican al turismo, gastronomía, artesanía y en menor medida a la agricultura (Montero, 2014), el área de estudio comprende el sector conocido como Playa Bruja con una longitud aproximada de 2km tal como se aprecia en la Figura 1.2, en donde existe un acantilado con alturas que oscilan entre los 5 y 10 m que sostiene a la carretera E15 conocida como Ruta de la Spondylus.

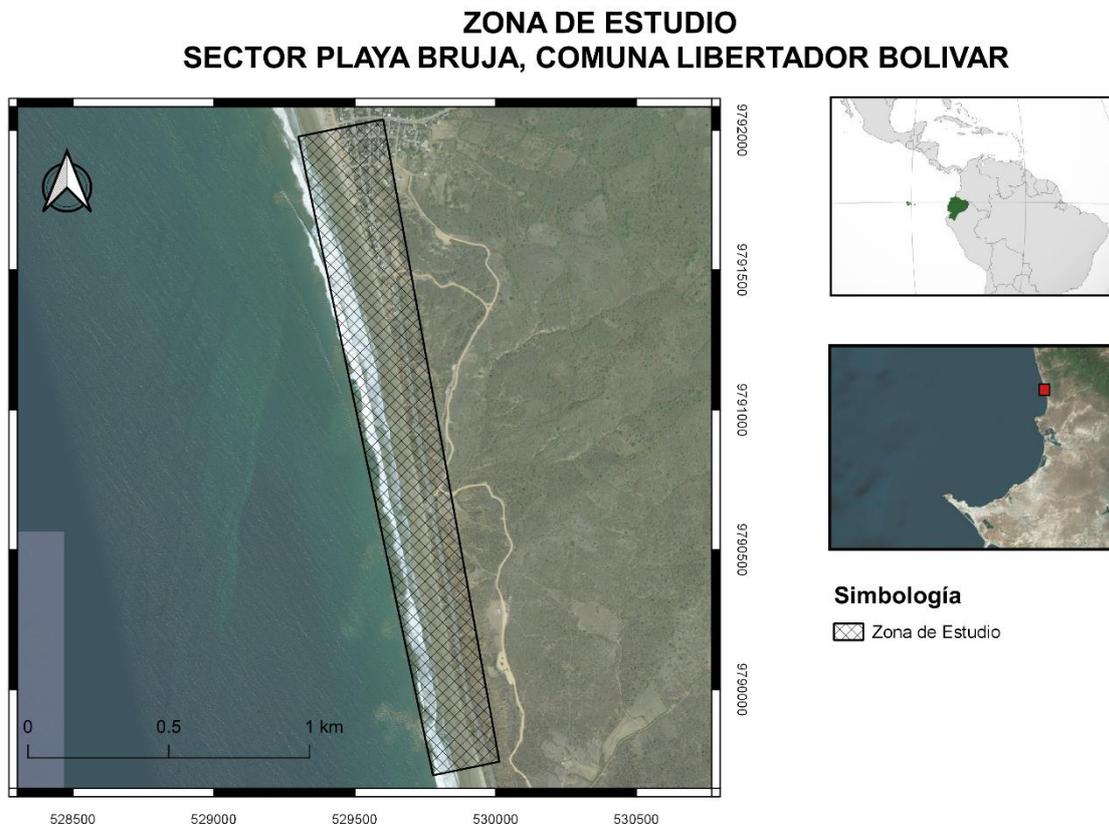


Figura 1.2 Mapa de la Zona de Estudio, Comuna Libertador Bolívar Provincia de Santa Elena (Autores, 2019)

1.3.2. Climatología

De la tesis de Montero (2014) se conoce que Libertador Bolívar tiene variaciones de temperatura que oscilan entre los 24 y 30 °C mientras que el viento dominante es proveniente del suroeste (SW) con velocidades que oscilan entre los 0.5 – 1.5 m/s y una media de 1 m/s (Cansing & Mena, 2018) el tipo de oleaje característico se da entre Spilling y Plunging.

1.4. Marco Teórico

La interacción entre las fuerzas ambientales y la morfología costera ocurre en un amplio rango de escalas temporales y espaciales. La morfodinámica costera depende principalmente de las condiciones hidrodinámicas, sedimentos, obras antropogénicas que se relacionan entre sí en un complejo sistema.

Obtener cada detalle necesario para el estudio de cambios morfológicos conlleva mucho tiempo, pero dado el conocimiento actual de las principales tendencias y procesos dominantes en la escala de estudio deseada, se presentan una serie de modelos, basados en teorías, que han logrado tener adecuados resultados a la hora de evaluar el cambio morfológico y de gran utilidad para evaluar la amenaza frente a la erosión en zonas costeras pobladas.

A continuación, se presentan breves descripciones de las temáticas y teorías necesarias para comprender el funcionamiento además de asunciones, limitaciones de los modelos utilizados y los principios en los que estos se basan.

1.4.1. Condiciones hidrodinámicas

1.4.1.1. Análisis espectral

El análisis espectral es una representación estadística del estado del mar usando ondas sinusoidales (Kulkarni, 2013), donde un registro de elevación de la superficie puede ser descrito como la suma de un gran número de componentes armónicos (Holthuijsen,

2007). El espectro de energía es proporcional al espectro de densidad de varianza. Tanto como el espectro de densidad de varianza puede ser usado para describir estadísticas de olas, el espectro de densidad de energía puede ser usado para describir aspectos físicos.

La apariencia general de las ondas puede ser inferido de la forma del espectro, mientras más angosto es el espectro, las ondas son más regulares. Por lo general, el mar de fondo (swell) tiene una frecuencia mucho menor que el mar de viento (sea), además, su oleaje es bastante regular y de cresta larga, por lo que su espectro es estrecho (tanto en frecuencia como en dirección), mientras un mar de viento joven es irregular y de cresta corta, por lo que su espectro es mucho más amplio (Holthuijsen, 2007).

1.4.1.2. Transformación del oleaje

En aguas profundas las olas son débilmente no lineales, pero a medida que se propagan hacia aguas menos profundas las olas comienzan a interactuar con el fondo incrementando la no linealidad, disminuyendo la velocidad de propagación y perdiendo energía debido a la fricción del fondo (Roelvink & Reniers, 2011).

Los procesos que pueden afectar una onda a medida que se propaga desde aguas profundas a aguas poco profundas incluyen: (a) Refracción, (b) Shoaling, (c) Difracción, (d) Disipación por fricción, (e) Disipación por percolación, (f) Ruptura, (g) Crecimiento adicional debido al viento, (h) Interacción onda-corriente, (i) Interacciones onda-onda (CERC, 2002).

En general todos los procesos implicados en la evolución del oleaje en aguas someras se intensifican, los de mayor significancia en la modificación del oleaje son la refracción el shoaling y la ruptura, mientras la reflexión y difracción incrementan su efecto bajo la presencia de estructuras (Holthuijsen, 2007).

Shoaling (asomeramiento): Consiste en un aumento de la altura de ola como consecuencia de la variación de la velocidad de propagación de la energía. El efecto puede ser reflejado a través del coeficiente de shoaling, el cual relaciona la altura de la ola a cualquier profundidad y la altura de la ola en aguas profundas.

Refracción: Bajo la asunción de contornos rectos y paralelos, la ola se propaga oblicuamente hacia la costa y los extremos de las crestas están a diferentes profundidades. El extremo más alejado con respecto a la costa está en una ubicación más profunda, por lo tanto, tiene una velocidad mayor que el lado más cercano de la cresta con respecto a la costa. Esta situación lleva a la flexión de la cresta de las olas, que se llama refracción (Artagan, 2006) (Kamphuis, 2000).

Difracción: La difracción es el giro de las ondas hacia áreas con amplitudes más bajas debido a los cambios de amplitud a lo largo de la cresta de la onda. La difracción es particularmente fuerte a lo largo de la línea de sombra geométrica de obstáculos como islas, cabeceras y rompeolas (Holthuijsen, 2007).

Ruptura: Teóricamente el shoaling incrementa la altura de la ola infinitamente en aguas de muy poca profundidad. Sin embargo, hay un límite físico para la esbeltez de las olas H/L . Cuando este límite es excedido, las olas rompen y disipan su energía (Kamphuis, 2000). En aguas profundas la esbeltez límite es 0.142, cuando se excede este límite el movimiento de la partícula en la cresta excede la celeridad de la onda y parte de la cresta se desploma. En aguas poco profundas, el esbeltez es algo menor que en aguas profundas y está parcialmente controlada por la profundidad relativa (H / L) y la pendiente del lecho (Davidson-Arnott, 2010).

1.4.1.3. Corrientes costeras

La corriente en la zona de surf está compuesta de movimientos a muchas escalas, forzados por varios procesos. Esquemáticamente la corriente total u puede ser expresada como una superposición de estos componentes.

$$u = u_w + u_t + u_a + u_o + u_i$$

Ecuación 1.1 Corriente Costera

Donde:

u_w es la corriente, producto de las olas que rompen.

u_t es la corriente de marea.

u_a corriente conducida por los vientos.

u_i son los flujos oscilatorios debido a las olas de viento e infragravedad.

Las corrientes de marea tienen mayor dominancia en bahías, estuarios. En las costas abiertas las corrientes generadas por olas que inciden oblicuamente son generalmente las que predominan. Fuertes vientos locales también conducen significativas corrientes costeras (CERC, 2002).

1.4.1.4. Corrientes longshore y cross-shore

De acuerdo con Sanchez (2015) las corrientes litorales inciden en el transporte de sedimentos una vez que han sido suspendidos por acción del oleaje rompiente, para este tópico se define el concepto base de los dos tipos de corriente más representativas de la zona litoral:

Corrientes cross-shore (normales a la costa) son el resultado de cambios en el nivel del agua debido al esfuerzo de radiación normal (S_{xx} & S_{yy}). A diferencia de las corrientes longshore las velocidades no son relativamente constantes con la profundidad, es conocida también como corriente de resaca, la cual se determina como un equilibrio entre las tensiones de radiación, el gradiente de presión de la superficie media del agua inclinada y la mezcla vertical.

Las corrientes longshore son inducidas por las olas y el viento, y generadas por gradientes en el flujo de momento (Radiation Stress), dichas corrientes corren paralelas a la costa, y tiene valores medios de 0.3 m/s y pueden alcanzar 1 m/s cuando se generan en tormentas, las mayores velocidades de las corrientes longshore se dan en la zona de surf (CERC, 1984).

1.4.2. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos es el enlace entre las condiciones hidrodinámicas y el cambio morfológico, consiste en el desplazamiento de volumen de sedimento por unidad de tiempo por acción de las olas y corrientes, puede ser clasificado como transporte a lo largo de la costa “longshore” y transporte costa afuera “Onshore-Offshore”.

1.4.2.1. Transporte longshore

Este transporte está entre los más importantes procesos que controlan la morfología costera y determina en gran medida las modificaciones que tiene la playa. La dirección del transporte es paralela a la costa por acción combinada de la marea, olas y viento (Mörner et al., 2005).

Para el cálculo del transporte a lo largo de la costa existen diferentes fórmulas expuestas por distintos autores entre los que destacan Galvin (1972), Komar (1976). Sin embargo, según expone Sanchez (2015) en su estudio para la construcción del malecón de Libertador Bolívar la metodología usada para la estimación del transporte es la que recomienda el Manual de Ingeniería Costera el cual está expuesto con mayor detalle en el capítulo 2 sección 2.2.

1.4.2.2. Transporte onshore-offshore

El transporte costa afuera moviliza el sedimento perpendicular u oblicuo a la línea de costa se produce entre la zona de rompiente y el frente de playa. Las interacciones se determinan por el esfuerzo cortante de las olas, y parámetros físicos como el tamaño de la partícula y tipo de sedimento, pendiente de playa (Quick, 1991).

1.4.3. Modelos numéricos

Los modelos numéricos son herramientas que se basan en la resolución de un conjunto de ecuaciones que rigen un sistema de estudio, son capaces de representar escenarios

actuales y en base a observaciones metódicas ser validados y posteriormente predecir un patrón de comportamiento con ciertos parámetros y condiciones iniciales. En la actualidad existe un aumento en el uso de los modelos numéricos predictivos para sistemas dinámicos naturales los cuales permiten simular y realizar una reproducción realista de su comportamiento.

En un sistema oceánico costero, el uso de modelos numéricos se enfoca en el estudio de procesos hidrodinámicos, morfodinámicos y de evolución costera que sustente acciones ingenieriles o decisiones administrativas (Paredes, Castedo, Llorente, & Laín, 2012). En el modelamiento costero los procesos dinámicos, oleajes, corrientes y vientos son los parámetros que influyen en el modelado de la evolución de la costa. Para este proyecto uno de los parámetros a evaluar es el modelamiento de la propagación del oleaje para lo cual Guisado Pintado, Malvárez García, & Concha Navas (2010) manifiestan que dichos modelos se clasifican en función de las distintas ecuaciones que rigen la generación y propagación del oleaje, tales como; modelos espectrales, modelos de conservación del momento y modelos basados en la ecuación de Boussinesq (1885), esta clasificación permite que los modelos de propagación del oleaje se dividan en dos grandes grupos; los que resuelven la fase y los que promedian la fase.

Por otro lado para el modelamiento de evolución costera existen modelos numéricos basados en la teoría one-line los cuales son desarrollados para estimar el transporte de sedimentos de tipo “longshore” y la variación de la línea de costa.

1.4.3.1. Modelos que Resuelven la Fase

Los modelos que resuelven la fase se basan en ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad del movimiento y no consideran generación ni disipación de energía. Una de las principales ventajas de los modelos que resuelvan la fase es la precisión de modelado en los procesos de difracción y refracción pero se limitan a pequeñas áreas. Las ecuaciones que rigen a los modelos que resuelven la fase son: ecuación de la pendiente suave (Berkhoff, 1972) basado en la transformación del modelo lineal parabólico de refracción y difracción de Radder y los basados en las

aproximaciones de Boussinesq que utilizan la ecuación de continuidad y conservación del momento de inercia.

1.4.3.2. Modelos que Promedian la Fase

Los modelos que promedian la fase están basados en la conservación de la energía espectral y consideran los fenómenos de generación, disipación de energía e interacciones no lineales en los que se describe a la superficie mediante un espectro de energía basado en el concepto del espectro de ola de Pierson y Moskowitz (1964).

Según Guisado Pintado et al. (2010) los modelos espectrales se clasifican dentro de tres generaciones. Las primeras generaciones con deficiencias básicas sobreestiman la entrada de viento y no incluyen la interacción el efecto de la transferencia no lineal entre olas, lo que condujo al desarrollo de modelos de segunda generación que parametrizaron las relaciones no lineales mediante la utilización del espectro de Jonswap, pero no son precisos bajo condiciones extremas de vientos. En el modelado de olas de tercera generación, no hay necesidad de comparar predicciones de modelos con espectros parametrizados, porque es capaz de reproducir explícitamente los procesos físicos que definen el estado del mar, aunque depende netamente de la calibración del modelo para mejorar la precisión de los resultados (Komen, G et al., 1996). La principal ventaja de los modelos de tercera generación es observar la evolución en el espacio y tiempo del espectro de frecuencias y la altura significativa (H_s). Entre los modelos más utilizados tenemos; WaveWatch III, TOMAWAC, SWAN y el utilizado en este proyecto MIKE21 Spectral Wave.

1.4.3.3. Modelo One-Line

Los modelos de una línea consideran que los perfiles de playa mantienen una forma promedio característica de la costa en un sentido comparativo y a largo plazo, es decir, si las playas son empinadas se mantienen empinadas, si tienen pendientes suaves siguen teniendo pendientes suaves, bajo este supuesto Artagan (2006) menciona que la evolución de la costa es debido a los cambios estacionales del clima de oleaje y el

transporte litoral (longshore), que hacen que la posición de la costa se mueva paralela a sí mismo, ya sea hacia la tierra cuando existe erosión y hacia el mar cuando se tiene acreción, hasta una profundidad, llamada profundidad de cierre (Depth of Closure) donde el transporte de sedimentos es muy pequeño o inexistente de tal manera que no hay variación en el perfil (ver Figura 1.3).

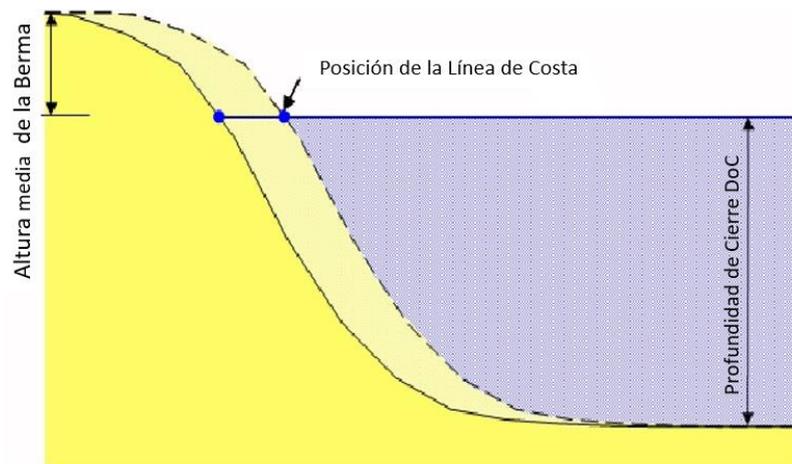


Figura 1.3 Cambio de la línea de costa, (Artagan, 2017)

Ante lo expuesto Pelnard-Considerere (1956), desarrollo una teoría matemática que define el movimiento de la costa a partir de una línea base y una línea de contorno que describe el cambio en la forma y el volumen de la playa a medida que se erosiona o acreciona, estos cambios tanto del perfil y de la línea de costa están relacionados en la Ecuación 1.2 y se pueden observar en la Figura 1.4.

$$\Delta A = \Delta y D$$

Ecuación 1.2 Relación Pelnar-Considerere

Donde:

ΔA : Cambio del área del perfil transversal de la playa (m^2)

Δy : Cambio de la posición de la línea de costa (m)

D: Profundidad de cierre

Larson, Hanson, & Kraus (1987) mencionan que para considerar una variación durante un intervalo de tiempo del sistema, se debe aplicar el principio de conservación de la masa formulando la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Ecuación 1.3 Conservación de la masa

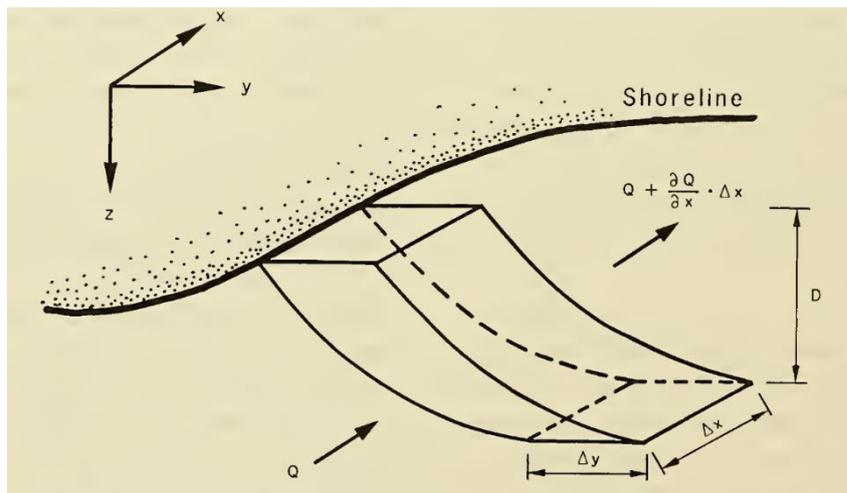


Figura 1.4 Esquema hipotético de un perfil de playa en equilibrio. (Larson, 1987)

Donde:

Q: transporte de sedimentos a lo largo de la costa (m^3/s)

A: área del perfil transversal de la costa (m^2)

x: Distancia de la línea de costa (m)

t: tiempo (s)

1.4.3.4. MIKE 21 Spectral Wave (SW)

MIKE 21 Spectral Wave es un modelo de oleaje de tercera generación basado en mallas no estructuradas cuya característica principal es su alta flexibilidad para la creación del dominio que se ajusta fácilmente a geometrías complicadas permitiendo realizar modelaciones en zonas con abundantes islas o líneas de costa irregulares (García,

García, & Palacio, 2009). MIKE 21SW simula el desarrollo, la descomposición y la transformación de oleaje de viento y fondo, tanto en aguas profundas como en aguas someras (DHI, 2014a). El modelo considera la mayor parte de procesos implicados en la transformación de oleaje (refracción, asomeramiento, difracción, disipación por fricción, ruptura, crecimiento adicional debido al viento, interacción onda-corriente, interacciones onda-onda) (Hendriyono, Wibowo, Hakim, & Istiyanto, 2015)

1.4.3.5. LITPACK

LITPACK es un paquete de software que simula el transporte de sedimentos no cohesivos debido a oleaje y corrientes, deriva litoral, evolución costera y desarrollo de perfiles a lo largo de la playa. Los contornos del lecho son casi uniformes en la dirección de la costa, y las olas y corrientes se consideran casi estacionarias. Consta de los siguientes módulos: LITSTP, LITDRIFT, LITLINE, LITPROF, LITTREN (DHI, 2009).

1.4.3.6. LITDRIFT

LITDRIFT consiste principalmente de dos partes de cálculo: cálculo de la corriente litoral y cálculo de transporte de sedimento. La distribución transversal de la corriente offshore, altura de la ola y set up para un perfil arbitrario son hallados resolviendo las ecuaciones de balance de momento. El transporte de sedimentos se calcula mediante el programa de transporte de sedimentos (STP) de DHI en función de las condiciones locales de olas, corrientes y sedimentos (DHI, 2011).

El transporte de sedimentos es calculado como: $q_t = q_b + q_l$ donde q_t es el transporte total, q_b el transporte de carga de lecho y q_l es el transporte en suspensión. El transporte de sedimentos suspendidos es calculado como el producto del flujo de velocidades instantáneas concentración instantánea de sedimentos (ver Ecuación 1.4).

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D uc \, dzdt$$

Ecuación 1.4 Transporte de sedimentos

La integración temporal de la ecuación de difusión para sedimento suspendido es repetida hasta obtener una solución periódica (DHI, 2014b).

El transporte dimensional de carga de lecho Φ_b es hallado mediante un enfoque determinístico:

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c})$$

Ecuación 1.5 Transporte dimensional de carga

θ' es el parámetro de Shield

θ_c es el esfuerzo de cizalla crítico

p es la probabilidad de que todas las partículas de una capa estén en movimiento

1.4.3.7. LITLINE

LITLINE calcula la posición de la línea de costa basada en el ingreso de oleaje en un formato "times series". El modelo está basado en una teoría one-line, en el cual se asume que el perfil transversal permanece invariable durante la erosión o acreción. Así, la morfología costera está descrita solamente por la posición de la línea de costa y por el perfil costero en una determinada posición de la línea de costa.

La principal ecuación de LITLINE es la ecuación de continuidad para volumen de sedimentos (Ecuación 1.6)

$$\frac{dy_c}{dt} = -\frac{1}{h_{act}} \frac{dQ}{dx} + \frac{Q_{sou}}{h_{act}\Delta x}$$

Ecuación 1.6 Continuidad para volumen de sedimentos

Donde:

y_c es la distancia desde la línea base hasta la línea de costa

t es el tiempo

$Q_{(x)}$ es la tasa de transporte a lo largo de la costa expresada en volumen.

$Q_{sou(x)}$ término de suministro o retiro de sedimentos de una fuente.

h_{act} y Q_{sou} son especificados por el usuario. La ecuación de continuidad es resuelta usando el método de diferencias finitas de Crank Nicholson.

1.4.4. Amenaza por erosión costera

Según la EIRD de las Naciones Unidas (2004) y expuesto en el Marco de Acción de Hyogo (ONU, 2005) se define a la amenaza como el “evento físico, natural o antropogénico que ocasione pérdidas humanas, lesiones, daños a infraestructura así como también perturbación de la vida social, económica y ambiental.

Bajo este contexto el IPCC (2007) menciona que cerca de un 50% de la población mundial vive en las zonas costeras, en las cuales se han asentado edificaciones e infraestructuras que a menudo se encuentran amenazadas por la erosión litoral, una de estas amenazas es la modificación en la posición de la línea de costa que es el resultado de un equilibrio dinámico en el que compiten por un lado el mar, erosionando o depositando materiales y por otro los aportes terrígenos a través de ríos y del viento, como resultado la línea de costa no es un elemento estático sino que avanza, retrocede y algunas veces se mantiene en su lugar al ser igual el material movilizado que el depositado a lo largo del tiempo, con el incremento de las poblaciones humanas y sus acciones sobre el litoral se alteran los ciclos de erosión natural, causando la pérdida de superficie con un gran valor económico, social y ambiental.

Uno de los principales factores condicionantes que determinan la aparición de amenaza, es la disposición estructural de la línea de costa (acantilado, playa, delta, etc.), la estabilidad de los materiales acumulados en la plataforma y talud continental, material poco cohesivo es más susceptible a la erosión mientras que depósitos consolidados son más estables (Obando, 2010). El factor desencadenante previsto para este proyecto es el oleaje y el transporte de sedimentos a lo largo de la costa.

1.4.4.1. Evaluación de la amenaza

Uno de los objetivos de este proyecto es realizar una evaluación de la amenaza por erosión costera para lo cual se ha identificado varios estudios que se enfocan en desarrollar métodos para evaluar de forma adecuada el riesgo en una zona litoral, entre estos estudios se encuentran los desarrollados por la Agencia Ambiental Europea (EEA) en 2011 y por la INVEMAR en el 2018, los cuales clasifican a la zona litoral en función

del tipo de amenaza tales como; erosión costera, inundaciones y ascenso del nivel del mar.

Bajo este contexto para evaluar la amenaza por erosión costera Gornitz (1994), Rangel (2013), mencionan que se debe medir la probabilidad de ocurrencia de un proceso determinado en este caso la variación en el tiempo y área específica de la línea de costa, así como la intensidad (magnitud) y posibles impactos asociados con la susceptibilidad física que depende netamente del tipo de costa que existe en la zona litoral. Por lo tanto, la obtención de la amenaza se basa en la siguiente ecuación:

$$A = M + O + S$$

Ecuación 1.7 Indicador de Amenaza

Donde:

A: es la amenaza

M: es la magnitud del evento

O: es la ocurrencia

S: Susceptibilidad física

Los indicadores que se definen para cada variable que conforma la amenaza están adaptados de las variables propuestas por Gornitz (1994) y según el informe técnico evaluación de la amenaza y vulnerabilidad de la INVEMAR dichos indicadores se clasifican según lo presentado en la Tabla 1.1 Estos indicadores antes de ser planteados están sujetos a ser evaluados según el comportamiento y características presentes en el área de estudio así como también el tipo de información recolectada.

Tabla 1.1. Indicadores para determinar la Amenaza según la propuesta de (Gornitz, 1994) .

Magnitud	Ocurrencia	Susceptibilidad
Rango Mareal	Variación de la Línea de Costa	Geomorfología
		Ancho de Playa
Altura de Ola		Granulometría
		Pendiente de playa
Aumento del Nivel del Mar		Estado Morfodinámico
		Rangos de erosión
		Grado de Exposición del oleaje

CAPÍTULO 2

2 Metodología

2.1. Levantamiento de información bibliográfica y de campo

La recolección de información se da mediante revisión bibliográfica, levantamiento de datos in situ y servidores de datos en línea, para la revisión bibliográfica se utilizaron como base tres estudios realizados en la comuna Libertador Bolívar y Playa Bruja los cuales están resumidos en la Tabla 2.1. El levantamiento de datos in situ se desarrolló mediante el programa Observación de Ambiente Litoral, (LEO por sus siglas en inglés) el cual nos permite comprender los procesos que rigen en el área de estudio y está explicado con mayor detalle en la sección 2.1.6.

Tabla 2.1 Referencias de estudios realizados en Libertador Bolívar y Playa Bruja

Autor, Año	Título del Proyecto
(Sanchez, 2015)	Estudios para el diseño de la protección costera del nuevo malecón de Libertador Bolívar
(ESPOL, 2017)	Línea Base para la construcción de dos espigones de encauzamiento en la desembocadura del Río Atravesado y el muro de protección costera de Playa Bruja en la comuna Libertador Bolívar en Santa Elena
(Cansing & Mena, 2018)	Diseño de una estructura de protección costera para Playa Bruja, ubicada en la comunidad Libertador Bolívar - Provincia de Santa Elena

2.1.1. Oleaje

Los datos de oleaje utilizados en este proyecto fueron obtenidos del hindcast del modelo WAVEWATCH III en la coordenada 81°W – 2°S el cual contiene datos históricos del periodo 1996 – 2017, debido a la escala temporal de este proyecto y la facilidad para comparar el retroceso de la línea de costa mediante el análisis de las ortofotos se trabajó con el periodo 2006 – 2013, el programa utilizado para descargar dicha base de datos es MATLAB a través del servidor OPENDAD. En el Apéndice II se presenta el script utilizado.

2.1.2. Marea

Los datos de marea fueron obtenidos del portal del Asia Pacific Data Research Center (APDRC) (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/data/data.php>); a través del servidor OPENDAD se descargaron datos de “Sea Level Center” de la Universidad de Hawaii, con frecuencia horaria del tipo “Research Quality Data (RQD)”, correspondientes a la estación mareográfica de La Libertad, ubicada en las coordenadas (80.917°O, 2.2°S).

2.1.3. Batimetría

Para la batimetría se digitalizaron las cartas náuticas IOA 105, IOA 1054 mediante el software QGIS, creando una capa shape de puntos con información batimétrica que posteriormente fue interpolada utilizando la herramienta Distancia Inversa Pondera (IDW) permitiéndonos obtener una mayor nube de puntos en la zona de estudio.

2.1.4. Imágenes aéreas

Las imágenes aéreas fueron compradas al Instituto Geográfico Militar teniendo a disposición los años, 1979, 2000 y 2013, mientras que la imagen correspondiente al año 2006 fue obtenida de Google Earth, posteriormente se procedió a georreferenciar el juego de imágenes en QGIS utilizando como mínimo 10 puntos de control que siguieron

criterios de visualización y localización en el tiempo, lo que permitió ajustar las imágenes al sistema de coordenadas WGS 84.

2.1.5. Topografía

El levantamiento topográfico se lo realizó en conjunto con el Centro de Investigación y proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), se utilizó un equipo de alta precisión compuesto por; un vehículo aéreo no tripulado marca DHI Phantom 4 Pro para la toma de fotografías aéreas, un equipo GNSS marca Trimble R8S (Figura 2.1A) para obtener los puntos de control, y un software de procesamiento digital para realizar la fotogrametría.

La metodología del levantamiento topográfico con uso de Drones puede verse en (Ferreira & Aira, 2017), (Sánchez Vargas, 2017), (Corredor Daza, 2015), cabe mencionar que el punto de control para Playa Bruja (PC-PB) fue arrastrado desde el punto base definido por ESPOL(PB-ES) en la Junta de Agua Potable de Manglaralto 2017 y validado por la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME).



Figura 2.1 Instalación del equipo de topografía (Autores, 2019)

a) Estación en Playa Bruja . b) Marcas de puntos de control.Imágen c).Ubicación de los puntos de control

2.1.6. Mediciones litorales

Dado que en la zona de estudio no existe información de monitoreo continuo a largo plazo y para efecto de análisis de las condiciones de la zona litoral y calibración del modelo de deriva litoral (LITDRIFT), se realizaron observaciones litorales en 5 estaciones distribuidas a lo largo de la costa tal como se aprecia en la Figura 2.2 sus coordenadas están detalladas en la Tabla 2.2. Las mediciones fueron realizadas por dos días durante dos fases de marea, el 8 de junio del 2019 durante la marea de cuadratura y el 15 de junio durante la fase de sicigia.

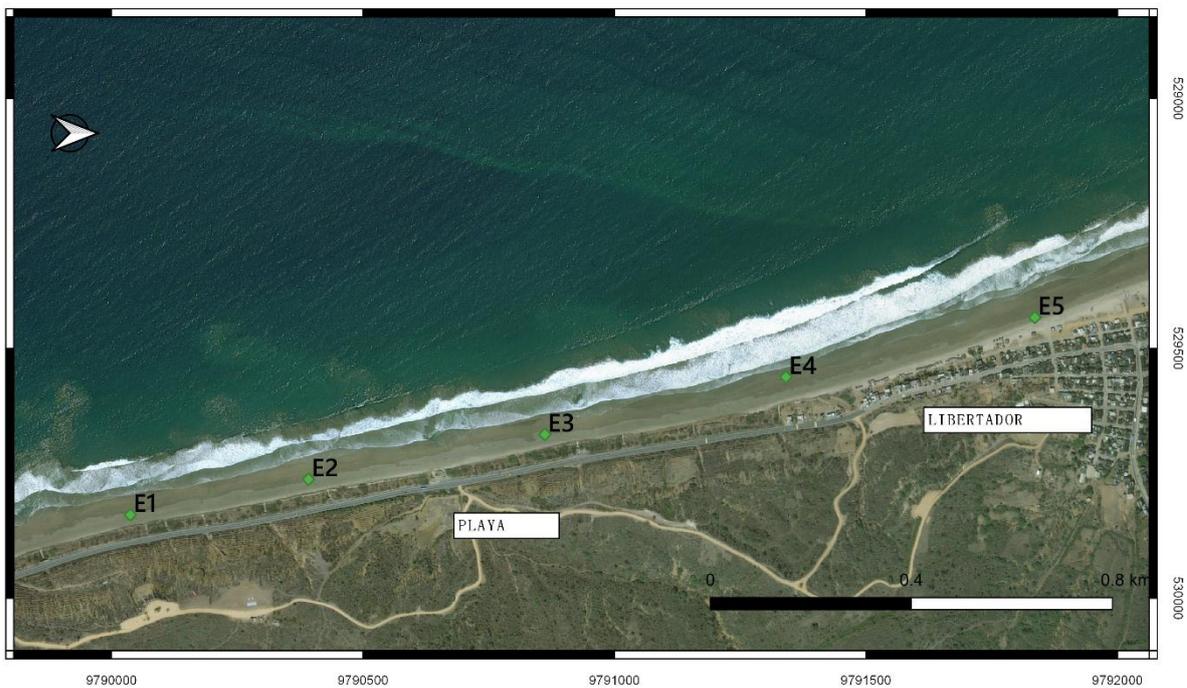


Figura 2.2 Mapa de estaciones de mediciones litorales (Autores, 2019)

Tabla 2.2 Coordenadas de estaciones (Autores, 2019)

SRC WGS 84 UTM 17 ZONA SUR		
Estación	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)
E1	529880	9789955
E2	529790	9790419
E3	529688	9790880
E4	529588	9791358
E5	529464	9791841

Los parámetros visuales para cada estación fueron medidos cada media hora, durante 6 horas y finalmente promediados, de donde se obtuvo corriente litoral, oleaje en la rompiente y se observó si existía la presencia de corriente de resaca. Las condiciones de rompiente consistieron en reportar el ancho de zona de surf, zona de rompiente, altura de ola (H_b), período (T) y ángulo de aproximación del oleaje (medido mediante una brújula). La altura H_b fue determinada de manera visual promediando 10 olas consecutivas, registrando el tiempo con un cronómetro y promediándolo para obtener el período.

La corriente litoral fluye paralelo a la costa, principalmente dentro de la zona de surf, generada por las olas que llegan con un ángulo oblicuo con respecto a la línea de costa constituye el principal factor para transportar sedimentos en la costa. Tomando como referencia un observador viendo hacia el mar, se considera positivo un flujo hacia la derecha y negativo hacia la izquierda.

En la Tabla 2.3 se resumen los datos obtenidos y usados en este proyecto, de acuerdo con la estación, la fecha de muestreo y la fuente de información. Posterior a la recolección de la información, cada variable fue promediada por estación, con el fin de reducir el probable sesgo debido a la observación visual como la variación anual y/o estacional, tratando de obtener una estimación promedio.

Tabla 2.3 Comparación entre parámetros obtenidos en campo de acuerdo a registros previos verus la salida de campo junio 2019.

		Sanchez, 2015		Mena & Cansing, 2018			Salida de Campo		
Fecha	12/9/2015	18/9/2015	16/6/2018	7/7/2018	21/7/2018	14/08/2018	15/06/2019	8/06/2019	
Fase Lunar	Sicigia	Cuadratura	Sicigia	Cuadratura	Cuadratura	Sicigia	Sicigia	Cuadratura	
Estaciones	1		T,H _b ,G,β						
	2		T,H _b ,G,β						
	3		T,H _b ,G,β						
	4						T,H _b ,G,β	T,H _b ,G	
	5	H _b ,T,Q	H _b ,T,Q					T,H _b ,G,β	T,H _b ,G,β

*H_b, Altura en la rompiente

*G, Granulometría

*T período en la rompiente

*β pendiente del perfil de playa

*Q. Transporte litoral neto

2.1.6.1. Muestra de arena y clasificación granulométrica

Según el programa de Observación del Ambiente Litoral (LEO) para el análisis granulométrico las muestras de arena deben ser tomadas en la zona intermareal la cual está comprendida entre el nivel de pleamar y bajamar. Las muestras son tomadas con fundas plásticas con un aproximado de 600 a 700 gramos de arena (CERC, 2002), cada muestra es tomada en los 5 perfiles determinados para el área de estudio en 3 distintos puntos tal como lo indica la Figura 2.3.



Figura 2.3 Puntos de muestreo de sedimentos a lo largo del perfil de playa.

Con un total de 15 muestras por salida se procede a realizar el análisis granulométrico considerando la norma ASTM C 136 – 01, el procedimiento para el tamizado se lo describe en (Das, 2012), posteriormente con el peso de las partículas suspendido en cada tamiz se procede a graficar la curva granulométrica para obtener los valores correspondientes para el D_{50} , D_{84} , D_{16} , necesarios como datos de entrada para el modelo utilizado en este proyecto, adicional a esto se obtienen los valores del D_{60} , D_{30} y D_{10} para la obtención de los coeficientes de uniformidad (Ecuación 2.1) y de curvatura (Ecuación 2.2) que nos permitan realizar la clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) presentado en la Figura 2.4.

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

Ecuación 2.1 Coeficiente de Uniformidad

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

Ecuación 2.2 Coeficiente de Curvatura

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos				
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo			
Suelos de partículas gruesas mas del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Mas del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada		
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada		
	Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad		GM	Grava limosa	
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad		GC	Grava arcillosa	
		Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No. 200	Cumple los criterios para GW y GM		GW-GM	Grava bien graduada con limo	
			Cumple los criterios para GW y GC		GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
	Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Limite Líquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad	
				IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad	
		Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	Orgánicos	Limite líquido - secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica	
				limite líquido - no secado		Limo orgánico	
		Suelos altamente orgánicos	Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad
					IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad
			Orgánicos	Limite líquido - secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica	
				limite líquido - no secado		Limo orgánica	
Principalmente materia orgánica de color oscuro			PT	Turba			

Elaborado por: Ing. Iván Matus Lazo y Ing. Marvin Blanco Rodríguez

Figura 2.4 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) ASTM D 2487.

2.1.6.2. Perfiles de playa

Los perfiles de playa fueron tomados tanto en sicigia como en cuadratura, estos se midieron empleando un nivel óptico calibrado y una regleta denominada estadia por medio de los cuales se determina la altitud de un punto y su distancia horizontal siguiendo los siguientes pasos descritos en el Manual de Levantamiento Topográfico de Espíritu, Vásquez, & Villanueva (2015), cabe mencionar que la metodología expuesta en este proyecto corresponde a una nivelación simple.

1. Se instala el trípode nivelando el tornillo de sujeción con un punto preestablecido, las patas deben formar un triángulo equilátero y la altura debe coincidir con la quijada del operador.
2. Se instala el equipo en la plataforma del trípode para nivelarlo con el nivel esférico.

3. Posteriormente dependiendo de las condiciones del terreno se coloca el nivel frente a la estadia a una distancia x y se procede a visualizar por la mira del nivel tal como se presenta en la Figura 2.5
4. Se anotan los valores superior, medio e inferior que visualiza la mira en la estadia.
5. Se mueve la estadia una nueva distancia horizontal y se repite el paso 3 y 4 hasta llegar al punto final de medición

Nota: Dependiendo de las condiciones del terreno la metodología puede variar entre nivelación compuesta y nivelación simple.

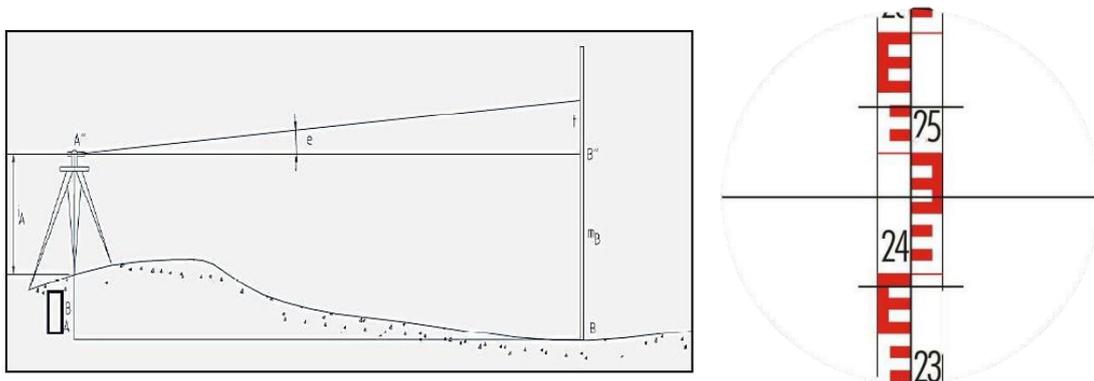


Figura 2.5 Esquema para realizar el perfil de la playa usando nivel y estadia.

Para obtener las cotas del terreno se procede a realizar las diferencias de las mediciones de los valores medios, la distancia horizontal se calcula con la siguiente ecuación:

$$D = (H.S - H.I) * 100$$

$$D = (H.S - H.M) * 200$$

Ecuación 2.3. Cotas de terreno con nivel

Donde:

D: distancia

H.S: hilo o valor superiores

H.I: hilo o valor inferiores

H.I: hilo o valor medios

2.1.6.3. Caracterización morfodinámica de la playa

La morfodinámica de una playa se basa en la interacción de ciertos parámetros litorales tales como la altura de ola, tipo de ola, tamaño de sedimento y mareas, se encuentran clasificadas en disipativas, intermedias y reflectivas (CERC, 1984). Las playas disipativas se caracterizan por poseer arenas finas con una pendiente suave mientras que las reflectivas poseen arena gruesa y una pendiente pronunciada (Celentano, 2014) una representación gráfica de estas playas puede verse en la Figura 2.6.

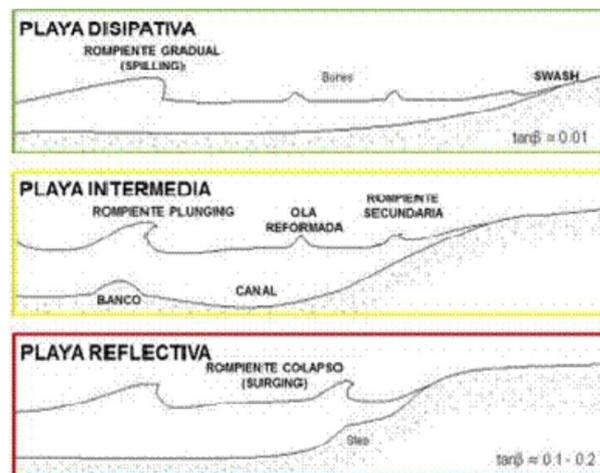


Figura 2.6 Caracterización morfodinámica de la playa.

Para poder determinar el estado morfodinámico se puede utilizar la clasificación descrita por la (FAO, 2009) y detallada en la Tabla 2.4, por otro lado la clasificación morfodinámica también puede ser clasificada utilizando el criterio de Dean (1977) utilizando la ecuación de Dean que está en función de la altura de ola en la rompiente (H_b), velocidad de caída del sedimento (W_s) y el periodo (T).

Tabla 2.4 Parámetros morfodinámicos para la clasificación de playa

	REFLECTIVAS	DISIPATIVAS
Pendiente	Pronunciada (> 4°)	Suave (< 2°)
Tamaño de grano	> 0.5 mm	<0.2mm
Tipo de ola	SURGING <0.5m	SPILLING >2m
ZONA BARRIDO	NO	SI
Olas en zona de barrido	1	> 3
BARRAS	NO	SI
CORRIENTES RESACA	FUERTE	POCA

$$\Omega = \frac{H_b}{W_S * T}$$

Ecuación 2.4. Parámetro de Dean

Donde:

$\Omega < 1$; Reflectiva

$1 < \Omega < 6$; Intermedia

$\Omega > 6$; Disipativa

2.2 Transporte litoral

Con la información obtenida de H_b y T para cada estación, se realizó el cálculo de transporte litoral recomendado por el Manual de Ingeniería Costera (CERC, 2002), el cual ha sido usado por varios estudios en la costa ecuatoriana (Piedra, 1990; Sanchez, 2015). La fórmula hace uso del ángulo α_0 , que se tomó como 20° para todos los cálculos, adicional a ello, para las estaciones 4 y 5 se estimó el transporte por (Komar,1976), como criterio de comparación, dado que usa datos in situ α_b , v_l y ha sido aplicado en diversos estudios (Moncayo & Ger, 2019; Vera, 2000) encontrándose resultados similares. Finalmente se utilizaron los resultados obtenidos mediante la formulación CERC (2002).

Fórmula CERC (2002)

$$Q_s = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_{ls}$$

$$P_{ls} = 1.57\rho g(H_b^3/T)\text{sen}\alpha_0$$

Parámetros utilizados (CERC, 2002)

ρ densidad del agua de mar, $\rho=1025$ [kg/m³];

ρ_s densidad del sedimento, $\rho_s= 2650$ [kg/m³];

a' volumen de sólidos vs volumen total, para arena usualmente 0.6;

g gravedad $g=9.8$;

α_0 ángulo entre ortogonal costa afuera y la línea de playa $\alpha_0= 20^\circ$

K factor cuando se usa H_b $K=0.39$

Fórmula (Komar, 1976)

$$Q_s = \frac{I_s}{(\rho_s - \rho)ga'}$$

$$d_b = 1.3H_b$$

$$C_b = \sqrt{gH_b}$$

$$E_b = \frac{\rho g H_b^2}{8}$$

$$u_m = \sqrt{\left(\frac{2E_b}{\rho H_b}\right)}$$

$$I_s = \frac{K'(EC_b V_l)}{u_m \cos(\alpha_b)}$$

Donde (Komar, 1976):

Q_s Transporte litoral [m³/s]

T período en la rompiente

I_s razón de transporte del peso sumergido [N/s];

U_m velocidad orbital máxima en la rompiente [m/s]

E_b energía de la ola en la rompiente [J/m² o kg.m²/s²];

H_b altura de ola rompiente [m];

d_b profundidad donde rompe la ola [m]

c_b celeridad de grupo en la rompiente [m/s]

v_l corriente litoral observada [m/s]

α_b ángulo de oleaje respecto a la línea de costa

K' coeficiente adimensional de Komar $K':0.28$;

2.3. Cuantificación de cambio de línea de costa mediante imágenes aéreas

Para evaluar el cambio de la línea de costa y conocer la tasa de erosión a la que está expuesta la zona de estudio se comparó distintas fotografías aéreas adquiridas al Instituto Geográfico Militar contando con los años 1979, 2000 y 2013, debido a la resolución de la imagen de 1979 no se pudo identificar la berma y el inicio del acantilado, por tal motivo se decidió reemplazar esta imagen por la del año 2006 obtenida de Google Earth posteriormente se procedió a georreferenciar el juego de imágenes en QGIS utilizando como mínimo 10 puntos de control que siguieron criterios de visualización y localización en tiempo y espacio, lo que permitió ajustar las imágenes al sistema de coordenadas WGS 84 UTM 17 Zona Sur. Siguiendo el criterio de Juanes (1996) expuesto en Rodríguez, Córdova, & Franco (2009) en el que menciona que la erosión de la berma está asociada con el aumento de las cotas de inundación por erosión de la playa se decide tomar como un indicador de retroceso de la línea de costa a los cambios temporales que ha sufrido la berma en Libertador Bolívar y el acantilado de Playa Bruja.

Por lo tanto, una vez que las imágenes fueron georreferenciadas se procedió a vectorizar el contorno de las bermas para cada imagen utilizando el software de Información Geográfica QGIS, tal como se puede apreciar en la Figura 2.7.

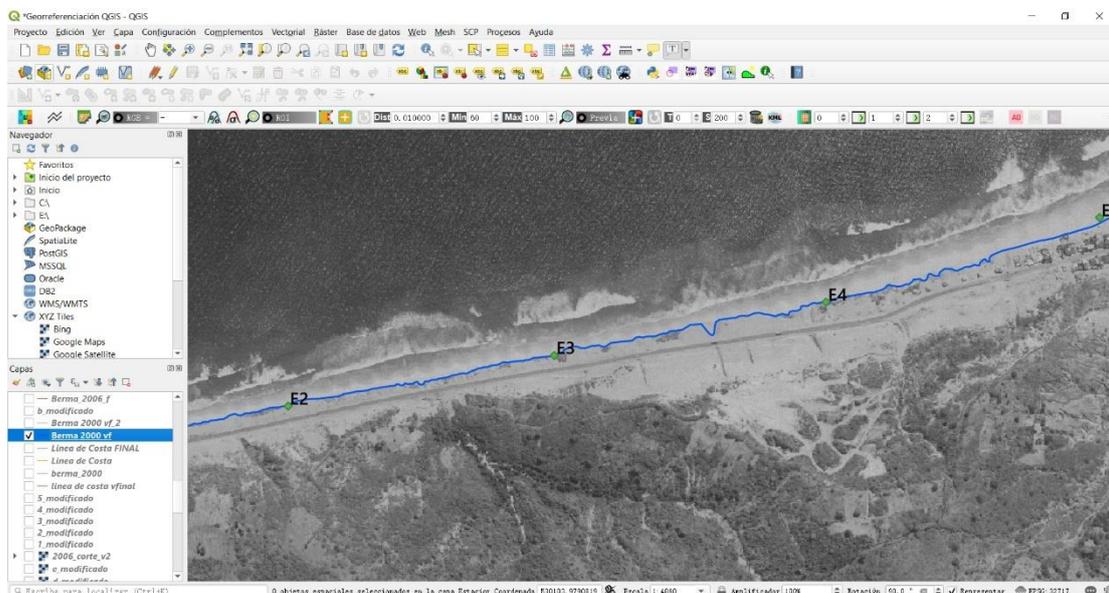


Figura 2.7 Imagen georreferenciada de la zona de estudio utilizando QGIS.

La tasa de erosión se determinó con el programa estadístico R-Studio realizando modificaciones al script presentado por Guevara & Campi (2018), el concepto es determinar la distancia de cada una de las bermas desde una línea base la cual fue trazada siguiendo la carretera E15 para posteriormente obtener la diferencia de cada una de las distancias de las bermas, los pasos a seguir son los siguientes:

1. Georreferenciar las imágenes a un SRC ajustando cada una de ellas a los puntos de control.
2. Vectorizar una línea base para todas las imágenes, para este estudio fue la carretera.
3. Vectorizar cada una de las bermas, 2000, 2006 y 2013
4. Ingresar las capas vectoriales creadas en QGIS en R-Studio y realizar las operaciones pertinentes.
5. Exportar como un archivo .xlsx los datos obtenidos por Rstudio
6. Para representar espacialmente estos resultados se exportan a QGIS y mediante un estilo de graduación se procede a zonificar las zonas de erosión.
7. Se crean escenarios para los años 2000 – 2006, 2006 – 2013, 2000 – 2013.

2.4. Modelaje del cambio de la línea de costa

La modelación de línea de costa se basó en la metodología propuesta por DHI (2014) y esquematizada por Fadhli (2014), el cual se presenta en la Figura 2.8, como primer paso se recolecta la información, se crean los archivos de entrada al modelo, se verifica la longitud del perfil, posteriormente se calcula el transporte litoral en el módulo LITDRIFT, evaluando si es similar a la esperada. Finalmente, se ingresan los archivos de oleaje, perfiles y transporte litoral en el programa de modelación de línea de costa LITLINE, para calibrar y validar los datos modelados con los resultados obtenidos mediante imágenes aéreas.

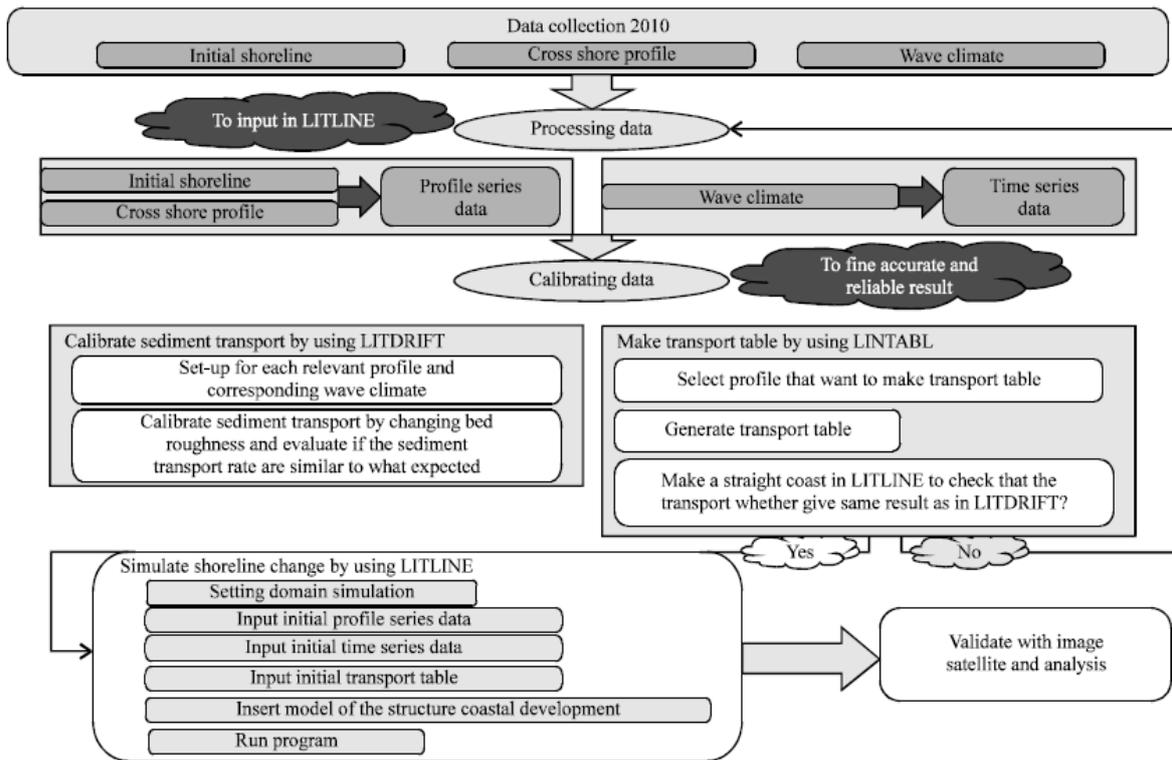


Figura 2.8 Esquema gráfico de la metodología de modelaje en LITLINE (Fadhi,2014)

2.4.1. Archivos de entrada

2.4.1.1. Perfiles transversales

El módulo utilizado para el modelamiento de la línea de costa requiere que la batimetría y la topografía se encuentre en un nivel de referencia correspondiente al Nivel Medio del Mar (MWL), se utilizaron los archivos descritos en la sección 2.1.3 y 2.1.5, se utilizó el software de información geográfico QGIS para crear un archivo denominado Batitopo el cual es una unión de la batimetría y la topografía del área de estudio. Posteriormente se realizó una interpolación IDW en el mismo software y se crearon 5 capas vectoriales que representen los perfiles en las estaciones tal como se puede ver en la Figura 2.9, una vez obtenidos el archivo batitopo.tiff y los shapes de cada estación se utiliza la herramienta “terrain profile” que puede ser instalada desde la opción complementos/administrar e instalar complementos, esta herramienta permite obtener la

imagen del perfil transversal de cada estación así como la tabla de valores (ver Figura 2.10).

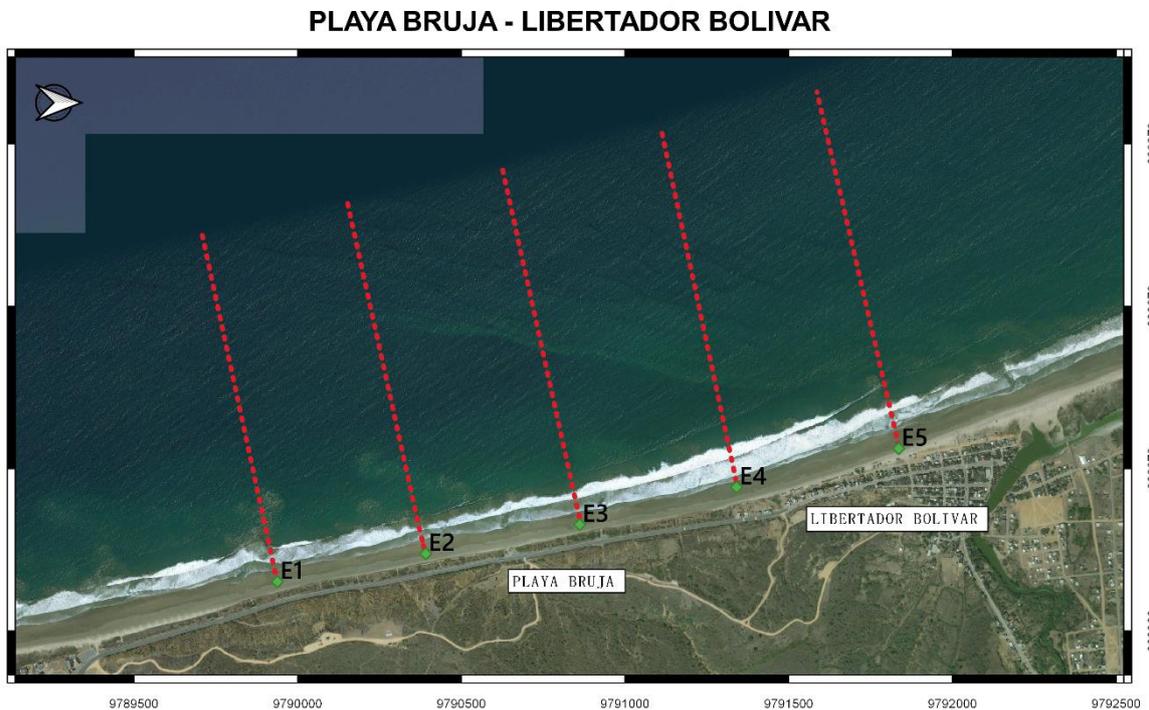


Figura 2.9 Perfiles transversales en las 5 estaciones.

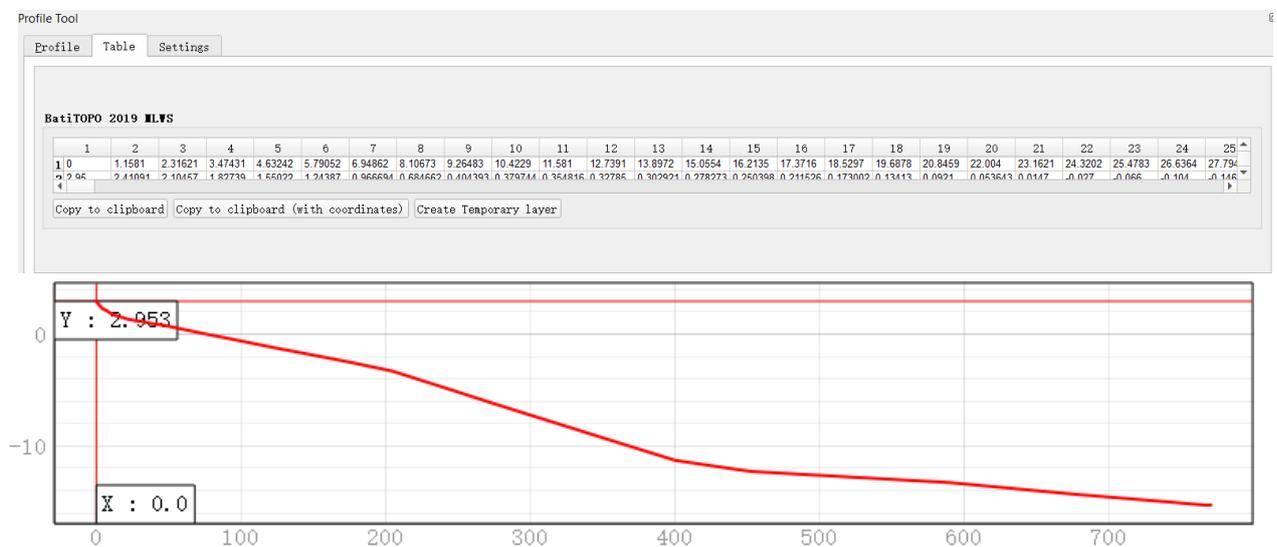


Figura 2.10 Perfil transversal de la playa con su respectiva tabla de valores.

2.4.1.2. Línea de Costa

La línea de costa que se ingresa en el modelo corresponde al nivel 0 m del archivo batitopo obtenido en la sección anterior, es así como se crea un archivo vectorial correspondiente a la curva de nivel de 0 m, como los datos que se ingresan en el modelo numérico son distancias desde la misma línea base creada para las bermas, se utiliza el script mencionado en la sección 2.3 y puede verse en el Apéndice II al igual que el mapa del archivo batitopo en el Apéndice III.

2.4.1.3. Oleaje

Oleaje a los 15 metros de profundidad

El oleaje a una profundidad de 15 metros fue obtenido mediante una transformación realizada con el módulo MIKE 21 Espectral Wave para el periodo 2006 – 2013, para lo cual se siguieron los pasos especificados en el manual del usuario de MIKE21 SW (DHI, 2012), una breve explicación de estos pasos están descritos a continuación:

Datos de entrada:

1. Ejecutamos el software MIKE
2. En la barra de herramientas escogemos la opción file/MIKE Zero/Bathymetries
3. Indicamos la proyección de nuestro proyecto e indicamos las coordenadas de nuestra área de estudio que corresponde a la esquina inferior izquierda de la carta náutica IOA 105.
4. Una vez creada el área de estudio damos clic en Work Area/ background management/Import y exportamos nuestra carta náutica, escogemos nuevamente work área/show background images.
5. Digitalizamos el borde del continente o la zona de tierra utilizando le herramienta Add Land
6. Digitalizamos la batimetría utilizando la herramienta Add Points.
7. Una vez digitalizada la batimetría exportamos mediante work área, posteriormente procedemos a abrir el módulo mesh generation siguiendo el paso 1.

8. Ingresamos la batimetría generada anteriormente y procedemos a crear los bordes del área de estudio.
9. Posteriormente generamos la malla desde la barra de herramientas con la opción mesh/generation, considerando las limitaciones de la licencia el máximo de elementos finitos que nos permite generar es de 50000.
10. Realizamos la interpolación mesh/interpolation

Transformación:

1. Escogemos la opción file/new/MIKE21/Spectral Waves
2. En la opción de **Dominio** debemos ingresar la batimetría generada con anterioridad
3. **Tiempo** corresponde el periodo de la simulación, "*time step*" corresponde al intervalo de tiempo en segundos, "*No. of time steps*" es cuantas veces se va a repetir ese intervalo de tiempo.
4. Ingresamos cada uno de los parámetros presentados en "*spectral wave model*"
5. En la opción de **condiciones iniciales** el tipo de formulación corresponde a las propuestas por el Shore Protection Manual para aguas profundas.
6. En **Outputs** escogemos la opción de new output/go to
7. Aquí procedemos a detallar el punto o coordenada que se desea el oleaje, los datos de salida necesarios.
8. Guardamos el proyecto y damos clic en **Run**

Oleaje en la rompiente

El oleaje en la zona de rompiente fue obtenido mediante el módulo LITDRIFT, transformando el oleaje desde los 15 metros hasta la zona de rompiente, basado en el modelo de Battjes and Jansen que considera un oleaje de tipo irregular que se basa en una distribución del tipo Rayleigh para la descripción estadística de las alturas de las olas (DHI, 2011).

2.4.1.4. Parámetros de sedimentos

Diámetro medio D_{50} y Desviación estándar de los sedimentos: Se calculó el D_{50} y la desviación Estándar utilizando la ecuación $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$ descrita por (Manco Jaraba, Rojas Martínez, Rudas Muñoz, & Moscote Daza, 2018) para cada estación en la parte alta, media y baja (previamente descritas) y se promediaron los valores de 4 fechas de muestreo, para las estaciones 1,2,3 y 2 fechas para las estaciones 4 y 5.

Densidad: La densidad fue tomada como 2650 kg/m³ valor característico para arenas con dominancia de cuarzo (CERC, 2002), tomando como referencia el estudio realizado por (De la Cuadra & Zavala, 2019) en el cual se obtiene predominancia de cuarzo en las playas adyacentes a Libertador Bolívar (Valdivia y San Pedro).

Velocidad de caída del sedimento: En LITDRIFT se puede ingresar la velocidad de caída del grano que puede ser calculada de dos formas;

- a. Según el diámetro medio y de la velocidad de caída en el perfil, con esta opción el usuario determina la velocidad de caída a través del nomograma adjunto (Ver Figura 2.11) en el que se incluyen los efectos de temperatura y diámetro medio del sedimento, para sedimentos con densidad relativa igual a 2.65.
- b. Por medio del programa el cual determina la velocidad mediante una temperatura especificada por el usuario y el valor del geometrical spreading de cada punto en el perfil.

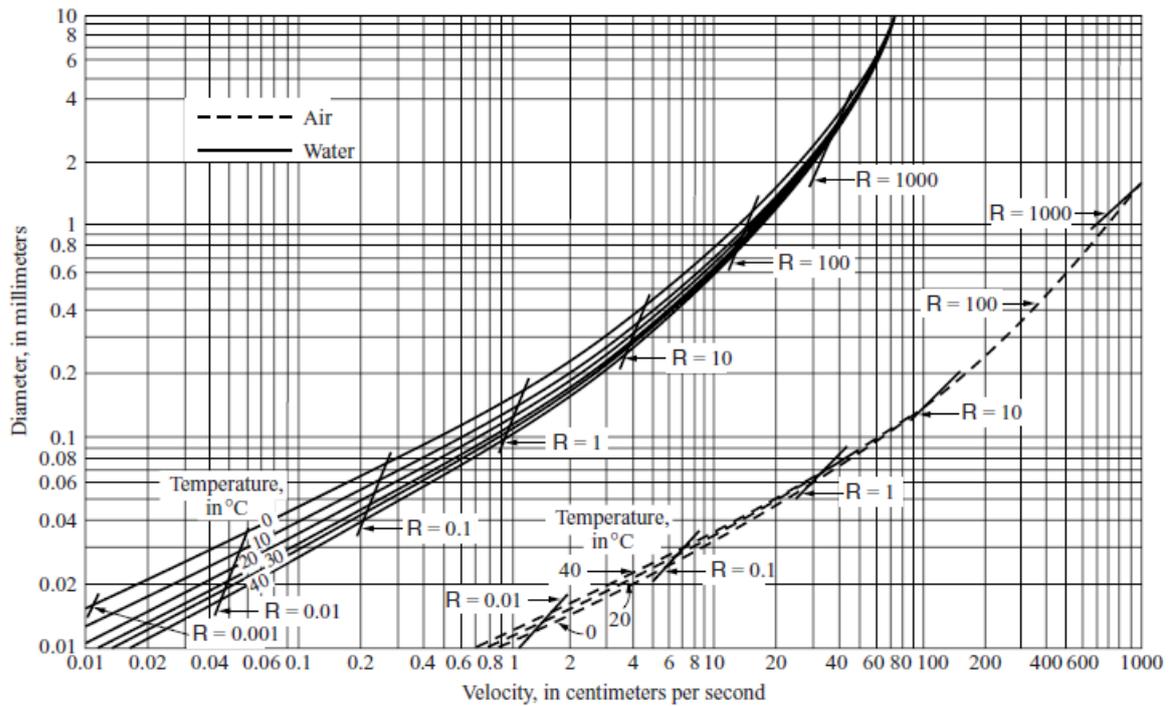


Figura 2.11 Velocidad de caída de esferas de cuarzo en aire y agua (Vanoni, 2006)

Coefficiente de rugosidad: La rugosidad de fondo es el parámetro básico de calibración en LITDRIFT (DHI, 2011), el transporte litoral decrece cuando se incrementa la rugosidad de fondo, Noujas, Kankara, & Rasheed (2018) se utilizó un valor igual a 20 veces el D_{50} , por ser el valor que más se ajustaba a un valor realista del transporte litoral. Hendriyono et al (2015) asumieron una rugosidad de 0.004 m para todo el perfil.

Ari Guner, Sahin, Yuksel, & Cevik (2017) hallaron valores entre 0.00028 m y 0.013 m, obtenidos en base a las ecuaciones recomendadas por el modelo, igual a $2.5D_{50}$ para un lecho plano y $2.5D_{50}+k_R$ para un lecho cubierto con ripples, donde k_R es la rugosidad relacionada con los ripples. Para nuestra calibración se ajustó un coeficiente igual a 0.04 m.

2.4.2. Calibración y validación

2.4.2.1. Calibración del oleaje

La calibración del oleaje se realizó comparando los datos del olígrafo instalado por ESPOL durante el periodo de enero y febrero del 2019 con los datos obtenidos del Hindcast de WAVEWATCH III. Considerando que la escala temporal es diferente entre los datos comparados el criterio utilizado para la validación es que la climatología de olas del mes de enero y febrero obtenida del periodo 2006 - 2014 tenga la mayor correlación posible con los datos generados por el modelo, es así como la calibración se la realizó bajo un parámetro físico que condiciona la propagación del oleaje, “Directional Standard Deviation (DSD)”, que de acuerdo con Ewans (2008) los valores para un mar de fondo están entre 16.8° y 20.8°. Bajo este contexto el manual del usuario de MIKE 21 SW define varios valores de la dirección de la desviación estándar de los cuales se toman; 16.52, 17.24, 18.08 y 19.05, siendo el mejor parámetro el de 16.52.

2.4.2.2. Calibración LITDRIFT

Los parámetros ingresados al modelo LITDRIFT fueron: el oleaje llevado a 15 m, parámetros de sedimentos y los perfiles transversales generados para las estaciones 2, 3, 4 y 5, no se utilizó la estación 1 dado que no contó la topografía de ese sector. Como estimación principal para calibrar el modelo LITDRIFT se utilizaron los valores de transporte neto medidos por estación y la altura de oleaje en la rompiente, utilizando como principales parámetros de calibración la rugosidad de fondo, y el directional spreading del oleaje, tomándose como 0.85 que está dentro del rango de oleaje tipo swell (Ewans, 2008), posteriormente se corría el modelo LITLINE evaluando si el cambio de línea de costa presentaba una concordancia con la variación estimada mediante imágenes aéreas y de no ser así, se procedía un retorno en la calibración del modelo LITDRIFT.

2.4.2.3. Calibración LITLINE

El principal parámetro de calibración en LITLINE es la altura activa, que representa la diferencia de altura entre el nivel cero con respecto al MLWS y el frente de berma. Realizándose corridas para diferentes valores y validando los resultados con el cambio previamente estimado, de la variación de la duna para el término 2006-2013, se obtuvo el mejor resultado para una altura activa igual a 2.3 m. Una vez calibrado el modelo en base al registro total de oleaje cada 3 horas, se validó con la climatología obtenida, de esta forma se evitó un posible sesgo producto de las condiciones medias y se consigue una mayor confiabilidad en la corrida de la tendencia futura.

En la Figura 2.12 se observan diferentes resultados del cambio de línea de costa para algunas alturas activas, este cambio fue comparada con la polinómica de cuarto grado de la variación de la berma, la cual se representa de mejor manera que una tendencia lineal.

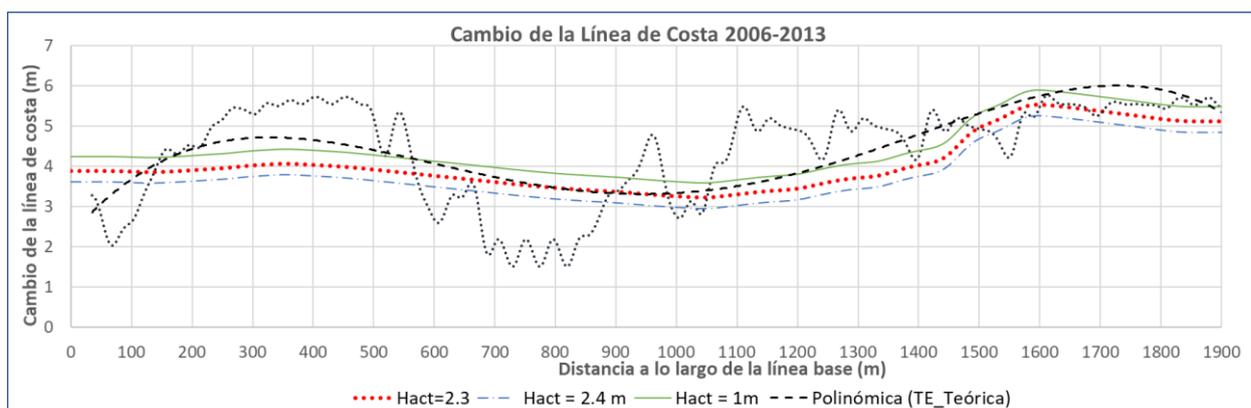


Figura 2.12 Calibración LITLINE para diferentes alturas activas (Autores, 2019)

2.4.2.4. Indicadores Estadísticos

Para poder reflejar el nivel de precisión de los datos generados por el modelo, el estudio hidrodinámico de las actuaciones de restauración de IH Cantabria (2017) y la tesis de Espinoza (2018) presentan ciertos descriptores estadísticos que permite evaluar la precisión entre los datos generados con los observados, de los cuales se considera; el coeficiente de correlación y el error cuadrático medio.

- **Coefficiente de Correlación.** - este descriptor estadístico explica la variación de los datos mediante una regresión lineal, donde el valor del coeficiente se encuentra en el rango de [0,1]. Si el valor obtenido es cercano a 1 existe una correlación entre los datos observados y medidos si el valor es cercano a 0 no existe correlación.
- **Error cuadrático medio (RMSE).** - es la desviación absoluta entre los valores modelados y observados, los valores de RMSE están comprendidos entre [0,1] y se considera que mientras el valor del RMSE sea cercano a 1 existe mayor error por lo tanto los valores cercanos a 0 muestran una mejor modelación.

2.5. Amenaza por erosión costera

2.5.1. Indicadores de amenaza

Con el fin de evaluar los indicadores de amenaza que definen las variables, magnitud (M), ocurrencia (O) y susceptibilidad (S) expuestos en la Tabla 1.1, se buscó toda la información disponible del área de estudio, los datos obtenidos in situ y los resultados de la modelación de la línea de costa de este proyecto. Para la revisión bibliográfica se tomaron aquellos documentos que realizan levantamientos de datos oceanográficos por medio de la metodología de Observación del Ambiente Litoral, y se utilizaron como referencia los mismos documentos resumidos en la Tabla 2.1. Los indicadores para este trabajo se resumen en la Tabla 2.5.

2.5.2. Cálculo de la amenaza

Una vez definidos los indicadores se procede a calcular cada una de las variables que conforma la amenaza para esto Rangel & Posada (2013) manifiestan que para no subestimar los indicadores más relevantes y sobreestimar los de menos influencia se debe realizar una ponderación basada en el método de Gornitz, Daniels, White, & Birdwell (1994), donde se utiliza un factor de corrección (f_n) entre 0.6 y 1.

Donde:

- $f_n = 1$ es determinante.
- $f_n = 0.8$ es indirecta.
- $f_n = 0.6$ es secundaria.

Tabla 2.5 Clasificación de los indicadores que conforman la Amenaza por erosión costera basado en la clasificación de (Rangel & Posada, 2013) y (Ramieri et al., 2011)

Rangos						
Variable	Muy Bajo(1)	Bajo(2)	Medio(3)	Alto(4)	Muy Alto(5)	Factor de corrección (f_n)
Geomorfología	Acantilados altos de rocas ígneas	Acantilados medios rocas metamórficas	Acantilados bajos. Plataformas de abrasión Terrazas marinas Colinas y montañas	Llanuras aluviales Lagunas costeras	Playa Campos de Dunas Manglares Playones	1
Variación línea de costa	Acreción	Equilibrio	Erosión baja (menos de 0,5 m/año)	Erosión media (0.5-1 m/año)	Erosión alta (más de 1 m/año)	1
Ancho de Playa	Más de 50 m	Entre 50-25 m	Entre 25-10 m	< 10 m	Sin playa	1
Pendiente de Playa	> 8°	Entre 6° y 8°	Entre 4° y 6°	Entre 2° y 4°	Entre 0° y 2°	0.8
Grado de exposición del oleaje	Con obstáculos	x	Medianamente resguardada	x	Sin obstáculos	0.8
Estado morfodinámico	Reflectivo	x	Intermedio	x	Disipativo	0.8

Altura de Ola en la rompiente	Entre 0 y 0.5m	x	Entre 0.5 y 1m	x	Mayor a 1 m	0.6
Rango mareal	Micromareal	x	Mesomareal	x	Macromareal	0.6

Aunque una de las limitantes de este trabajo es la escasez de datos, los indicadores considerados determinantes permitirán tener una visión de los sectores más amenazados. Bajo este contexto el cálculo de cada variable que conforma la amenaza es calculada con las siguientes ecuaciones:

$$M = \sum f_n M_i$$

$$O = \sum f_n O_i$$

$$S = \sum f_n S_i$$

Ecuación 2.5. Variables de la amenaza

Una vez obtenidas dichas variables se realiza el cálculo de la amenaza utilizando la Ecuación 2.5 para posteriormente normalizar los resultados (ver Ecuación 2.6) con respecto a los valores máximos y mínimos esto con el objetivo de facilitar la interpretación de los datos en un software GIS.

$$\frac{x - x_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Ecuación 2.6. Normalización

2.5.3. Representación espacial de la amenaza

El mapa de la representación espacial de la amenaza se procesa en el software QGIS, en donde se agregan todos los parámetros antes calculados en la tabla de atributos, se utilizan los operadores “unión” y “unir atributos por localización”, para la representación de los niveles de amenaza se utiliza el estilo graduado y la clasificación rupturas naturales de Jenks dado que ésta, genera intervalos con máximas diferencias entre los

rangos mejorando la representación gráfica de la amenaza, para posteriormente clasificarlo en 3 niveles: Bajo, Medio y Alto

Con los resultados obtenidos por el modelo y análisis de las imágenes satelitales se puede determinar las zonas de colapso inminente (ZCI), la cual está definida como la zona litoral donde la anchura de la playa es menor o igual a 5 veces la tasa media anual de erosión.

CAPÍTULO 3

3 Resultados

Como se describió en secciones anteriores la zona de estudio abarca el sector conocido como Playa Bruja y el sector sur de la comuna Libertador Bolívar, se ha determinado que la orientación de la línea de costa es de 341° con respecto al Norte con un oleaje incidente del Sur Oeste con direcciones que oscilan entre los 230° y 250° , un periodo de 14 s típico del oleaje en costas ecuatorianas, posteriores análisis descritos en esta sección muestra que el estado morfodinámico dominante en el área de estudio es de tipo intermedia y presenta un oleaje entre plunging y spilling, la tasa de erosión media, tanto para Playa Bruja como Libertador Bolívar es de 0.5 m/año.

3.1. Mediciones litorales

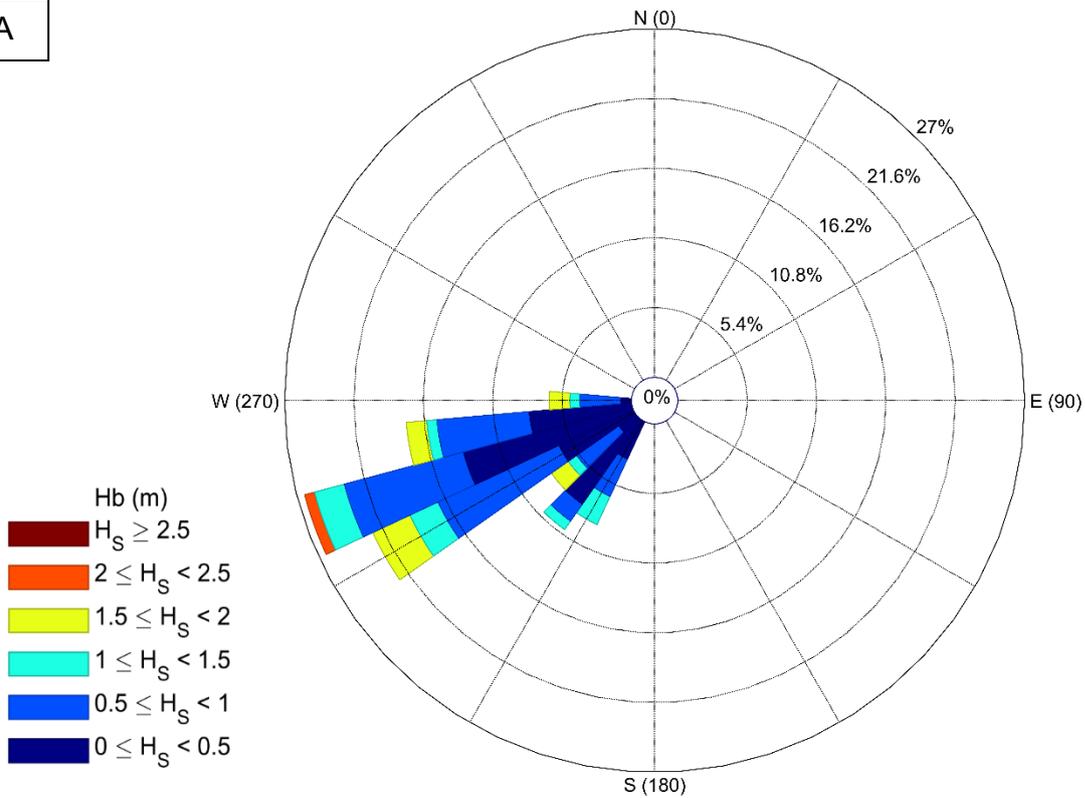
3.1.1. Oleaje

De las observaciones litorales se obtuvo una altura promedio H_b de 0.7 m, 1 m para cuadratura y 0.5 m para sicigia tal como se muestra en la Tabla 3.1. El rango general se encuentra entre 0.2 m a 1m proveniente del suroeste (ver Figura 3.1 A), con un período predominante de 13 s a 16 s (ver Figura 3.1 B) . correspondiente a un periodo típico de las costas ecuatorianas, mostrándose un oleaje representativo de mar de leva procedente del suroeste (Chen, Bertrand, Ezraty, & Vandemark, 2017).

Tabla 3.1 Altura de las olas observadas en cuadratura y sicigia y el promedio de altura para cada estación.

Oleaje (m)			
Estación	Cuadratura	Sicigia	Promedio
E1	0.5	0.3	0.4
E2	1.6	0.9	1.2
E3	1.2	0.3	0.8
E4	1.1	0.4	0.8
E5	0.8	0.5	0.7
Promedio Total	1.0	0.5	0.7

A



B

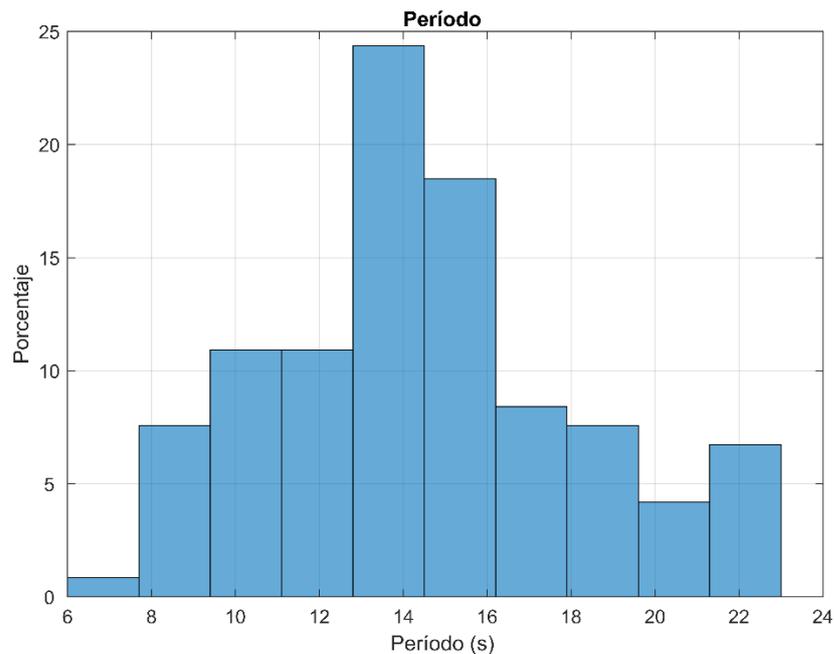


Figura 3.1 Oleaje in situ observado (Autores, 2019)

Figura 3.-1A. Altura y dirección de oleaje observado Figura 3.-1B. Período observado

Las alturas de ola para el periodo de cuadratura oscilan entre 0.3 y 2 m, las estaciones céntricas (E2, E3, E4) tienen las alturas de ola de mayor tamaño siendo la estación 2 la que presenta un oleaje más alto con una media de 1.57m, la E1 y E5 tienen una altura de ola promedio de 0.5 y 0.8 m respectivamente.

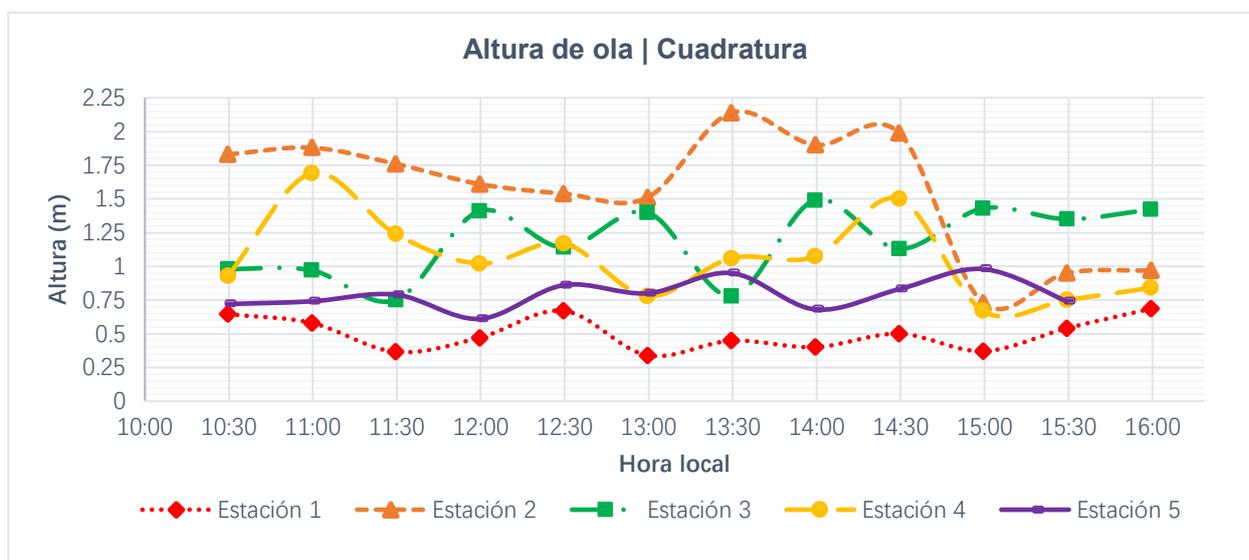


Figura 3.2 Altura de olas observadas en cuadratura para cada estación (Autores, 2019)

Con respecto a las alturas de olas registradas durante la fase de sicigia se obtuvo un promedio de ola de 0.51 m, con rangos entre 0.3 y 0.94 m siendo la estación 2 la que presenta mayor altura similar a la fase de sicigia y coincide con el estudio de Cansing & Mena (2018), tanto de la Figura 3.2 y la Figura 3.3 y se aprecia que el oleaje disminuye durante la etapa de flujo.

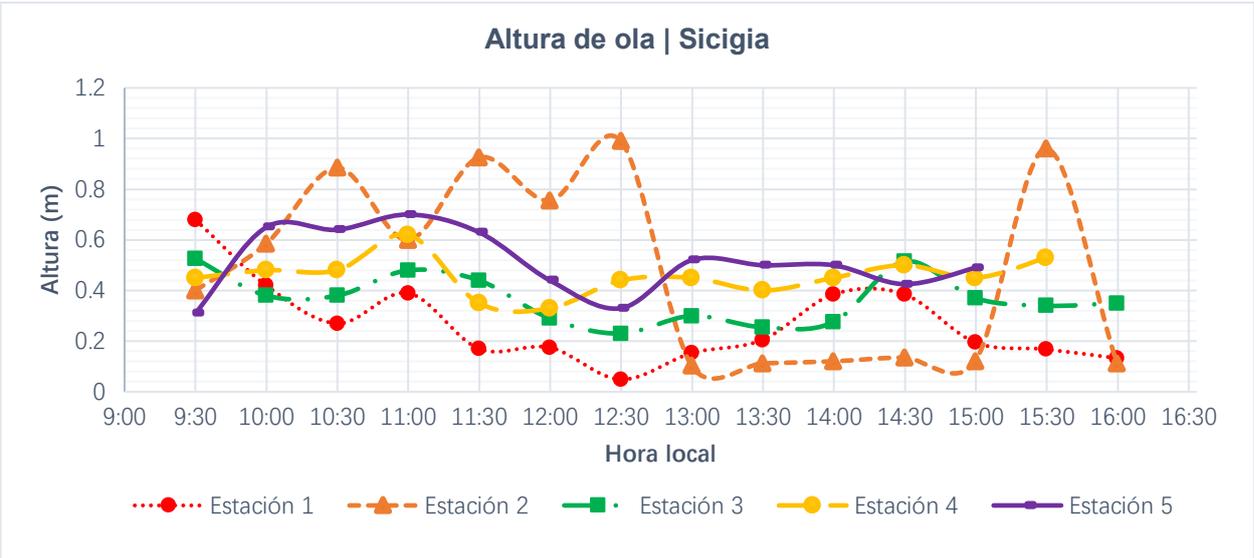


Figura 3.3 Altura de olas observadas en sicigia para cada estación (Autores, 2019)

En la Tabla 3.2 se tiene el promedio de los periodos para cada estación, teniendo una media total equivalente a 14.5 s, en la Figura 3.4 se aprecia que los periodos no varían considerablemente entre las estaciones a excepción de la estación 2 que presenta una diferencia de 8 segundos entre la fase de sicigia y cuadratura.

Tabla 3.2 Promedio de periodo por estación (Autores, 2019)

Periodo (s)			
Estación	Cuadratura	Sicigia	Promedio
E1	15.2	15.5	15.3
E2	18.5	10.6	14.6
E3	12.2	11.6	11.9
E4	14.9	13.9	14.4
E5	15.3	17.6	16.5
Promedio Total	15.2	13.9	14.5

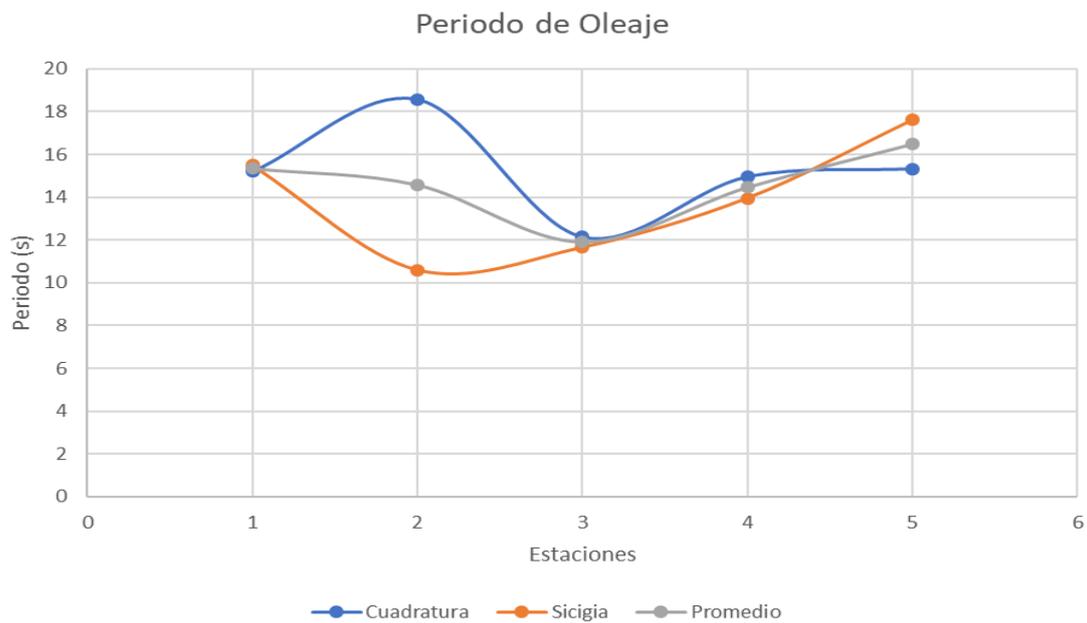


Figura 3.4 Promedio del periodo por estación (Autores,2019)

Dirección del oleaje y Orientación Línea de Playa

En la Tabla 3.3 se puede encontrar los valores promedios de la dirección del oleaje y la orientación de la línea de costa que se obtuvo durante las mediciones litorales, se puede observar que las direcciones tanto del oleaje como de la orientación de la playa tienen

variaciones relativamente pequeñas entre cada estación, es así que la dirección del oleaje promedio es de 243° y la orientación de la costa es de 341°.

Tabla 3.3 Promedio de dirección de oleaje y línea de playa por estación (Autores, 2019)

Estación	Dirección del Oleaje (°)	Línea de Playa (°)
E1	234	344
E2	245	345
E3	238	343
E4	248	340
E5	249	334
Promedio	244	341

3.2. Corriente litoral

Tanto para la fase de cuadratura como de sicigia la dirección dominante de la corriente litoral en las 5 estaciones es hacia el norte (derecha de frente al mar) sin embargo las estaciones 4 y 5 presentan en menor medida direcciones hacia el sur durante la subida de la marea (flujo) la velocidad promedio durante cuadratura es de 0.26 m/s mientras que en sicigia es de 0.21 m/s.ver Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Corriente Litoral (m/s) por estación (Autores, 2019)

Corriente Litoral (m/s)			
Estación	Cuadratura	Sicigia	Promedio
E1	0.12	0.22	0.17
E2	0.41	0.10	0.26
E3	0.28	0.35	0.31
E4	0.33	0.22	0.27
E5	0.16	0.12	0.14
Total	0.26	0.21	0.23

En la Figura 3.5 se aprecian las velocidades en cada una de las estaciones, la estación dos durante la época de cuadratura presenta las mayores velocidades con 0.41 m/s en concordancia con la altura de ola que presente esta estación durante el mismo periodo de medición.

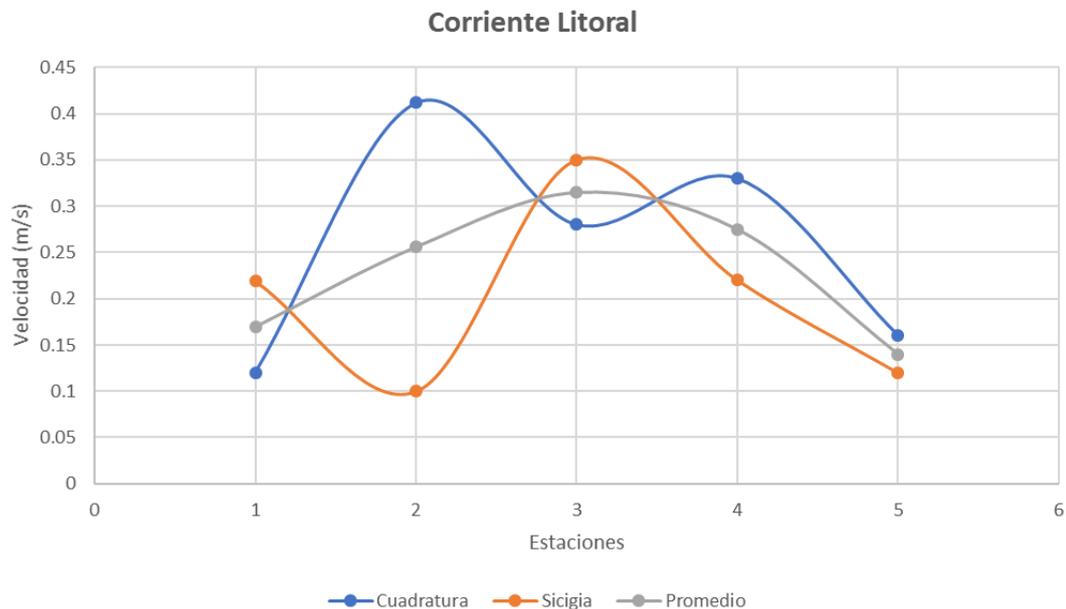


Figura 3.5 Velocidad litoral promedio por estación (Autores, 2019)

3.3. Perfiles de playa

En lo que respecta a los perfiles de playa en la Tabla 3.5 podemos observar todos los valores obtenidos para cada una de las estaciones, de esta manera se puede clasificar según lo propuesto por (US Army Department of Training and Doctrine Command, 1993) y descrito en la Figura 3.6.

Empinada	(Más de 1:15).
Moderado	(1:15 a 1:30)
Suave	(1:30 a 1:60)
Muy Suave	(1:60 a 1: 120)
Plana	(menos de 1: 120)

Figura 3.6 Clasificación del tipo de playa según su pendiente (FAO, 2009)

Las estaciones 1, 2 y 3 presentan datos de la pendiente obtenidos de la tesis de Cansing & Mena (2018) las cuales muestran, según la clasificación descrita anteriormente, varían entre moderada a suave durante cuadratura y sicigia, en una comparación anual se puede ver la misma tendencia de cambio en los perfiles e independientemente de si es sicigia o cuadratura la pendiente para 2019 es de tipo suave en el sector de Playa Bruja, por otro lado la estación 5 correspondiente a la zona sur de la comuna Libertador Bolívar tiene una pendiente catalogada como moderada con valores que oscilan entre 1/26 y 1/20.

Tabla 3.5. Pendientes de perfiles en la fase de cuadratura y sicigia según la clasificación de (US Army Department of Training and Doctrine Command, 1993)

ESTACIÓN	PARÁMETRO	CUADRATURA		SICIGIA		Promedio
		7-jul-18	8-jun-19	16-jun-18	15-jun-19	
E1	Pendiente	1/23	1/39	1/36	1/34	1/31
	Beta (β)	2.48	1.47	1.59	1.67	1.80
E2	Pendiente	1/25	1/48	1/38	1/30	1/33
	Beta (β)	2.29	1.18	1.50	1.89	1.72
E3	Pendiente	1/19	1/36	1/37	1/23	1/27
	Beta (β)	3.01	1.59	1.54	2.52	2.17
E4	Pendiente		1/36			1/36
	Beta (β)		1.59			1.59
E5	Pendiente		1/26		1/21	1/23
	Beta (β)		2.18		2.75	2.48

En la Figura 3.7 y Figura 3.8 se encuentran representados los perfiles de cada estación tanto para las fases de cuadratura y sicigia, se puede apreciar que los perfiles no varían considerablemente entre estaciones manteniendo un tipo de pendiente suave a excepción de la estación 5 que muestra una mayor pendiente los primeros 20 metros clasificando a este perfil moderado, la predominancia de un tipo de playa suave ocasiona que las cotas de inundación y con el aumento de la marea el mar llegue hasta el pie del acantilado de Playa Bruja.

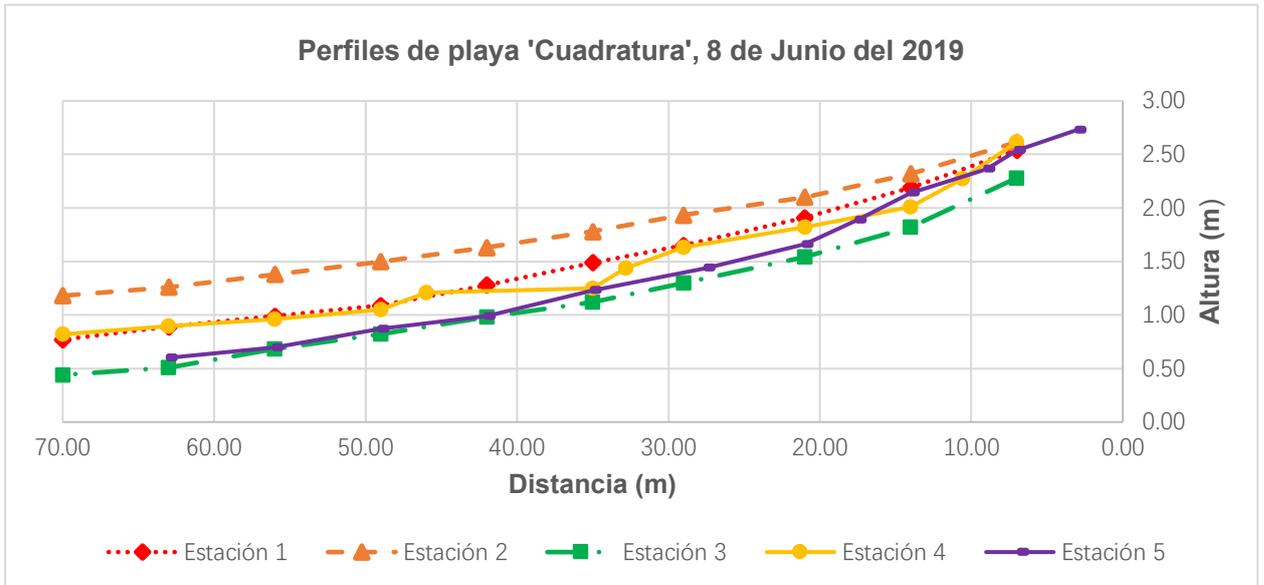


Figura 3.7 Perfiles de playa en cuadratura, 8/06/2019 (Autores, 2019)



Figura 3.8 Perfiles de playa en sicigia, 8/06/2019 (Autores, 2019)

De los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 3.5 se realiza un mapa de zonificación del tipo de pendiente que rige el área de estudio, siendo las inmediaciones de las estaciones 1, 2 y 4 del tipo de pendiente suave correspondiente al 65% del área de estudio, mientras que las estaciones 3 y 5 son de tipo moderada con 35%.

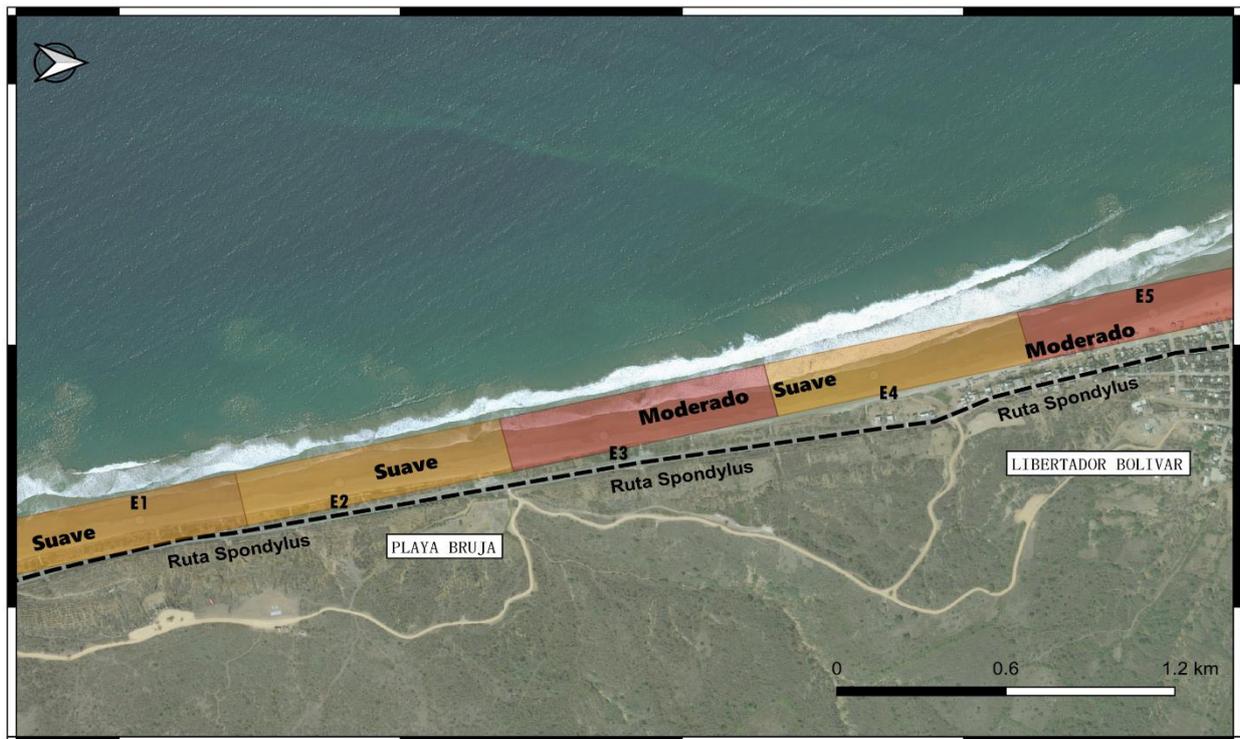


Figura 3.9 Pendiente promedio de perfiles de playa (Autores, 2019)

3.4. Tipo de rotura de la ola

De acuerdo a las observaciones realizadas durante las salidas de campo, el tipo de ola registrado de manera visual en las 5 estaciones es de tipo variable entre spilling y plunging, por otro lado también se obtuvo el tipo de rotura utilizando el parámetro de Iribarren definido por la ecuación 3.1, donde un factor menor a 0.5 corresponde a un oleaje del tipo spilling, entre 0.5 y 3 de tipo plunging, collapsing de 3 a 3.5 y surging mayor a 3.5, los resultados se muestran en la Tabla 3.6 y Figura 3.10.

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L}}}$$

Ecuación 3.1 Parámetro de Iribarren

Donde:

H_b es la altura de ola en la rompiente

L es la longitud de onda del oleaje en aguas profundas definido por $\frac{gT^2}{2\pi}$

β es la pendiente del fondo

Tabla 3.6 Clasificación del tipo de ola en Libertador Bolívar según el parámetro de Iribarren, (Autores, 2019).

Estación	Pendiente	H_b (m)	L	ξ	Tipo de ola Ibarren	Tipo de ola observada
E1	1.80	0.46	328	0.90	Plunging	Spilling - Plunging
E2	1.72	1.25	328	0.48	Spilling	Spilling - Plunging
E3	2.16	0.77	328	0.77	Plunging	Spilling - Plunging
E4	1.59	0.76	328	0.57	Plunging	Spilling - Plunging
E5	2.47	0.66	328	0.96	Plunging	Spilling - Plunging

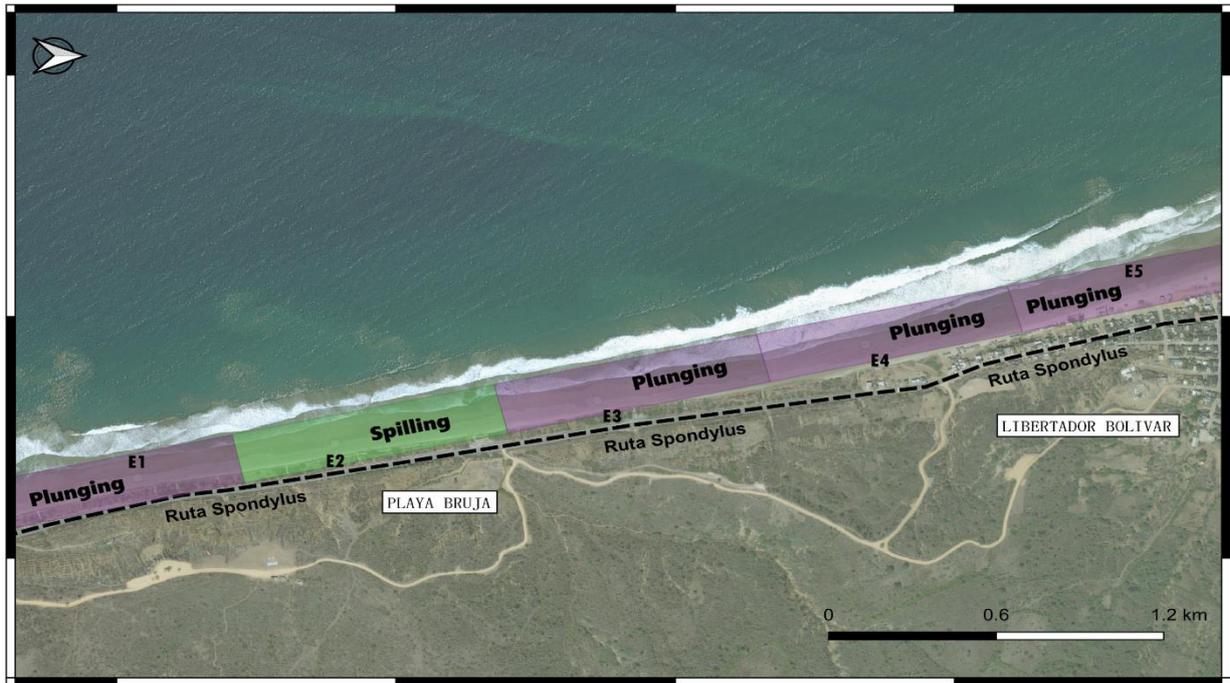


Figura 3.10 Tipo de ola rompiente de acuerdo al parámetro de Ibarren (Autores, 2019)

3.5. Clasificación granulométrica de la zona de estudio

Del análisis granulométrico se determinó los valores del diámetro D_{10} , D_{30} , y D_{60} para obtener el coeficiente de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) en el área de estudio, realizando una comparación de los valores se determinó que no existe mucha variabilidad en cada una de las estaciones para lo cual se procedió a obtener un C_u promedio igual a 2 y un C_c de 0.9, posteriormente se clasificó el tipo de sedimento según el SUCS obteniendo que el suelo del área de estudio corresponde a arenas finas y un tipo de arena mal graduada (SP) sin embargo en las salidas de campo se observaron pequeñas cantidades de guijarros al norte de Libertador Bolívar.

En la Figura 3.11 podemos observar la distribución del D_{50} promedio en cada una de las estaciones así como su diferencia entre los distintos sitios de muestreo (Alta, Media y Baja) encontrándose que el D_{50} varía entre 0.16 mm y 0.31 mm, siendo generalmente las muestras tomadas en marea media las que presentan el menor diámetro.

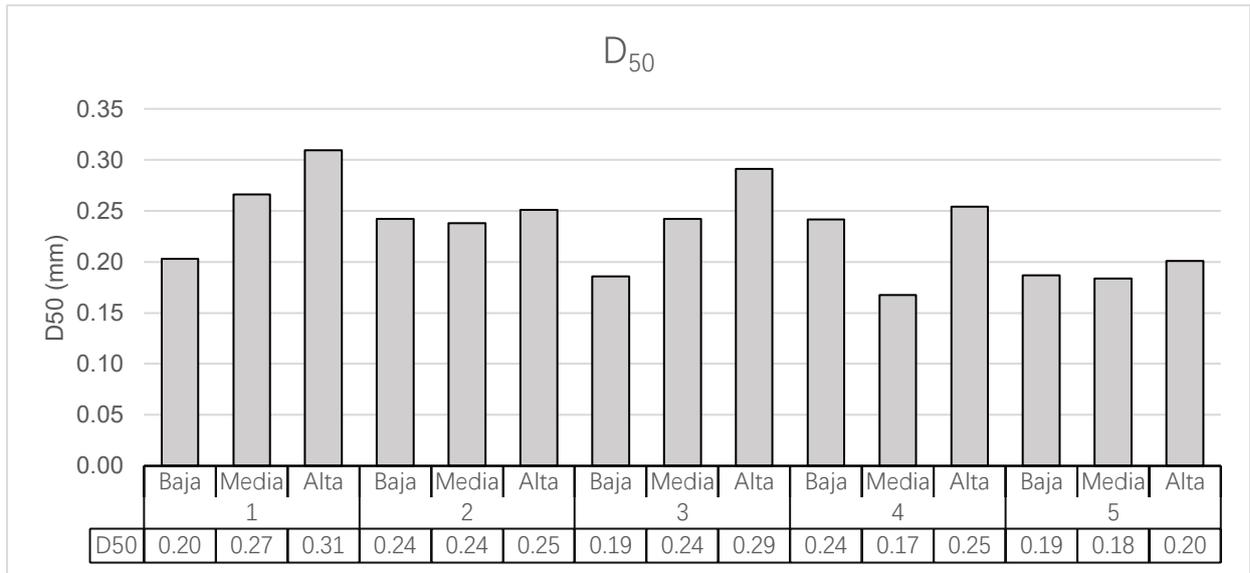


Figura 3.11 Distribución del D₅₀ promedio por perfil de playa (Autores, 2019)

Dado que el fin de este proyecto es realizar el modelamiento de la línea de costa y uno de los datos de entrada es el D₅₀ se obtiene un valor promedio para cada una de las estaciones el cual puede observarse en la Figura 3.12.

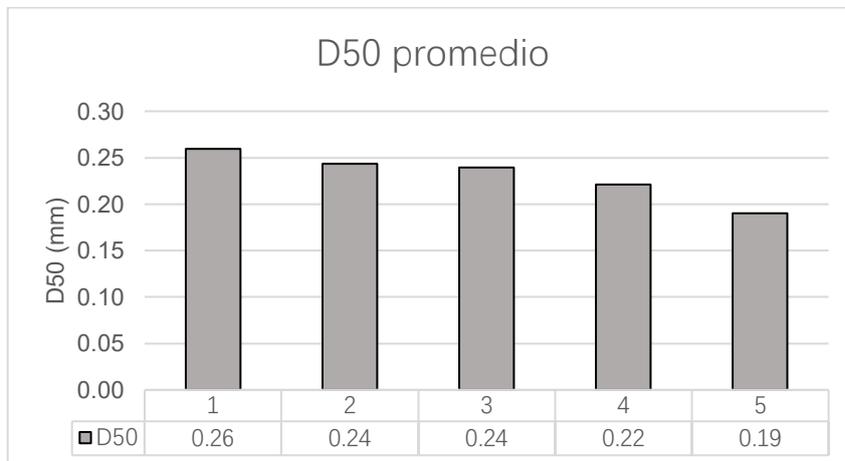


Figura 3.12 D₅₀ promedio por perfil de playa (Autores, 2019)

3.6. Estado Morfodinámico de la playa

Del nomograma sedimentológico presentado por Vanoni (2006) se obtiene que para el D_{50} promedio de la zona de estudio es de 0.033 m/s, de esta manera con el parámetro de Dean se obtiene el estado morfodinámico de la playa tal como se describió en la sección 2.1.6.4, es así que las estaciones céntricas (2, 3 y 4) presentan Playas intermedias mientras que la estación 1 y 2 son de tipo reflectivas tal como se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Estado morfodinámico de la playa según el Parámetro de Dean (Autores, 2019)

Estación	H_b (m)	W (m/s)	T (s)	DEAN Ω	Estado Morfodinámico
E1	0.46	0.033	18.6	0.75	Reflectiva
E2	1.25	0.033	14.5	2.59	Intermedia
E3	0.77	0.033	11.9	1.96	Intermedia
E4	0.76	0.033	14.4	1.59	Intermedia
E5	0.66	0.033	16.5	1.21	Reflectiva

Por otro lado, con las características litorales obtenidas para este proyecto y descritas en este capítulo, el área de estudio puede ser catalogado como una playa intermedia donde el diámetro del grano no supera los 0.26 mm con variaciones de oleaje entre Spilling y Plunging con una pendiente de playa que no supera los 4 grados, siendo catalogada como una playa de pendiente suave sin embargo de los estudios anteriores (Mena & Cansing, 2018) (Sanchez, 2015) a este proyecto se conoce que el sector sur de Playa Bruja presenta fuertes resacas lo que podría llevar a catalogar la estación 1 como una playa intermedia con ligeras tendencias reflectivas lo que coincide con los resultados del parámetro de Dean.

3.7. Transporte litoral in situ

Tal como se explicó en la sección 2.2 para el presente estudio se decidió realizar una estimación del transporte litoral tomando información de los datos litorales obtenidos durante las salidas de campo, incluyendo además datos extraídos de los principales estudios realizados en esta playa (datos adjuntos en el Apéndice VI), los resultados

obtenidos arrojan que durante el período de cuadratura el transporte litoral se encuentra en un rango de 225 a 1514 m³/día siendo la estación 4 la que presente el mayor transporte litoral. Sin embargo, debe considerarse que el resultado de dicha estación corresponde solo a la salida realizada el 8 de junio que presentó condiciones de aguaje con alturas de ola mayores al promedio de una fase de cuadratura, por lo cual éste valor puede estar sobreestimado aunque puede ser utilizado como un indicador de los gradientes de transporte que se genera en la zona de estudio, para la fase de sicigia el transporte litoral está en un rango de 124 a 598 m³/día, independientemente de la fase de marea se puede observar en la Figura 3.13 que el transporte litoral es mayor en la zona sur de Playa Bruja estos gradientes a lo largo de la zona de estudio condición la forma de la playa donde el retroceso es evidente en la zona norte (estación 4 y 5) y puede ser corroborado por las ortofotos realizadas durante el levantamiento topográfico.

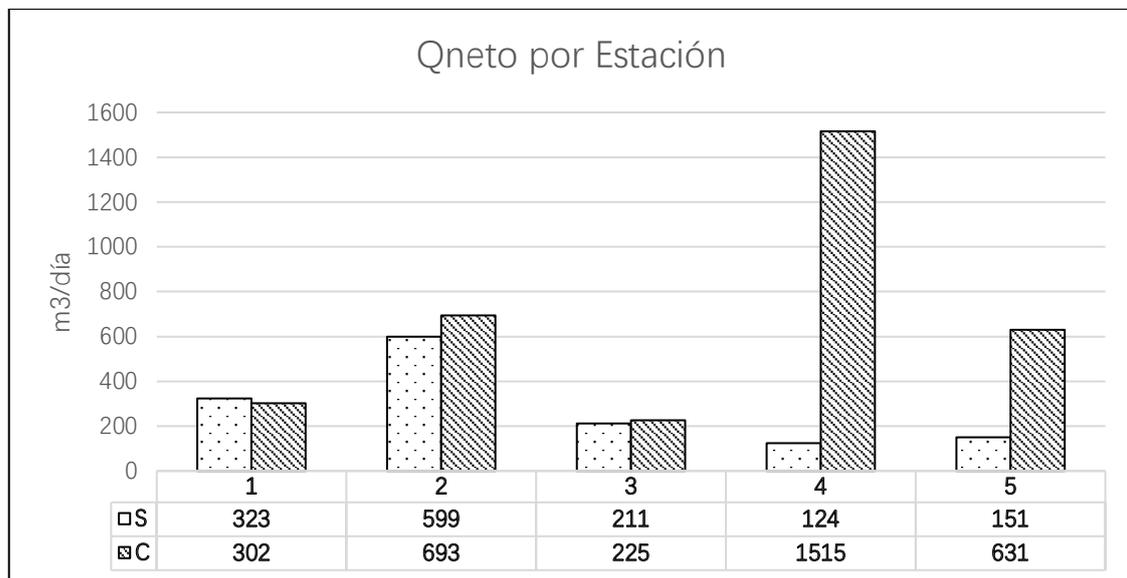


Figura 3.13 Transporte litoral promedio in situ para cada perfil en cuadratura y sicigia (Autores, 2019)

3.8. Cuantificación de cambio de línea de costa por fotogrametría

Del procesamiento de las imágenes proporcionadas por el IGM (2000 y 2013) y obtenidas de la plataforma de Google Earth(2006) se determinó la dinámica de la línea de costa tomando como referencia la evolución de la berma durante un periodo de 13 años en

la Figura 3.14 y Figura 3.15 se puede observar una ampliación del sector norte y sur del área de estudio respectivamente donde el mapa base usado para dichas imágenes corresponde a la del año 2000, en las imágenes se puede observar que el sector correspondiente a la E5 presenta un aumento de la berma en el periodo 2000 – 2006 sin embargo cabe mencionar que este proceso de acreción es debido a una expansión antropogénica de la comuna Libertador Bolívar dificultando así el criterio de vectorización de la berma en este sector, como referencia Sanchez (2015) menciona que para el año 2006 las viviendas, covachas fueron construidas en zonas inundables, para el año 2013 por la calidad de la imagen se pudo evidenciar vegetación en la playa lo cual es indicativo del inicio de la berma, es así que tal como se observa en la imagen existe un retroceso de playa. En el sector sur en cambio se evidencia un retroceso paulatino durante el periodo 2000 – 2013. Las imágenes de todos los sectores del área de estudio pueden verse en el Apéndice IV.

Evolución de la Berma en Libertador Bolívar



Figura 3.14 Evolución de la Berma del 2000 al 2013 en Libertador Bolívar (Autores, 2019)

Evolución de la Berma en Playa Bruja

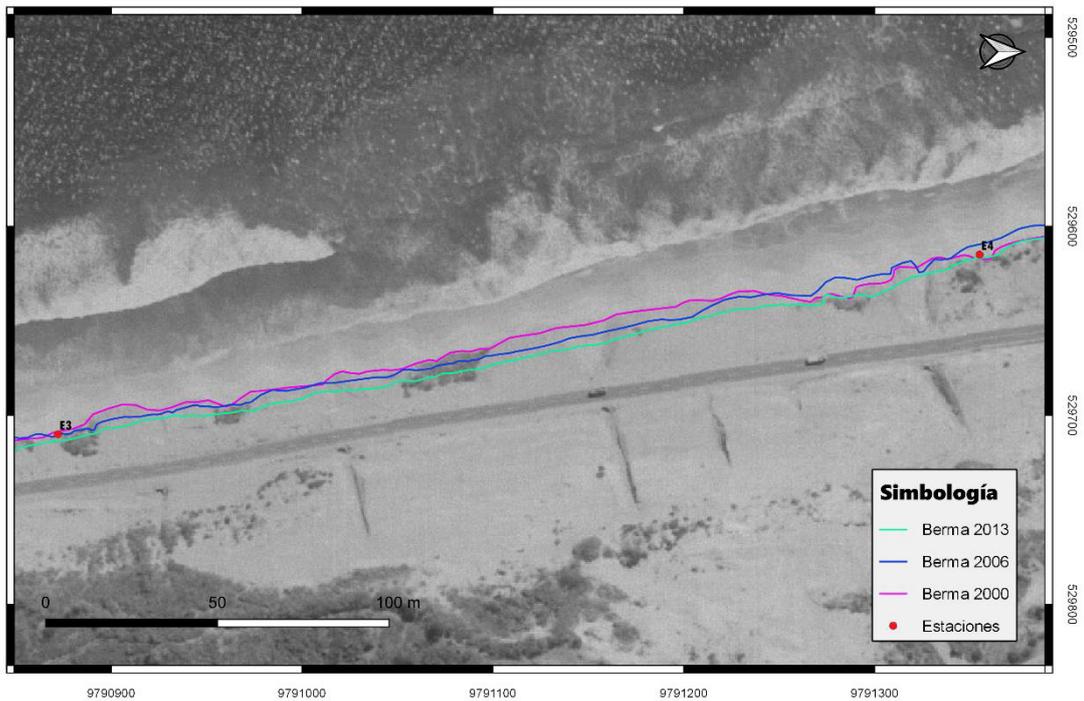


Figura 3.15 Evolución de la Berma en Playa Bruja del 2000 al 2013 (Autores,2019)

Para el análisis cuantitativo se utilizó el programa RStudio para determinar las diferencias existentes en las bermas de cada periodo, dividiendo así los resultados en tres escenarios a) 2000 – 2013 b) 2000 – 2006 c) 2006 – 2013 los cuales están expresados en la Tabla 3.8. La baja tasa de erosión presentada durante el periodo 2000 – 2006 es influenciada por la acreción suscitada al norte de la zona de estudio, la cual no se da por condiciones naturales sino por el incremento de viviendas en zonas consideradas como inundables. Por lo tanto, en vista la subjetividad y posibles errores que tiene este método de delimitación de la berma se considera utilizar el periodo 2006 – 2013 como indicador de la erosión para el modelamiento de la línea de costa.

Tabla 3.8 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Playa Bruja - Libertador Bolívar (Autores, 2019)

Zona de Estudio Playa Bruja - Libertador Bolívar							
Periodo	Mínima	1st Quartil	Mediana	Media	3rd Quartil	TE_Media	TE_Mediana
2000 - 2006	-11.17	-1.26	2.37	1.27	3.93	0.21	0.39
2006 - 2013	-6.54	2.93	4.49	4.41	5.75	0.63	0.64
2000 - 2013	-5.45	3.42	6.15	5.67	8.67	0.44	0.47

Considerando la subjetividad planteada anteriormente en la vectorización de la berma se decidió obtener resultados estadísticos para dos zonificaciones, la zona norte (desde E3 – E5) y zona sur (E1 – E3), los resultados están presentados en la Tabla 3.9 y 3.10 donde se observa que para la zona norte es evidente una sobreestimación de los procesos de acreción y erosión teniendo una media de acreción de 0.092 m/año durante 2000 – 2006.

Para la zona sur el retroceso de la línea de costa es paulatino y similar en todos los periodos de tiempo siendo la tasa de erosión media de 0.5 m/año la más representativa para esta zona del litoral ecuatoriano. Sin embargo, se debe considerar que los valores de erosión varían en la zona de estudio entre 0.2 a 0.7 m/año.

Tabla 3.9 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Zona Norte (Autores, 2019)

Zona Norte							
Periodo	Mínima	1st Quartil	Mediana	Media	3rd Quartil	TE_Media	TE_Mediana
2000 - 2006	-11.16	-4.36	-0.47	-0.55	3.35	-0.09	-0.08
2006 - 2013	-2.89	3.91	5.08	5.34	6.69	0.76	0.73
2000 - 2013	-5.45	1.51	5.09	4.79	7.84	0.34	0.39

Tabla 3.10 Resultados estadísticos obtenido en Rstudio en Zona Sur (Autores, 2019)

Zona Sur							
Periodo	Mínima	1st Quartil	Mediana	Media	3rd Quartil	TE_Media	TE_Mediana
2000 - 2006	-2.09	2.02	3.05	3.08	4.08	0.51	0.51
2006 - 2013	-6.54	2.48	3.56	3.47	5.21	0.50	0.51
2000 - 2013	-4.18	5.24	7.07	6.55	9.09	0.50	0.54

Para tener una perspectiva visual y espacial de lo que acarrea la tasa de erosión en los tres escenarios planteados se utiliza el software QGIS para clasificar un segmento (polígono vectorial) que representa el área de estudio en base a una adaptación de los indicadores propuestos por Gornitz et al.(1994), ver Tabla 3.11

Tabla 3.11 Clasificación de Indicador de Erosión según (Gornitz et al., 1994)

Rangos				
Acreción	Estabilidad	< 0.5 m/año	0.5 – 1 m/año	>1 m/año
Muy Baja (Azul)	Baja(Verde)	Media(amarillo)	Alta(tomate)	Muy Alta(Roja)

En la Figura 3.16 se puede observar que el rango promedio más representativo de la tasa de erosión para este escenario corresponde a 0.5 – 1 m/año presentándose en el 63% del área de estudio mientras que el 37% corresponde a valores menores que 0.5 m/año.

**Zonificación del Retroceso de la Línea de Costa
Escenario 2000 - 2013**

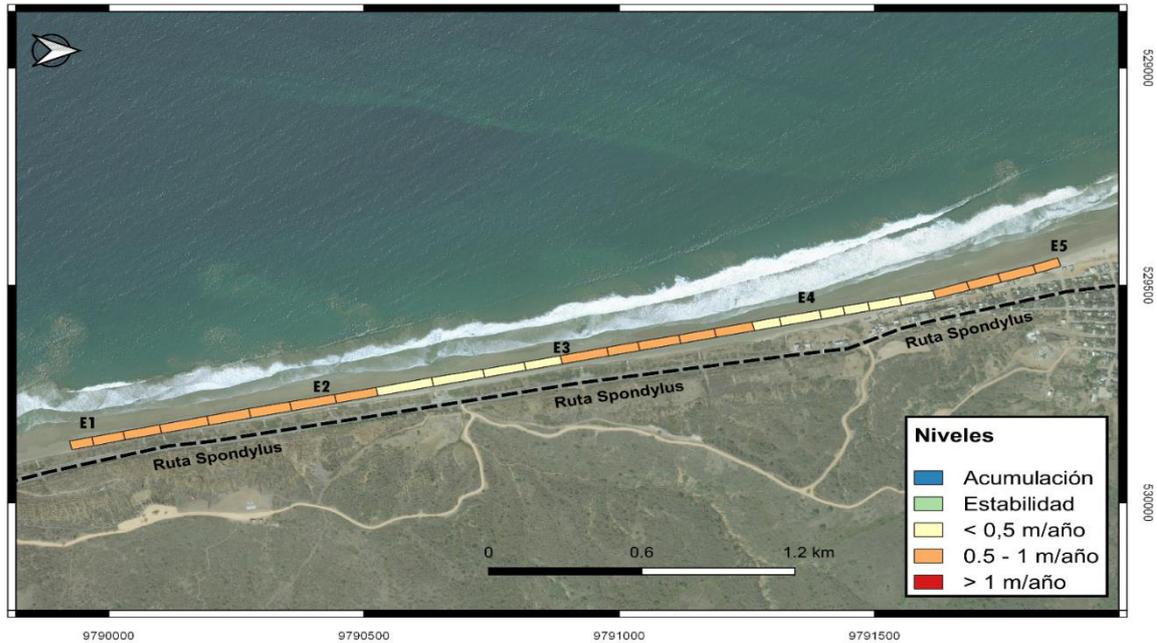


Figura 3.16 Zonificación de erosión por retroceso de la Línea de Costa para el período 2000 – 2013 (Autores, 2019)

**Zonificación del Retroceso de la Línea de Costa
Escenario 2000 - 2006**



Figura 3.17 Zonificación del retroceso de la línea de costa período 2000-2006 (Autores, 2019)

Para la Figura 3.17 correspondiente al escenario 2000 – 2006 se puede observar que existe una zona considerada como acreción en el sector norte del área de estudio correspondiente a un 19% del área de estudio, sin embargo este proceso de acreción tiene influencia humana presentando un aumento de construcciones de vivienda o diversión en zonas inundables lo que dificulto el análisis o identificación de la berma, por otro lado el sector sur sigue manteniendo una tendencia similar a la tasa del escenario 1 encontrándose valores menores a 0.5 m/año entre las estaciones E2 y E3 así como en las inmediaciones de la estación 4 correspondientes a un 30% del área de estudio y 51% corresponde a valores entre 0.5 – 1 m/año.

Zonificación del Retroceso de la Línea de Costa Escenario 2006 - 2013



Figura 3.18 Zonificación del retroceso de la línea de costa período 2006-2013 (Autores, 2019)

Para el escenario 2006 – 2013 (ver Figura 3.18) se tiene un rango de retroceso similar a los escenarios anteriores siendo el sector de Playa Bruja el que presenta una tasa de erosión anual constante, se puede observar que entre la E2 y E3 existen valores menores a 0.5 m/año correspondiente al 20% de la zona de estudio, un 63% para el rango de 0.5 – 1 m/año, y de un 17% para erosiones mayores a 1 m/año cabe mencionar que este alto nivel de erosión es debido a las construcciones presentes durante el periodo 2000 – 2006 en zonas inundables lo que condiciono la vectorización de la berma generando un mayor valor.

3.9. Dinámica de la línea de costa mediante el uso de un modelo numérico

3.9.1. Archivos de entrada

3.9.1.1. Perfiles transversales

Utilizando la herramienta Terrain Profile del complemento profile tool de QGIS, se obtiene el perfil transversal de cada una de las estaciones, la extracción de data se da del archivo batitopo.tiff, obteniendo una matriz de datos (x, z) la cual se ingresa en el modelo numérico, en la Figura 3.19 se puede observar algunos de los perfiles extraídos de QGIS la profundidad a la que llegan estos perfiles es de 15.3 metros de acuerdo al MWL.

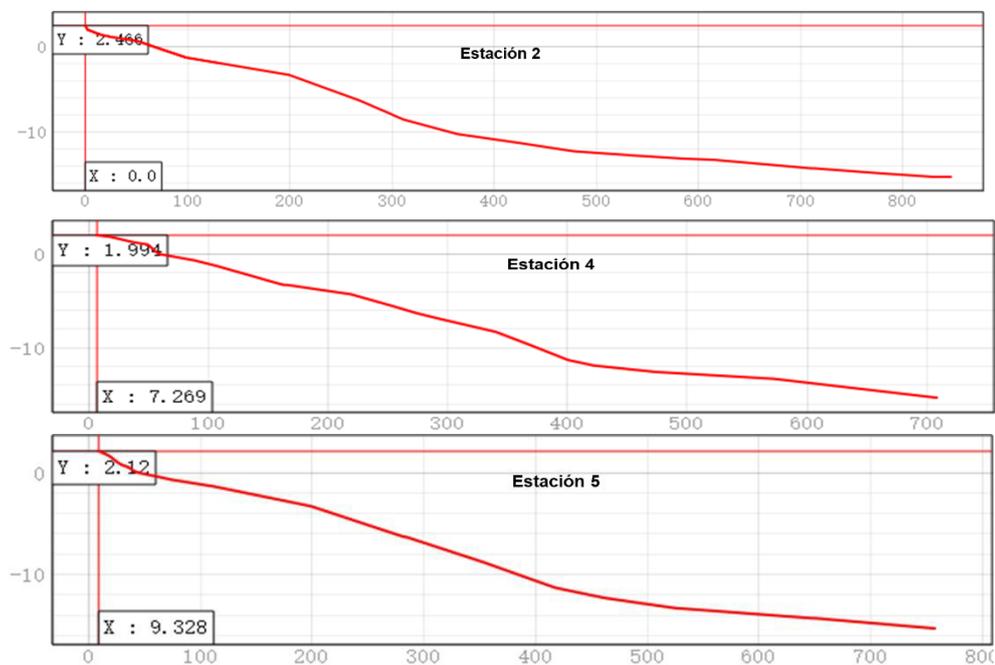


Figura 3.19 Perfiles transversales extraídos de QGIS (Autores, 2019)

3.9.1.2. Oleaje

Con el fin de obtener los valores medios de oleaje para la estimación del cambio de la línea de costa a futuro, se obtuvo un promedio mensual en base al período 2006-2013 de la data descargada del WWIII, los valores resultados de oleaje costa afuera se muestra en la Tabla 3.12, la rutina utilizada puede verse en el Apéndice II.

Tabla 3.12 Climatología del oleaje en aguas profundas (Autores, 2019)

Mes	Media		
	Hs (m)	Direccion	Periodo (s)
Enero	1.39	235	13.2
Febrero	1.33	229	13.5
Marzo	1.48	215	13.4
Abril	1.56	205	13.4
Mayo	1.61	201	13.4
Junio	1.75	201	13.7
Julio	1.77	203	13.4
Agosto	1.74	201	13.4
Septiembre	1.71	203	13.2
Octubre	1.61	208	13.3
Noviembre	1.43	208	12.6
Diciembre	1.37	224	13.1

Oleaje cercano a la costa (Nearshore)

La transformación del oleaje de aguas profundas a aguas someras utilizando MIKE21 SW se lo realizo en el veril de 15 metros, profundidad verificada mediante el módulo LITDRIFT, debido a que el módulo de modelamiento de la línea de costa (LITLINE) necesita como dato de entrada el oleaje mayor a la profundidad activa, que para la zona de estudio se encuentra en el rango de 8 - 11 m, estimaciones inicialmente realizadas con las formulaciones de Hallermeir (1981), el periodo de oleaje transformado corresponde al 2006 – 2013 tal como se lo expuso en la sección 2.1.1, además de ser este el periodo que representa de mejor manera la tasa de erosión media. En la Figura 3.20 se puede observar cómo se presenta la distribución del oleaje a esta profundidad,

teniendo altura de olas en el rango de (0.2 – 1.2 m), la dirección del oleaje está en un rango de 237° a 255°, los valores del oleaje del norte son minimizados en esta transformación debido a que la batimetría a la que se tuvo acceso solo permitía generar condiciones de borde del SurOeste, sin embargo, este oleaje es representativo de las costa ecuatorianas (Sanchez, 2015) (Chen et al., 2017) lo que permitirá ver el comportamiento de la línea de costa.

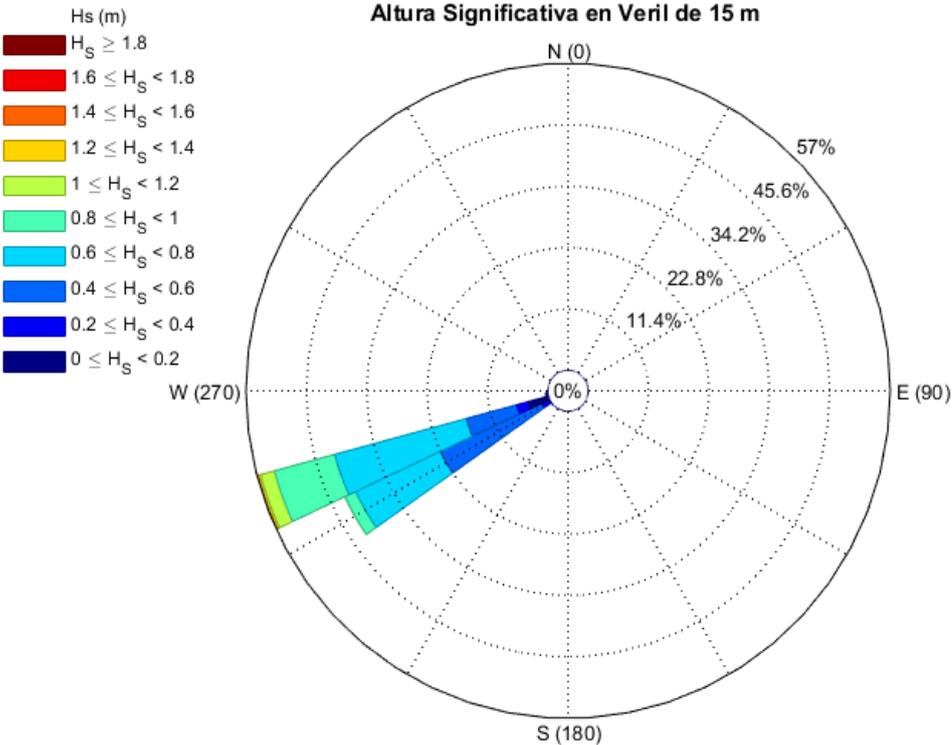


Figura 3.20 Modelamiento altura significativa en veril de 15m (Autores, 2019)

El módulo MIKE21 SW no transforma el oleaje en la rompiente para lo cual el manual del usuario recomienda que se utilice el módulo MIKE21 BW (Boussinesq Wave) un módulo complejo y con mayores tiempos computacionales, ya que el objetivo de este es el de realizar modelaciones hidrodinámicas en 2D, sin embargo el módulo LITDRIFT también realiza la transformación del oleaje a una profundidad especificada con computacionales menores.

En la Figura 3.21 se presentan los resultados obtenidos de esta transformación siendo similares a los que caracterizan esta región de estudio teniendo un oleaje incidente del suroeste entre 245° y 255° con respecto al norte, altura de ola que oscilan entre los 0.2 y 1.2 m con máximos de 1.8 m.

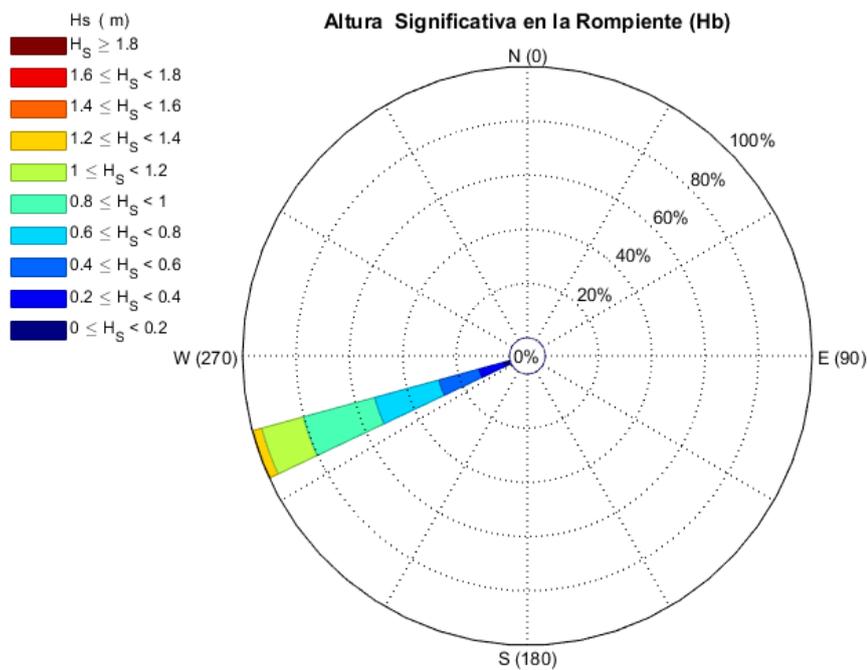


Figura 3.21 Modelamiento de altura significativa en la rompiente [H] (Autores, 2019)

3.9.1.3. Parámetros de sedimentos

Uno de los parámetros de entrada que necesita el modelo numérico utilizado en este estudio es el denominado “*Geometrical Spreading*” o Desviación Estándar de los sedimentos el cual es obtenido de la raíz cuadrada del D_{84}/D_{16} , tal como fue expuesto en la sección 2.4.1.4, obteniendo valores que oscilan entre 1.1 y 1.7, al igual que el D_{50} se obtuvo un valor promedio para cada estación a lo largo del perfil (ver Figura 3.22), y un único valor por estación (ver Figura 3.23), valores ingresados en el modelo LITLINE.

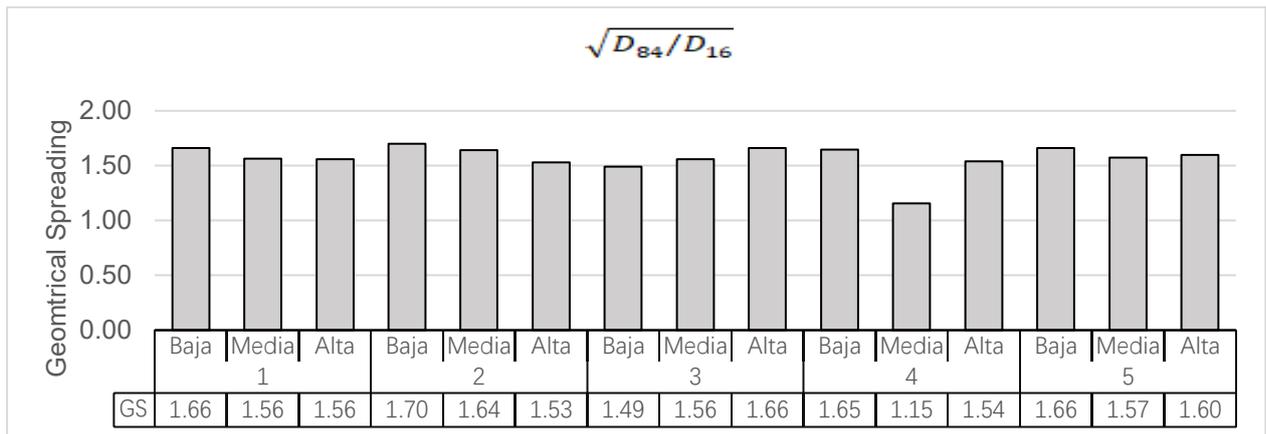


Figura 3.22 Distribución del “Geometrical Spreading” por perfil de playa (Autores, 2019)

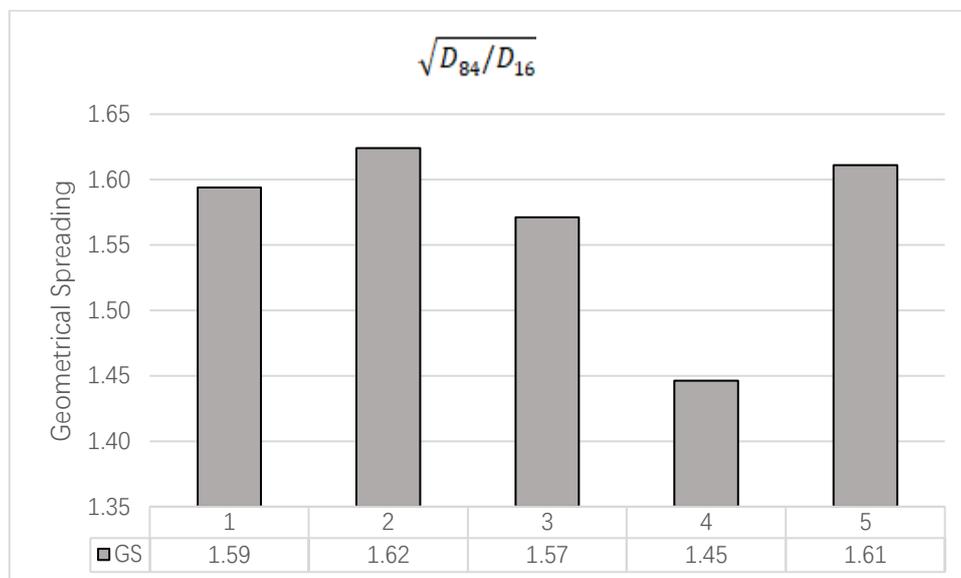


Figura 3.23 “Geometrical Spreading” promedio por perfil de playa (Autores, 2019)

Los parámetros de sedimentos, mostrados en la Tabla 3.13 se tomaron como valores constantes a lo largo de todos los perfiles, la rugosidad que mejor obtuvo resultados fue la tomada como 0.04m misma que fue utilizada durante la calibración de Mike 21 SW para transformar el oleaje, la velocidad de caída del grano fue estimada implícitamente mediante el programa, utilizando para el cálculo los valores de $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$ y una temperatura promedio de 23°C, en lugar de la velocidad calculada en cada perfil y

mostrada en la Tabla 3.13 puesto que tendía a subestimar el transporte. Para el perfil se tomó como diámetro medio el valor ubicado en la zona baja de la playa, puesto que se conoce el tamaño del grano tiende a disminuir con la profundidad, y fue el único perfil que presentó un apreciable gradiente en la distribución a lo largo del perfil de playa, para el resto se tomó el diámetro medio.

Tabla 3.13 Parámetros de sedimentos por perfil transversal (Autores, 2019)

Parámetros	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Perfil 5
Rugosidad de Fondo (m)	0.04	0.04	0.04	0.04
D50 (mm)	0.24	0.19	0.22	0.19
Velocidad de Caída (m/s)	0.033	0.033	0.033	0.033
$\sqrt{D_{84}/D_{16}}$	1.62	1.57	1.44	1.6

3.9.2. Transporte litoral (LITDRIFT)

El transporte litoral promedio del período 2006-2013 para cada perfil analizado, se muestra en la Figura 3.24, los valores obtenidos son similares a los resultados medidos en campo, con medias alrededor de 600 y 500 m³/día.

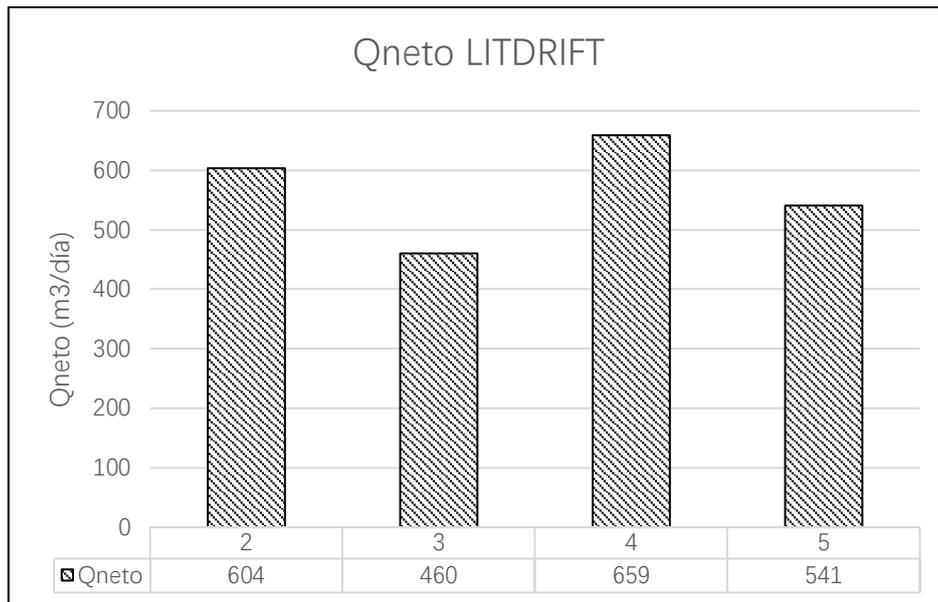


Figura 3.24 Transporte litoral promedio del período 2006-2013 para cada perfil (Autores, 2019)

3.9.3. Línea de costa modelada

3.9.3.1. Condiciones naturales

En la Figura 3.25 se observa la erosión 2006 - 2013 medida mediante imágenes aéreas y la erosión 2006-2013 modelada, en general se observa una misma tendencia, resultando en un coeficiente de correlación igual a 0.79 y obtenido mediante una comparación de cada 5m. Sin embargo teniendo en cuenta la extensión de la playa de sólo 2 km, la resolución de los datos y la precisión de tasa de imágenes satelitales no se recomienda una correlación de tan alta resolución (5m). Sin embargo, graficando una función polinomial de cuarto orden, que nos permite ver la tendencia de la tasa de erosión a medida que reducimos la influencia de la tasa de picos, probablemente debido a una subjetividad de la metodología empleada.

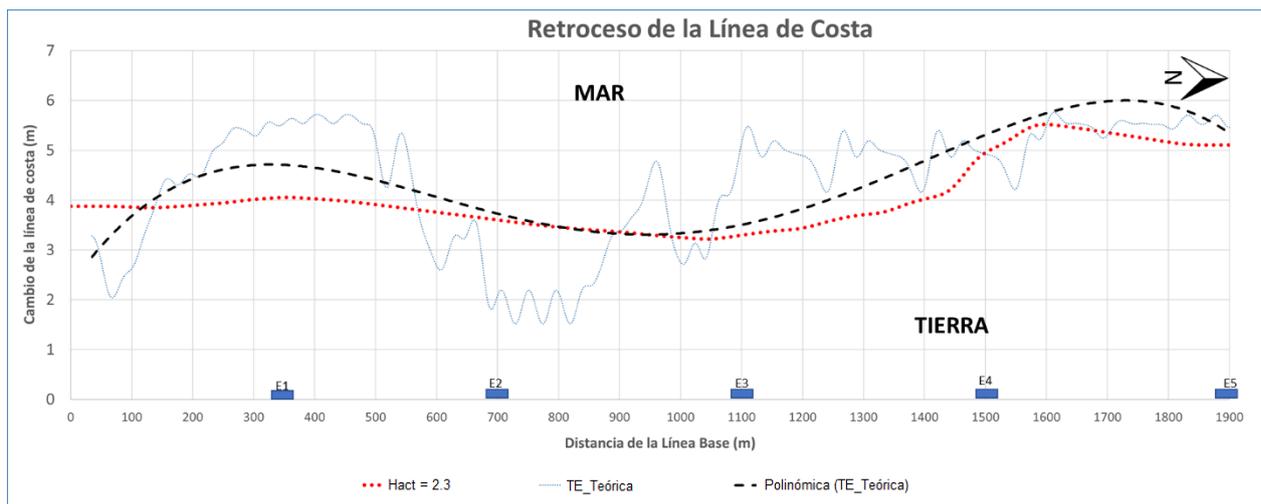


Figura 3.25 Retroceso de la línea de costa 2006-2013 (Autores, 2019)

En la Figura 3.26 se presenta el modelamiento de la berma para el año 2013 desde el año base de este estudio (2006), al igual que la berma vectorizada por la imagen satelital, de esta comparación se puede observar que tienen la misma tendencia de erosión a lo largo del estudio, del modelamiento se obtiene que Libertador Bolívar sufre una tasa de erosión en base al retroceso de la línea de costa de 0.57 m/año, similar a la tasa de erosión media que se determinó mediante imágenes aéreas.

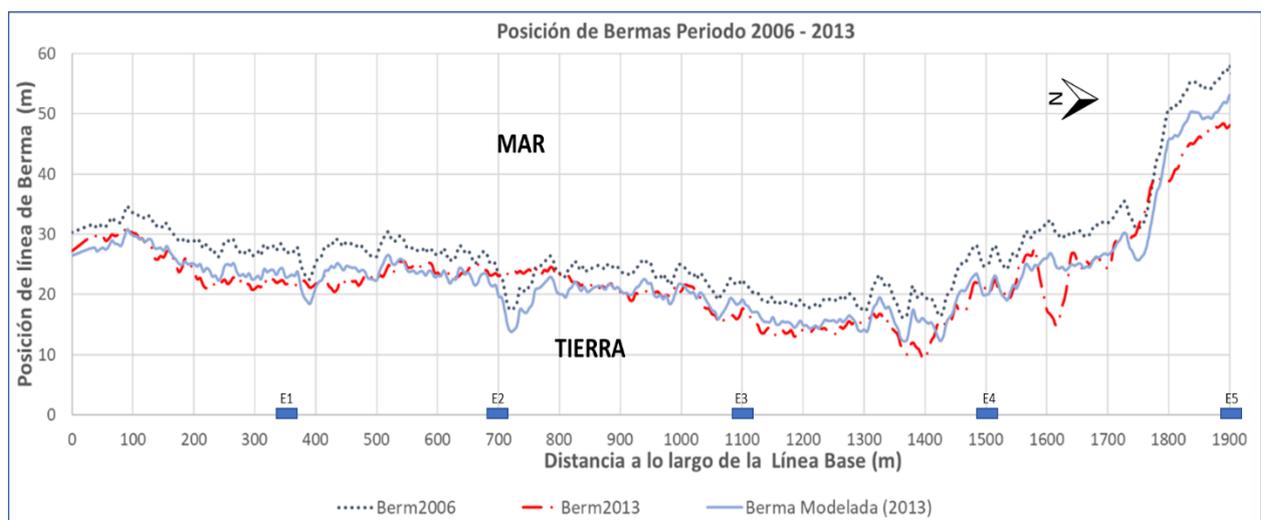


Figura 3.26 Posición de bermas, período 2006 – 2013 (Autores, 2019)

De acuerdo con la tendencia similar encontrada en el modelo se realizó un pronóstico de la evolución de la línea de costa para un periodo de 7 años, usando el oleaje promedio previamente mencionado, dando como resultado una berma con la misma tendencia de retroceso, de una tasa variable entre 0.4 y 0.7 m/año, siendo así que la zona con mayor erosión se da en la parte céntrica de Playa Bruja donde se tiene incluso el ancho mínimo

del acantilado lo que prevee que en un periodo de 10 años sin protección alguna hubiese colapsado afectando la carretera E15. De la Figura 3.27 se puede observar que las zonas con mayor erosión corresponde a Playa Bruja.



Figura 3.27 Retroceso de la berma 2019-2025, sin muro de protección (Autores, 2019)

3.9.3.2. Obras de protección costera

En la tesis de Cansing & Mena (2018) se propone como una de las alternativas para evitar la erosión en el sector de Playa Bruja la construcción de 5 escolleras costa afuera con una longitud de 120 m cada una y con gaps (distancia de separación entre escolleras) de 80 m, ubicadas en el veril de 2 m (respecto al MLWS) tal como se puede observar en la Figura 3.28, es así que en base a esta alternativa se pretende determinar como evolucionaría la costa con este tipo de estructura.

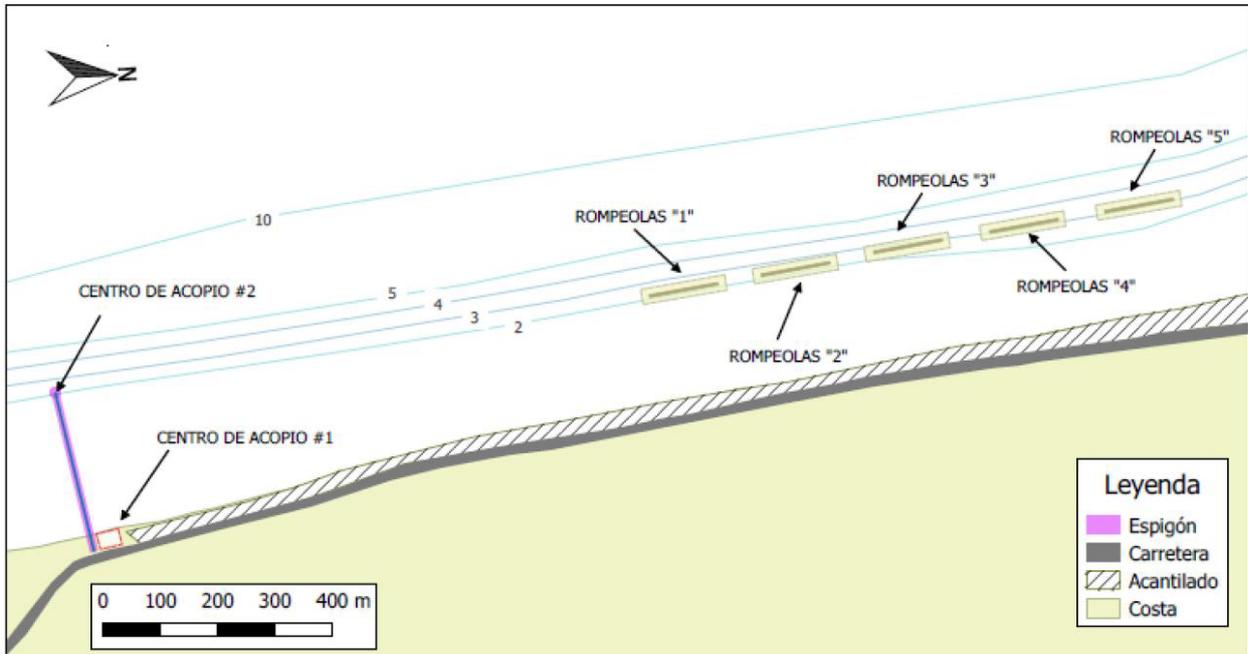


Figura 3.28 Propuesta de protección costera para el área de Playa Bruja propuesto por Cansing & Mena (2018)

En la Figura 3.29 se puede observar cómo evolucionaría la línea de costa bajo influencia de escolleras propuestas por Cansing & Mena (2018). Se puede observar que las obras de protección costera influyen en gran medida en la morfología de la zona de estudio produciendo mayor acreción en la zona sur de Playa Bruja con intervalos que varían entre los 7 y 22 m de acreción, sin embargo esta acumulación de sedimento en la zona sur genera gradientes en el transporte litoral que para esta zona de estudio es hacia el norte, la zona de Libertador Bolívar presenta una erosión entre 2 y 20 m en 7 años.

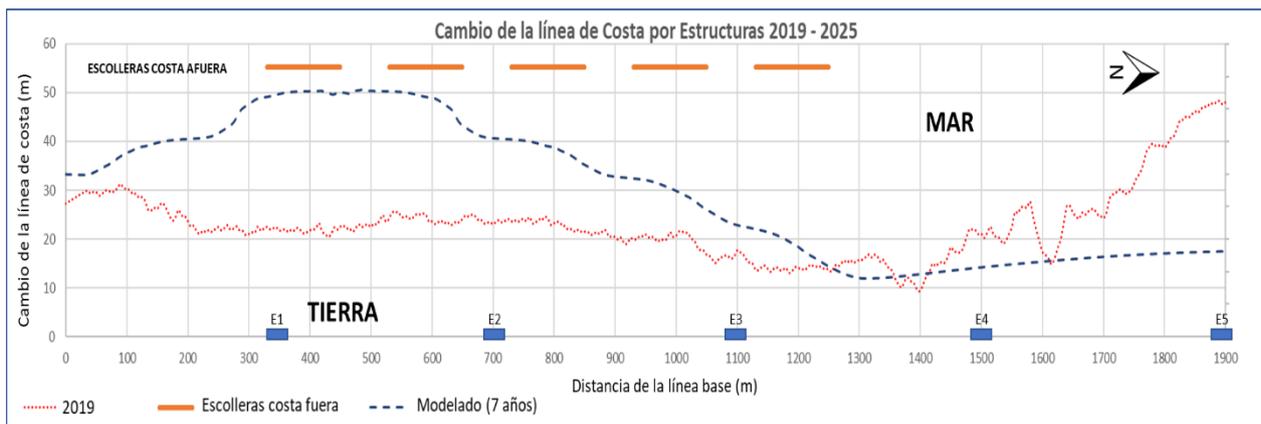


Figura 3.29 Cambio de línea de costa por estructuras 2019-2025 (Autores, 2019)

3.10. Amenaza por erosión costera

La amenaza por erosión costera fue determinada mediante los indicadores planteados en la Tabla 2.4, en los cuales el determinar una tasa de erosión a través del retroceso de la línea de costa ha permitido conocer las zonas con niveles más altos de amenaza clasificándolos en tres rangos, Bajo, Medio y Alto, criterio solicitado por parte de la SNGRE. Es así que la zona de estudio presenta un nivel alto del 45% de la amenaza, mientras que el 46% de la zona está catalogada como amenaza de nivel medio y el 9% tiene una amenaza baja en concordancia con lo evidenciado en las salidas de campo zona en la que el acantilado ha sido menos afectada y tiene presencia de berma.

Debe considerarse que las zonas con mayores niveles de amenaza correspondiente a las inmediaciones de la estación 5 cercana a la población de Libertador Bolívar, entre la estación E2 – E4 y los alrededores de la estación 2 también presenta niveles altos de amenaza lo que concuerda con el deterioro del muro de protección del acantilado y evidenciado de manera fotográfica tal como se observa en la Figura 3.30.

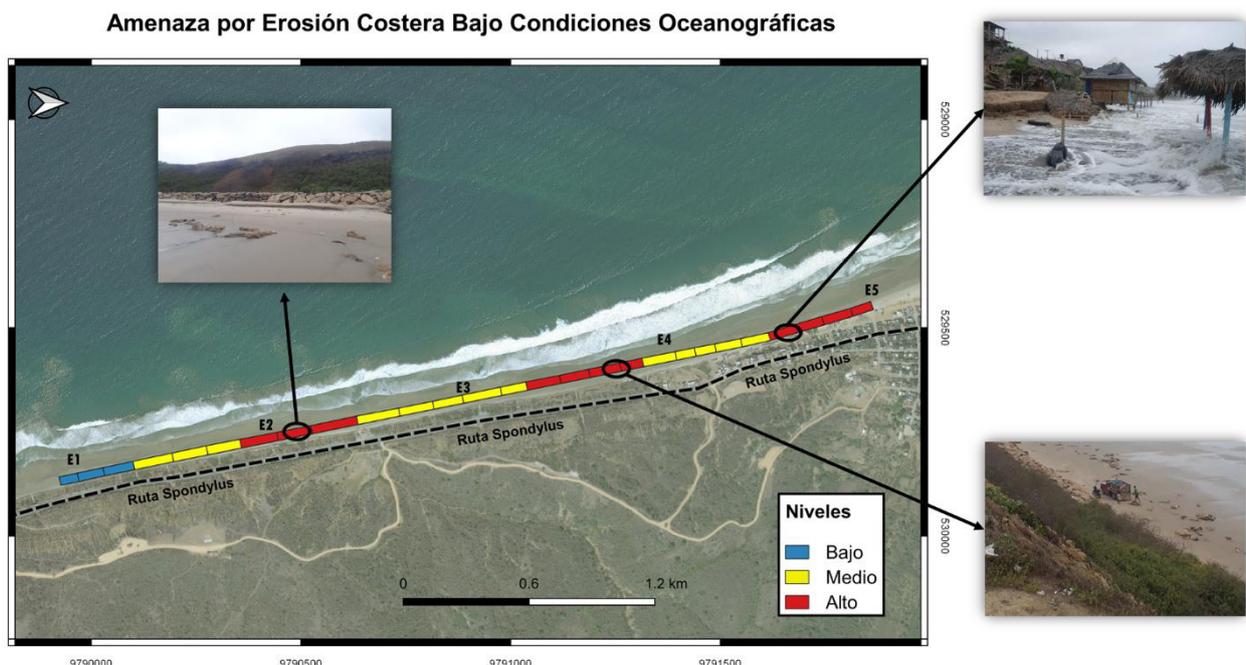


Figura 3.30 Niveles de amenazas por erosión costera bajo condiciones oceanográficas (Autores, 2019)

CAPITULO 4

4 Discusión y Conclusiones

4.1. Discusión

A fin de poder reducir el nivel de incertidumbre de los resultados, durante el proceso de calibración se seleccionaron minuciosamente datos de entrada confiables que el modelo necesita basados en recopilación bibliografía y mediciones de campo para la zona de estudio. Es importante mencionar que una de las principales limitaciones para el uso de los modelos numéricos en el estudio de los procesos costeros es la escasez de datos que existen, por lo que se deben considerar varias asunciones cuidadosamente evaluadas y analizadas.

Oleaje

La calibración y validación de la transformación del oleaje en Mike 21 se basó en parámetros visuales y teóricos este último teniendo como principal parámetro la desviación estándar de la dirección del oleaje siendo 16.52° la que presenta mayor ajuste al oleaje típico de la costa ecuatoriana, en lugar de una comparación a partir de un registro continuo de oleaje mediante equipos, y que se encuentren dentro del mismo período modelado. No obstante, un registro de mediciones visuales continuo, durante un mismo período de datos costa afuera, se considera una validación bastante acertada mientras mayor sea la pericia del observador.

Transporte litoral

El modelo LITDRIFT permite considerar el aporte de corrientes regionales y/o locales, como las originadas debido al forzamiento de los vientos, mareas, y ríos, que podrían ser un factor de debilitamiento o fortalecimiento de las corrientes litorales, mas no fueron tomadas en consideración puesto que analizando el comportamiento de la corriente litoral observada, esta no mostró cambios en los diferentes estados ni fases de marea, y aunque corrientes de marea tienen un efecto importante en el transporte, en zonas como estuarios y bahías, en costas rectas el oleaje es el principal factor de transporte (CERC, 2002). Tampoco fueron incluidos los vientos puesto que la zona estudiada presenta valores incapaces de generar un aporte significativo en el transporte de sedimentos.

Del mismo modo Tolman (1992) señala que el error al encontrar una estimación correcta de la rugosidad del fondo tiene un impacto mucho mayor en la disipación que el efecto de una corriente media (Holthuijsen, 2007).

Además se tomó como despreciable el aporte sedimentario del río atravesado, ubicado al norte de la zona de Libertador Bolívar, pues si bien no se ha realizado un análisis de la tasa de aporte sedimentario de este hacia el mar, no se observó significancia de aporte sedimentario a lo largo de la zona estudiada (ubicada en el sur), más que la presencia de guijarros hasta alrededor de 500m al sur de este. Sin embargo, se debe tener en cuenta es un río estacional y las salidas de campo fueron realizadas durante época seca. Adicionalmente, de acuerdo a conversaciones con moradores ubicados en la zona norte del río, relatan se ha evidenciado un retroceso de la playa, que se intensificó con la construcción del malecón y puesto que el transporte neto es hacia el norte se concluye, el aporte del río no es significativo.

El no tener un valor fijo de transporte litoral anual, dificulta el proceso de calibración resultando en un proceso cíclico entre LITLINE y LITDRIFT.

Cambio de línea de costa

El cambio de línea de costa es un proceso que implica más de una dimensión, por lo que realizarlo en un modelo one-line, tiene sus limitaciones, sin embargo este tipo de modelos han sido efectivamente aplicados, generando resultados confiables (Fadhli, 2014; Khalifa, Soliman, & Yassin, 2017) mientras se consideren las condiciones de los parámetros de entrada, por ejemplo en LITLINE la línea de costa debe ser casi uniforme y contornos cercanos a ella deben ser casi paralelos.

Los perfiles transversales fueron tomados de cartas náuticas y mezclados con topografía actual, lo que nos da un error tanto de tiempo como de resolución, que se intentó reducir mediante la interpolación, mas sin embargo se tiene mucha incertidumbre en la zona de surf, siendo este el principal sector en el que se transportan los sedimentos, proceso principal del cambio de línea de costa.

En cuanto a la evaluación con estructuras, el flujo alrededor de un rompeolas comprende una complicada circulación de 2 dimensiones que no puede evaluarse completamente por ningún modelo unidimensional. Con respecto al modelado de la evolución de la línea de costa, el principal efecto de un rompeolas es su efecto de protección, originando una disminución del transporte en la zona entre las estructuras y la línea de costa, esto ocasionaría una disminución de flujo de entrada en la zona norte adyacente ocasionando un desequilibrio y una posible erosión tal como fue presentado en los resultados.

Amenaza por erosión costera

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario la implementación de herramientas tecnológicas como la fotogrametría y el modelado numérico, las cuales nos permitieron comprender la dinámica costera e identificar la amenaza. Es así que para el periodo evaluado 2006 – 2013 y un modelado de 7 años los datos obtenidos nos muestran cual es la tendencia erosiva de la playa teniendo una media de 0,5 m/año, con estos resultados y en base a los indicadores propuestos por Gornitz (1994), Rangel & Posada

(2013) las zonas con mayor amenaza son las inmediaciones de E2, E4 y E5 lo cual concuerda con los resultados obtenidos de análisis de información bibliográfica y en campo, donde son zonas que generalmente presentan mayor oleaje, en su mayoría de tipo plunging lo que ocasiona mayor suspensión de sedimento y consecuentemente un mayor transporte litoral, generando zonas erosivas.

4.2. Conclusiones

La playa de Libertador Bolívar y la zona sur de playa bruja presentan condiciones de playa intermedia con tendencia a ser reflectiva, con una pendiente suave y un oleaje en la rompiente con valores predominante de 0.5 m a 1 m de tipo swell originando corrientes litorales con magnitudes promedios de 0.2 m/s.

De los resultados obtenidos, mediante imágenes aéreas se concluye que la zona de Libertador Bolívar y Playa Bruja se erosionan a una tasa de alrededor de 50 cm al año, el motivo recae tanto por condiciones naturales como por intervención antropogénica, debido a la invasión de la duna en la zona de Libertador

El transporte neto es hacia el norte con cierta incidencia hacia el sur durante la presencia de oleaje del norte, adicionalmente en campo se observaron zonas, como en la estación 4 que mantenían un transporte tanto sur como norte, siendo un factor importante en la formación de corrientes de resaca, que adicional a un transporte litoral, ocasionan un transporte on shore-offshore.

La modelación de las condiciones de transporte litoral y cambio de línea de costa, fueron congruentes con los datos medidos en campo y la tasa de erosión medida a partir de fotografías aéreas, mostrando ambos la misma tendencia. Cabe recalcar que para obtener una mayor similitud de la data observada y la medida se deberían obtener datos de mayor resolución en espacio tiempo, así como mayor un monitoreo constante y/o a largo plazo.

Durante la modelación no se considera el aporte sedimentario del río atravesado, ubicado al norte de la zona de libertador, pues si bien no se ha realizado un análisis de la tasa de aporte sedimentario de este hacia el mar, el ser de característica estacional y

dado el transporte litoral neto hacia el norte no se observó significancia de aporte sedimentario a lo largo de la zona estudiada, (ubicada en el sur), más que la presencia de guijarros hasta alrededor de 500m al sur de este. Adicionalmente, de acuerdo a conversaciones con moradores ubicados en la zona norte del río, relatan también se ha evidenciado un retroceso de la playa, que se intensificó con la construcción del malecón.

4.3. Recomendaciones

Utilizar una batimetría de mayor resolución y de diferentes años con el fin de obtener resultados más precisos en la estimación del cambio de línea de costa. Para mejorar la exactitud en la estimación del transporte de sedimentos tomar muestras granulométricas a lo largo de todo el perfil transversal y validar el oleaje con datos de mediciones continuas.

Contar con un mayor número de imágenes aéreas a lo largo del tiempo y con una escala adecuada, para lograr una mejor calibración del modelo y obtener una validación más allá de la tasa de cambio correspondiente a un solo período, es recomendable que las imágenes aéreas sean tomadas anualmente y pueden ser realizadas por el municipio o cualquier entidad interesada en el levantamiento de ortofotos.

Puesto que las salidas de campo al igual que los datos obtenidos de estudios previos fueron obtenidos durante época seca, se recomienda realizar observaciones en estación lluviosa con el fin de observar la variación e influencia de la estacionalidad, tanto de las condiciones oceanográficas, influencia del río como un posible cambio en los perfiles de playa.

Para estudios futuros considerar escenarios con incidencia de oleaje proveniente del norte, eventos de elevación del nivel del mar e incidencia del fenómeno de El Niño.

Realizar un análisis exhaustivo de las posibles soluciones para aminorar la tasa de retroceso, y/o considerar una reubicación de las casas o carretera, así como también profundizar en el estudio y uso de 'ingeniería verde', la cual ha tenido una gran acogida en los últimos años.

BIBLIOGRAFÍA

- Artagan, S. S. (2006). *A One-Line numerical model for shoreline evolution under the interaction of winds waves and offshore breakwaters*. (2006). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/322150522%0AA>
- Cansing, S., & Mena, G. (2018). *DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN COSTERA PARA PLAYA BRUJA, UBICADA EN LA COMUNIDAD LIBERTADOR BOLÍVAR-PROVINCIA DE SANTA ELENA*. ESPOL.
- Celentano, E. (2014). *Ecología poblacional del crustáceo Emerita brasiliensis (Decapoda, Hippidae) en la costa uruguaya : un análisis a múltiples escalas espaciales y temporales*. 125. <https://doi.org/10.1186/1472-6963-10-192>
- CERC. (1984). SHORE PROTECTION MANUAL US Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering, I*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.47830>
- CERC. (2002). Coastal Engineering Manual. *Coastal Engineering Manual*, (August 2001), 1–62.
- Chen, G., Bertrand, C., Ezraty, R., & Vandemark, D. (2017). A Global View of Swell and Wind Sea Climate in the Ocean by Satellite Altimeter and Scatterometer. *Ergonomics*, 60(9), 1240–1249. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1262063>
- Corredor Daza, J. G. (2015). *TOPOGRAFIA CONVENCIONAL Y TOPOGRAFIA CON DRONES PARA EL DISEÑO GEOMETRICO DE UNA VIA EN REHABILITACION SECTOR TULUA – RIO FRIO JUAN GUILLERMO CORREDOR DAZA CODIGO : 3101239 Ingeniero Topográfico UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA Bogotá, Colombia*. Retrieved from <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7596/CorredorDazaJuanGuillermo2015.pdf;jsessionid=990C16ADD890810264C06FBC9BB27B0F?sequence=1>
- Das, B. M. (2012). *Das, Fundamento de ingenieria geotecnica* (p. 816). p. 816.
- Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. New York: Cambridge University Press.
- DHI. (2009). *LITPACK: An integrated modeling system for littoral processes and coastline kinetics (short introduction and tutorial)*.
- DHI. (2011). Longshore Current and Littoral Drift. *Reading*.
- DHI. (2012). *Mike 21 Spectral Waves FM - Short Description*.
- DHI. (2014a). *Mike 21 spectral wave module, scientific documentation*.
- DHI. (2014b). *Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves, LITSTP User Guide*.
- Espinoza, M. E. (2018). *GULF OF GUAYAQUIL TIDAL SIMULATION USING DELFT3D HYDRODYNAMIC MODEL DURING AN EL NIÑO EVENT AND NORMAL CONDITIONS*. ESPOL.

- Espíritu, E., Vásquez, L., & Villanueva, B. (2015). *Levantamiento Topografico con Nivel de Ingeniero* (U. C. Vallejo, Ed.). Chimbote.
- ESPOL. (2017). *Línea Base para la construcción de dos espigones de encauzamiento en la desembocadura del Río Atravesado y el muro de protección costera de Playa Bruja en la comuna Libertador Bolívar en Santa Elena*. Guayaquil.
- Ewans, K. C. (2008). *Directional Spreading in Ocean Swell*. 40604(March 2002), 517–529. [https://doi.org/10.1061/40604\(273\)54](https://doi.org/10.1061/40604(273)54)
- Fadhli, M. (2014). Coastline Changes in the Vicinity of Runway Platform of Sultan Mahmud Airport, Kuala Terengganu: Comparative Analisis of One line Model Versus Satellite Data. *Journal of Applied Sciences* 14, 19. <https://doi.org/10.3923/jas.2014.2234.2245>
- FAO. (2009). *DINASAR*.
- Ferreira, M. R., & Aira, V. G. (2017). Aplicaciones Topográficas de los Drones. *Obtenido de: Http://Www. Bibliotecacpa. Org. Ar/Greenstone/Collect/Otragr/Index/Assoc/HASH0159/314a3cb*, 8(1), 11. Retrieved from <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/otragr/index/assoc/HASH0159/314a3cb8.dir/doc.pdf>
- García, F., García, U., & Palacio, C. (2009). Unstructured mesh generation for numeric models implementation. *DYNA (Colombia)*, 76(157), 17–25.
- Gornitz, V. M., Daniels, R. C., White, T. W., & Birdwell, K. R. (1994). All use subject to JSTOR Terms and Conditions Development Assessment Database : Rise The of a Coastal Risk to Vulnerability in the U . S . Southeast. *Coastal and Estuarine Research Federation*, (12), 327–338.
- Guevara, D., & Campi, P. (2018). *Determinación de una metodología para la identificación de una línea de restroceso de playa como herramienta de apoyo al proceso de reordenamiento territorial en Pacoa*. ESPOL.
- Guisado Pintado, E., Malvárez García, G., & Concha Navas, F. (2010). Los Modelos De Propagación De Oleaje, Simulación Morfodinámica Y Las Tig. *La Información Geográfica Al Servicio de Los Ciudadanos [Recurso Electrónico]: De Lo Global a Lo Local.*, 861–872.
- Hendriyono, W., Wibowo, M., Hakim, B. Al, & Istiyanto, D. C. (2015). Modeling of Sediment Transport Affecting the Coastline Changes due to Infrastructures in Batang - Central Java. *Procedia Earth and Planetary Science*, 14, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.098>
- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. New York: Cambridge University Press.
- IH Cantabria. (2017). *Estudio hidrodinámico de las actuaciones de restauración*. 362. Retrieved from http://convivelife.es/wp-content/uploads/2017/11/Annex_IIA2_Final1.pdf
- Kamphuis, W. (2000). *Introduction to Coastal Engenerign and Management* (Quenn's

University, Ed.). World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd.

Khalifa, A. M., Soliman, M. R., & Yassin, A. A. (2017). Assessment of a combination between hard structures and sand nourishment eastern of Damietta harbor using numerical modeling. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.009>

Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. (1996). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. New York: Cambridge University Press.

Kulkarni, R. (2013). *Numerical Modeling of coastal erosion using MIKE 21, Master thesis report; Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway*. (June).

Larson, M., Hanson, H., & Kraus, N. C. (1987). *ANALYTICAL SOLUTIONS OF THE ONE-LINE MODEL OF SHORELINE CHANGE*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.718.1399&rep=rep1&type=pdf>

Manco Jaraba, D., Rojas Martínez, E., Rudas Muñoz, A., & Moscote Daza, Y. (2018). Estudio sedimentológico en la cuenca de la quebrada San Pedro localizado en el municipio de Curumaní, departamento del Cesar, Colombia. *Ingenierías USBMed*, 9(2), 19. <https://doi.org/10.21500/20275846.3498>

Moncayo, D., & Ger, G. (2019). *Caracterización de las condiciones oceanográficas presentes en la playa de Ballenita - Provincia de Santa Elena, con énfasis en la estructura “El Mirador”, mediante el análisis de procesos costeros dominantes y cambios de perfiles de playa* (ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL). Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46869?mode=full>

Montero, D. (2014). *Propuesta para la creación de un Hotel Familiar en alianza con la Comuna Libertador Bolívar, con la finalidad de brindar una nueva alternativa de hospedaje en el sector costero del país*. (Universidad Católica de Santiago de Guayaquil). Retrieved from <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/2399/1/T-UCSG-PRE-ESP-AETH-179.pdf>

Mörner, N.-A., Brewster, B. C., Bokuniewicz, H., Inman, D. L., Healy, T. R., & Seymour, R. J. (2005). Longshore Sediment Transport. In *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 600–600). https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_199

Noujas, V., Kankara, R. S., & Rasheed, K. (2018). Estimation of Longshore Sediment Transport Rate for a Typical Pocket Beach Along West Coast of India. *Marine Geodesy*, 41(2), 201–216. <https://doi.org/10.1080/01490419.2017.1422818>

Obando, I. T. (2010). *Amenaza y peligros que supone la dinámica litoral Introducción*. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/amenaza-peligros-dinamica-litoral/amenaza-peligros-dinamica-litoral.pdf>

ONU. (2005). Marco de acción de Hyogo para 2005 - 2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. *Conferencia Mundial Sobre La Reducción de Los Desastres*, 25. Retrieved from

<https://www.eird.org/cdmah/contenido/hyogo-framework-spanish.pdf>

- Paredes, C., Castedo, R., Llorente, M., & Laín, L. (2012). Un modelo predictivo de la evolución en costas rocosas. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 28(4), 243–255.
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.08.002>
- Piedra, J. (1990). *Procesos Litorales en San Pedro-Valdivia*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Quick, M. C. (1991). Onshore-offshore sediment transport on beaches. *Coastal Engineering*, 15(4), 313–332. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90014-8)
- Ramieri, E., Hartley, A. J., Barbanti, A., Santos, F. D., Gomes, A., Hilden, M., ... Santini, M. (2011). Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. *European Environment Agency, European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation*. Retrieved from <http://cca.eionet.europa.eu/>
- Rangel, N. G., & Posada, B. O. (2013). Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. *Intropica*, 8, 29–42. <https://doi.org/10.21676/23897864.730>
- Rodríguez, R., Córdova, E., & Franco, J. (2009). *La erosión en las playas del litoral de Holguín, Cuba*. 1–20. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181517987001>
- Roelvink, D., & Reniers, A. (2011). *A Guide to Modeling Coastal Morphology* (Vol. 12). <https://doi.org/10.1142/7712>
- Sanchez. (2015). *Estudios para el diseño de la protección costera del nuevo Malecón de Libertador Bolívar*. Santa Elena, Ecuador.
- Sánchez Vargas, I. (2017). Determinar el grado de confiabilidad del levantamiento topográfico con dron en la Plaza San Luis - 2017. *Universidad César Vallejo*. Retrieved from http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/12246/sanchez_vi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- US Army Department of Training and Doctrine Command. (1993). *Army Water Transport Operations - Beach and Weather Characteristics*. Retrieved from <https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/55-50/Ch11.htm#Chap11>
- Vanoni, V. (2006). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers, ASCE.
- Vera, L. (2000). Análisis de los procesos costeros en La Libertad. *Acta Oceanográfica Del Pacífico, INOCAR*, 10. Retrieved from https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta10/OCE1001_6.pdf

APÉNDICE

I.- Imágenes aéreas

Año 2000



Imagen aérea del año 2000 sector Libertador Bolívar, comprada al IGM

Año 2013



Imagen aérea del año 2013 sector Libertador Bolívar, comprada al IGM

II.- Rutinas de Matlab para descarga de datos de WaveWatch III y estadístico del oleaje.

Script WaveWatch III

```
% Descarga de datos desde el apc (hawaii)
link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWATCH_III/3hourly';
ncdisp(link),

lon=ncread(link,'lon');           % leemos lon/lat
lat=ncread(link,'lat');

[lonr,latr]=meshgrid(lon,lat);   % preparamos lon/lat para
lonp=reshape(lonr,45216,1);     % hacer un plot(x,y)
latp=reshape(latr,45216,1);

[~,plon]=min(abs(lon-278.8));    % identificamos los puntos coorde-
[~,plat]=min(abs(lat+2));       % dos de referencia

time=ncread(link,'time');       % leemos la data

hsg=ncread(link,'htsgwsfc',[224 78 1],[1 1 Inf]);
hsg=squeeze(hsg);

per=ncread(link,'perpwsfc',[224 78 1],[1 1 Inf]);
per=squeeze(per);

dir=ncread(link,'dirpwsfc',[224 78 1],[1 1 Inf]);
dir=squeeze(dir);
```

Estadístico de olas

```
ene=find(time_vec(:,2)==1);
feb=find(time_vec(:,2)==2);
mar=find(time_vec(:,2)==3);
abr=find(time_vec(:,2)==4);
may=find(time_vec(:,2)==5);
jun=find(time_vec(:,2)==6);
jul=find(time_vec(:,2)==7);
agos=find(time_vec(:,2)==8);
sep=find(time_vec(:,2)==9);
oct=find(time_vec(:,2)==10);
nov=find(time_vec(:,2)==11);
dic=find(time_vec(:,2)==12);
length(ene)+length(feb)+length(mar)+length(abr)+length(may)+length(jun)+length(jul)+length(ag
os)+length(sep)+length(oct)+length(nov)+length(dic)

var=per;
var_mean(1,:)=mean(var(ene));
var_mean(2,:)=mean(var(feb));
var_mean(3,:)=mean(var(mar));
var_mean(4,:)=mean(var(abr));
var_mean(5,:)=mean(var(may));
```

```
var_mean(6,:)=mean(var(jun));  
var_mean(7,:)=mean(var(jul));  
var_mean(8,:)=mean(var(agos));  
var_mean(9,:)=mean(var(sep));  
var_mean(10,:)=mean(var(oct));  
var_mean(11,:)=mean(var(nov));  
var_mean(12,:)=mean(var(dic));
```

```
per_mean=var_mean;
```

```
mean(dir)  
mean(per)
```

III.- Rutina Rstudio para análisis retroceso de berma

```
library(sp)
library(raster)
library(rgdal)
library(geosphere)
library(maptools)
library(ggmap)
```

```
setwd("E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos Finales/Datos de entrada a R")
A2000=raster("Playa Bruja Unificado 2000 v2.tif")
A2006=raster("Playa Bruja Unificado 2006 v2.tif")
A2013=raster("Playa Bruja Unificado 2013 v2.tif")
corte=readShapeSpatial("E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos Finales/Datos
de entrada a R/ZE VF.shp")
proj4string(corte)=CRS("+proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0")
projection(A2000) <- CRS("+init=epsg:4326")
projection(A2006) <- CRS("+init=epsg:4326")
projection(A2013) <- CRS("+init=epsg:4326")
A2000=mask(crop(A2000,corte),corte)
A2006=mask(crop(A2006,corte),corte)
A2013=mask(crop(A2013,corte),corte)
writeRaster(x=A2000,filename="E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos
Finales/2000_corte_v2",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=TRUE)
writeRaster(x=A2006,filename="E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos
Finales/2006_corte_v2",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=TRUE)
writeRaster(x=A2013,filename="E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos
Finales/2013_corte_v2",format="GTiff",options="INTERLEAVE=BAND",overwrite=TRUE)
```

#medir las distancias

```
setwd("E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos Finales/Datos de entrada a R")
L2000=readOGR(dsn = ".", layer = "berma 2000 vfinal")
L2006=readOGR(dsn = ".", layer = "berma 2006 vfinal")
L2013=readOGR(dsn = ".", layer = "berma 2013 vfinal")
LCosta=readOGR(dsn = ".", layer = "linea de costa vfinal")#datos de entrada al modelo
proj4string(L2000)
Lbase=readOGR(dsn = ".", layer = "linea base vfinal")
puntos=mask(crop(A2000,Lbase),Lbase)
plot(puntos,col=rainbow(10))
Pbase=data.frame(rasterToPoints(puntos))
coordinates(Pbase)=c("x","y")
proj4string(Pbase)=CRS("+proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84 +towgs84=0,0,0")
proj4string(Pbase)
projection(Pbase) <- CRS("+init=epsg:4326")
```

#Se calculan las distancias.

```
D2000=dist2Line(Pbase,L2000,distfun = distHaversine)[,1]
D2006=dist2Line(Pbase,L2006,distfun = distHaversine)[,1]
D2013=dist2Line(Pbase,L2013,distfun = distHaversine)[,1]
DLC=dist2Line(Pbase,LCosta,distfun = distHaversine)[,1]#datos de entrada al modelo
```

#Se Guardan las distancias en una lista.

```
DISTANCIAS=list(data.frame(Dis2000=D2000,Dis2006=D2006,Dis2013=D2013,DisLC=DLC))
save(DISTANCIAS,file = "DISTANCIASv2.rda")
```

#Se carga la lista (Archivo .rda).

```
setwd("E:/Espol/Materia Integradora/PROYECTOS_GIS/Datos Finales/Datos de entrada a R ")
load("DISTANCIASv2.rda")
```

#DISTANCIAS.

```
summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis2000)
summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis2006)
summary(DISTANCIAS[[1]]$Dis2013)
summary(DISTANCIAS[[1]]$DisLC)
```

#Se almacenan todas las distancias en un data.frame.

```
data=data.frame(dist_2000=DISTANCIAS[[1]]$Dis2000,dist_2006=DISTANCIAS[[1]]$Dis2006,dist_2013=DISTANCIAS[[1]]$Dis2013,dist_Lc=DISTANCIAS[[1]]$DisLC)
```

#Se grafica un BOXPLOT.

```
boxplot(data,ylab="metros",main="Distancia desde linea Base hasta la linea de Berma",col=c("#ffcccc","#ffffcc","#99ccff"))
```

```
stripchart(data,col=c("red"),vertical=T,pch=19,cex=0.5,add=T)
```

#Se crea una matriz con las distancias para poder operar entre ellas.

```
DIST=matrix(c(min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2000)-min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2013),
              min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2006)-min(DISTANCIAS[[1]]$Dis2013),
              mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2000)-mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2013),
              mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2006)-
              mean(DISTANCIAS[[1]]$Dis2013)),ncol=2,byrow = T)
```

#Se muestran solo las distancias minimas y promedios.

```
row.names(DIST)=c("mean","min")
colnames(DIST)=c("2000~2013","2006~2013")
DIST
dist_2000=DISTANCIAS[[1]]$Dis2000
```

#Poder extraer las zonificaciones con mayor erosion

```
D20002013=DISTANCIAS[[1]]$Dis2000-DISTANCIAS[[1]]$Dis2013
```

```
D20062013=DISTANCIAS[[1]]$Dis2006-DISTANCIAS[[1]]$Dis2013
```

```
D20002006=DISTANCIAS[[1]]$Dis2000-DISTANCIAS[[1]]$Dis2006
```

```
DISTANCIAS1=list(data.frame(C=coordinates(Pbase),Dy20002013=D20002013,Dy20002006=D20002006,Dy20062013=D20062013))
```

```
save(DISTANCIAS1,file = "DISTANCIASvfinal.rda")
```

```
datafinal=data.frame(longitud=DISTANCIAS1[[1]]$C.x,latitud=DISTANCIAS1[[1]]$C.y,df20002013=DISTANCIAS1[[1]]$Dy20002013,df20002006=DISTANCIAS1[[1]]$Dy20002006,df20062013=DISTANCIAS1[[1]]$Dy20062013,dist_Lc=DISTANCIAS[[1]]$DisLC,
```

```
dist_2000=DISTANCIAS[[1]]$Dis2000,dist_2006=DISTANCIAS[[1]]$Dis2006,dist_2013=DISTANCIAS[[1]]$Dis2013)
```

```
write.table(datafinal,file = "Procesamiento de datos.csv", sep = ",")
```

IV.- Mapa batitopo zona de estudio Libertador Bolívar

Representación del archivo denominado batitopo, realizado con la unión de la batimetría vectorizada de la carta nautica IOA 105 y la topografía levantada en 2019:

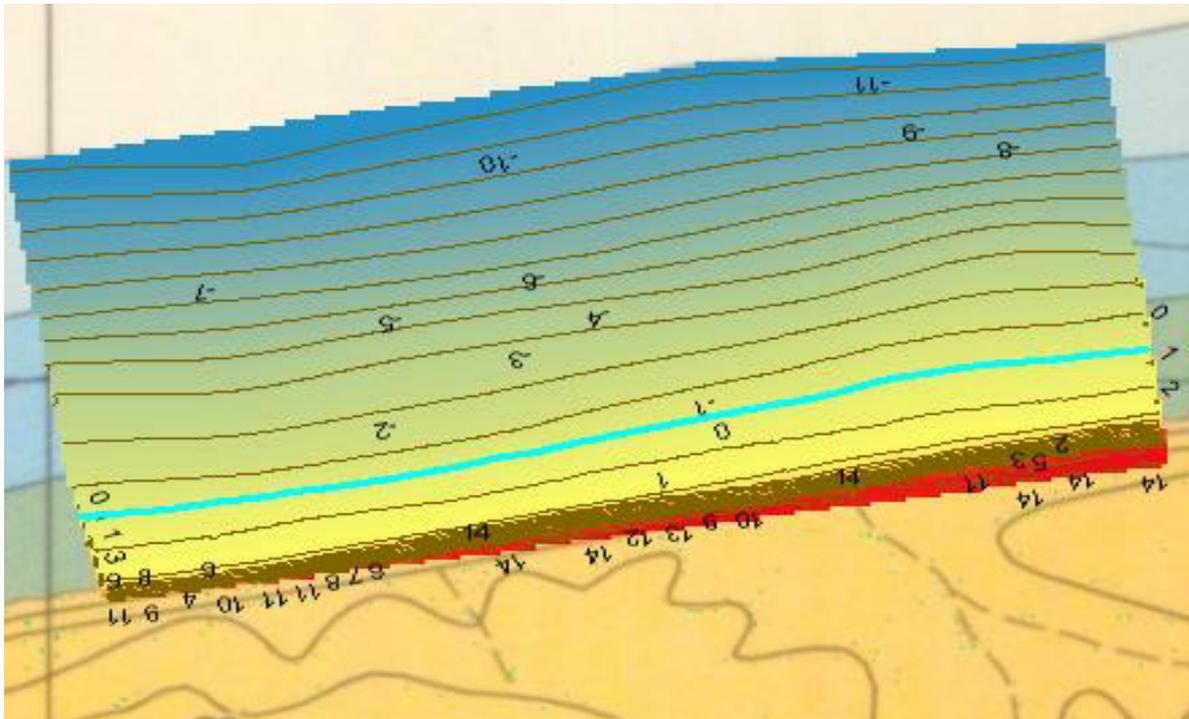
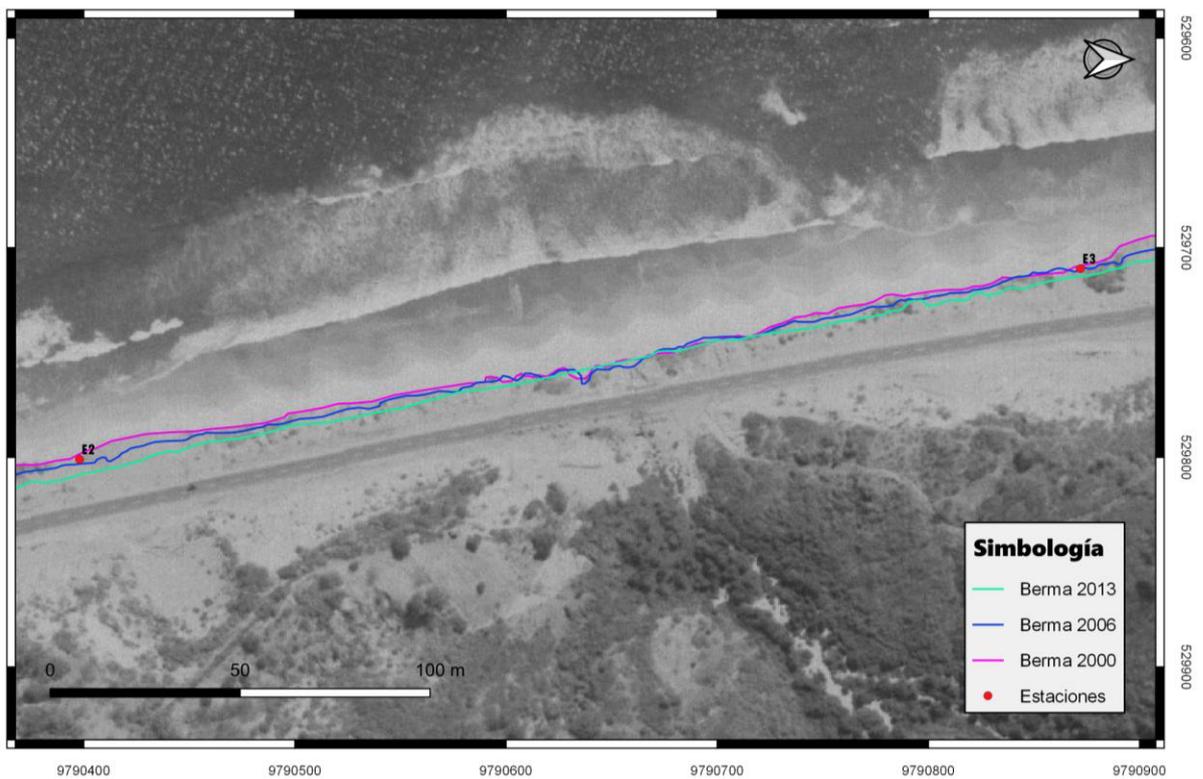
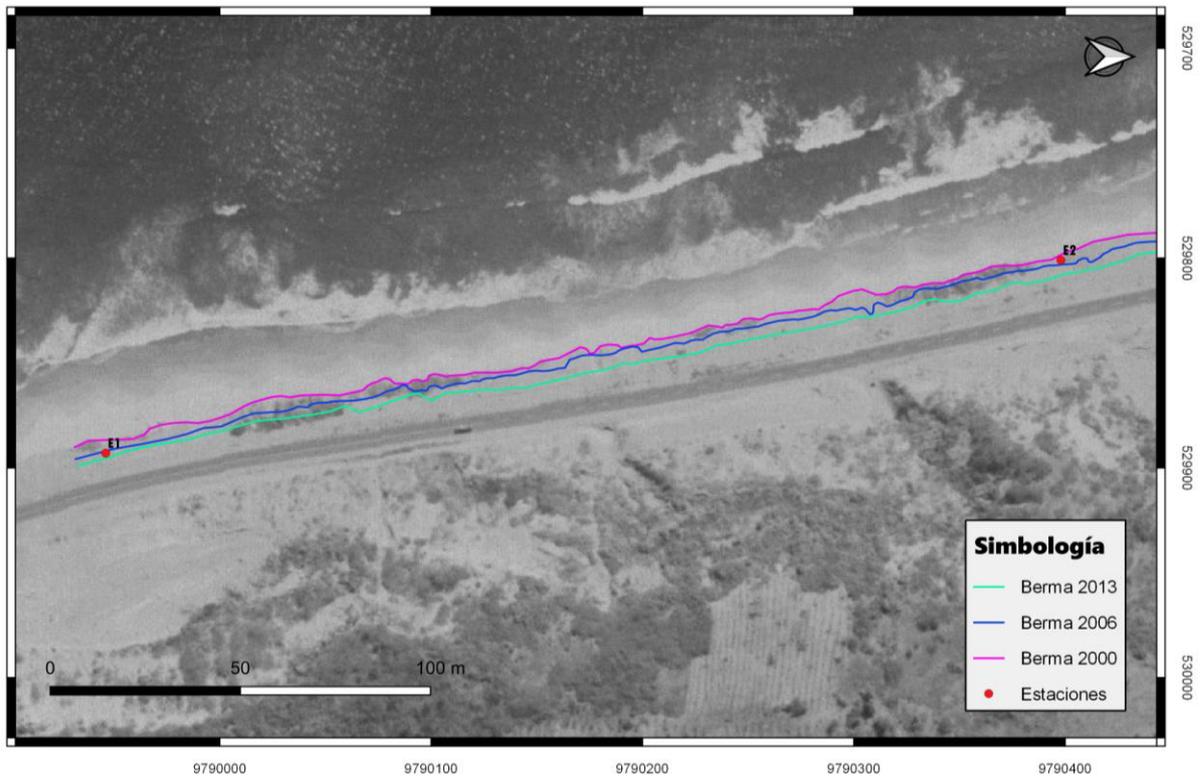
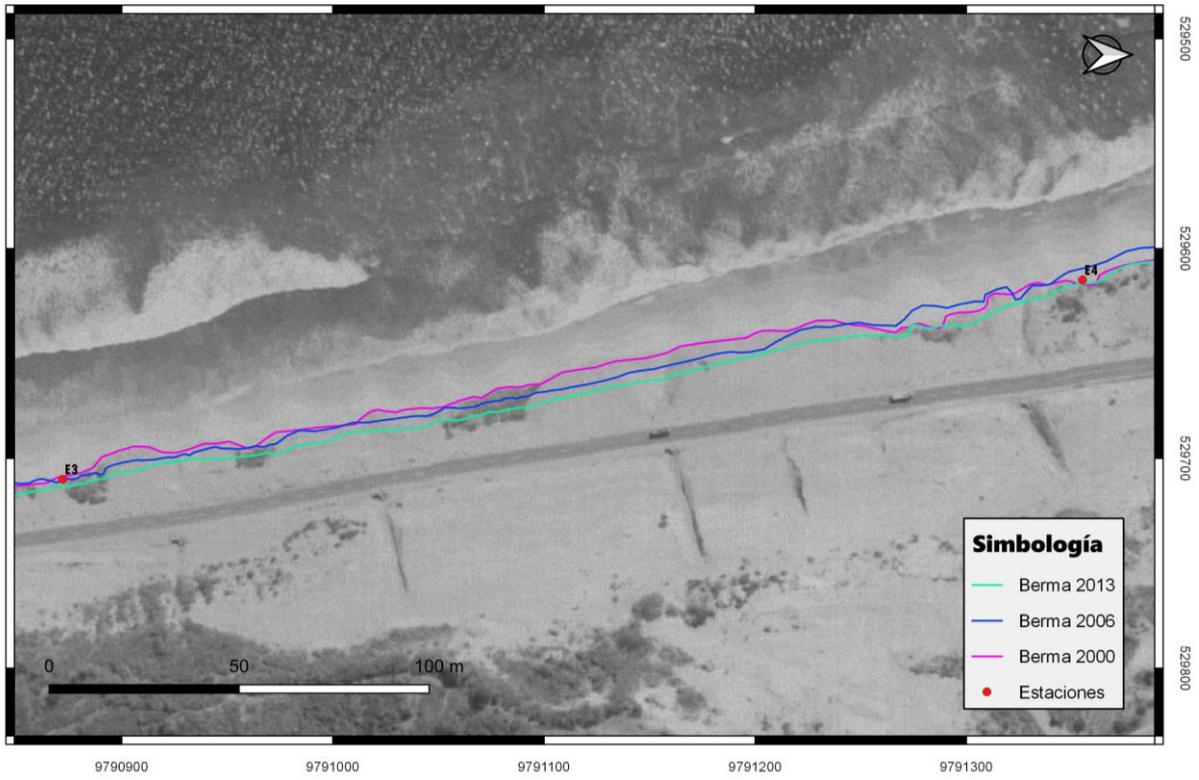


Imagen del archivo batitopo, elaborada por los autores de este proyecto.

V.- Mapas de evolución de la berma

Evolución de la Berma en Playa Bruja





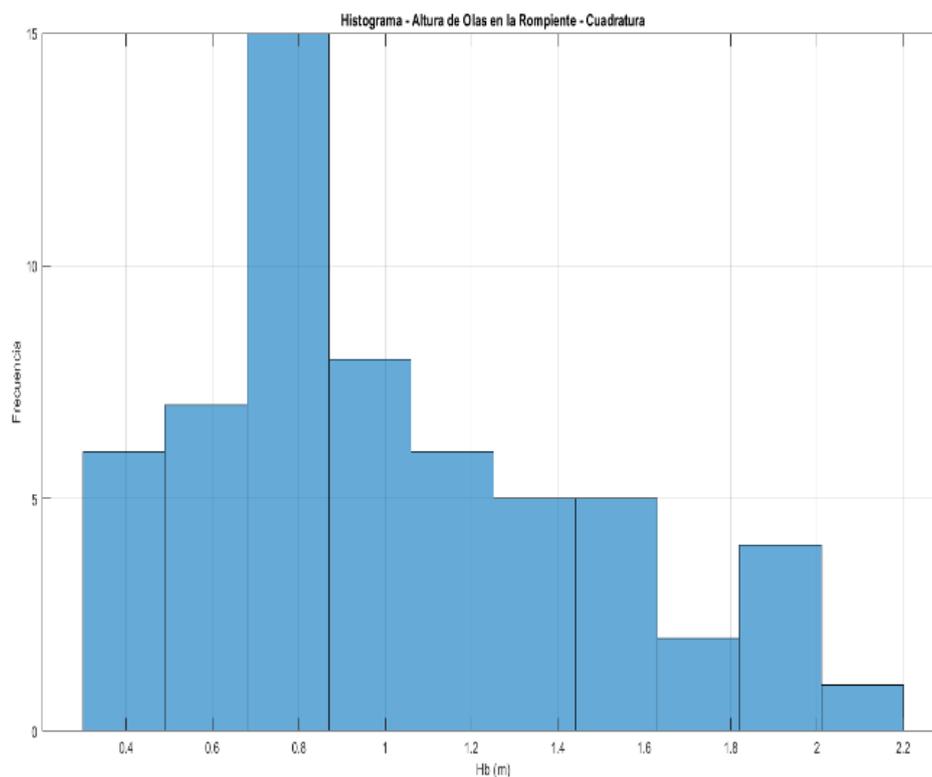
VI.- Salidas de campo

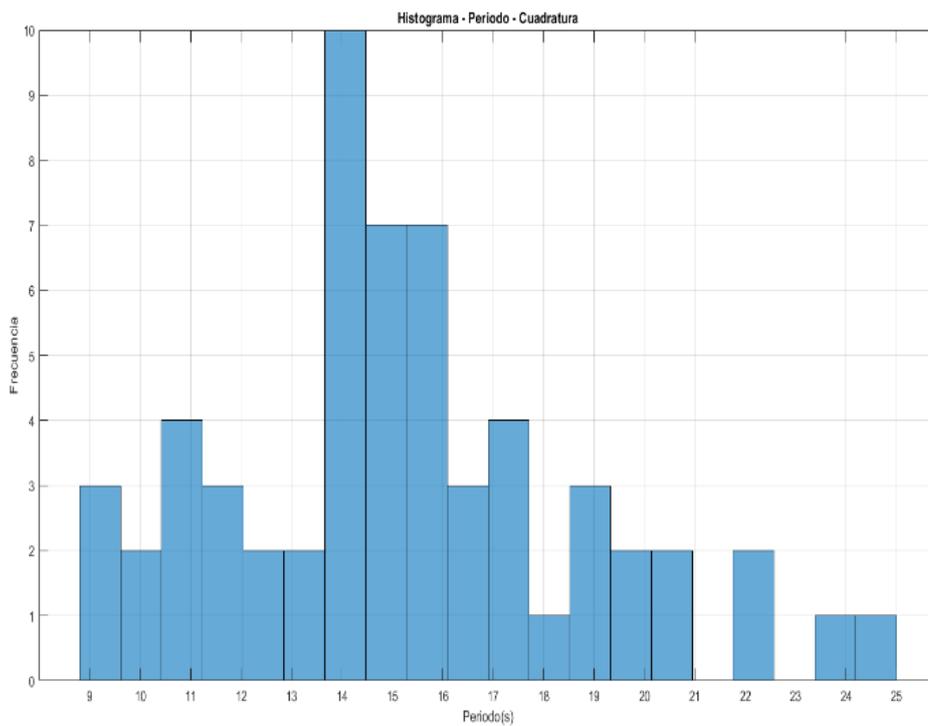
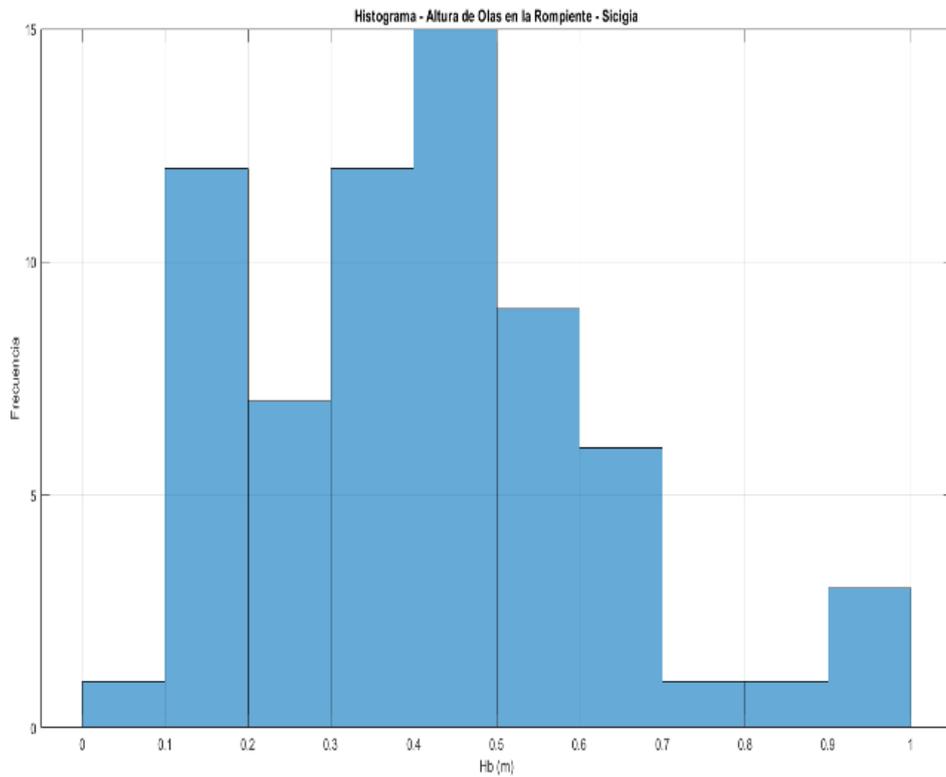
Altura de las olas observadas en cuadratura y sicigia y el promedio de altura para cada estación.

H_b (m)			
Estación	Cuadratura	Sicigia	Promedio
E1	0.50	0.30	0.40
E2	1.57	0.94	1.25
E3	1.20	0.35	0.77
E4	1.07	0.45	0.76
E5	0.80	0.53	0.66
Promedio Total	1.03	0.51	0.77

De las salidas de campo realizadas el 8 de junio (Cuadratura) y el 15 de junio (sicigia) del 2019 se obtiene los siguientes histogramas:

Altura de ola en la rompiente

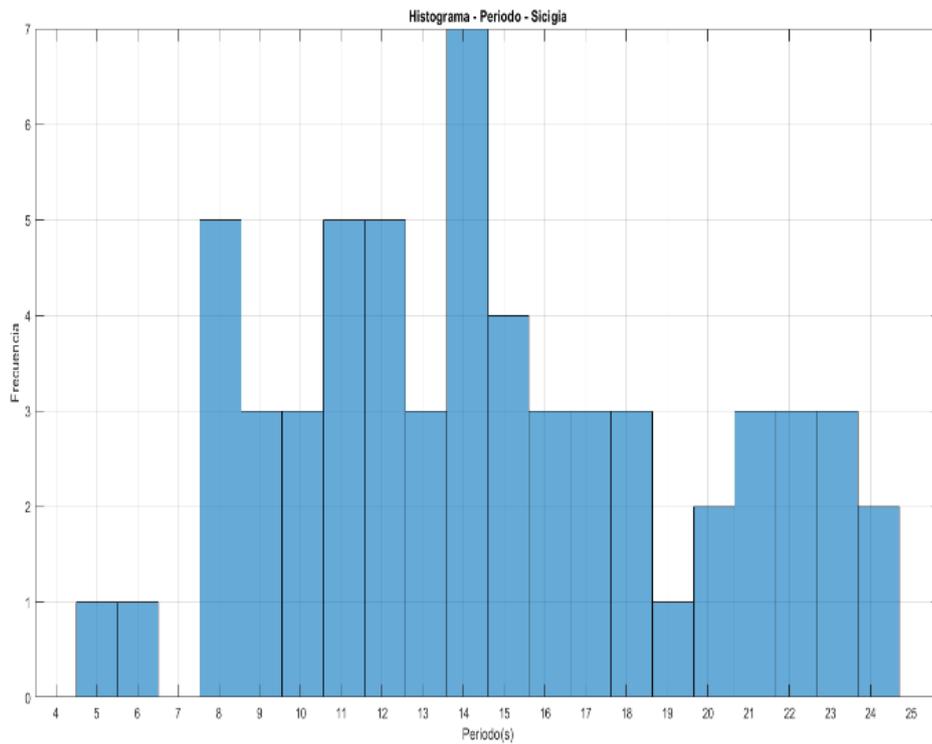




Histograma de los periodos mas representativos del oleaje observado para la salida de campo de junio del 2019.

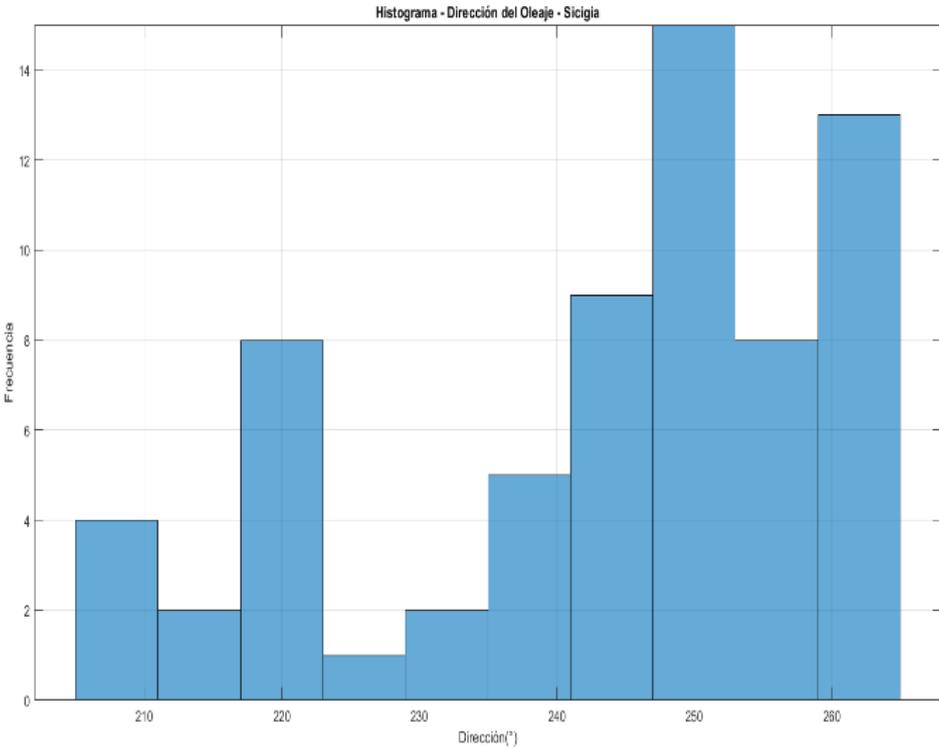
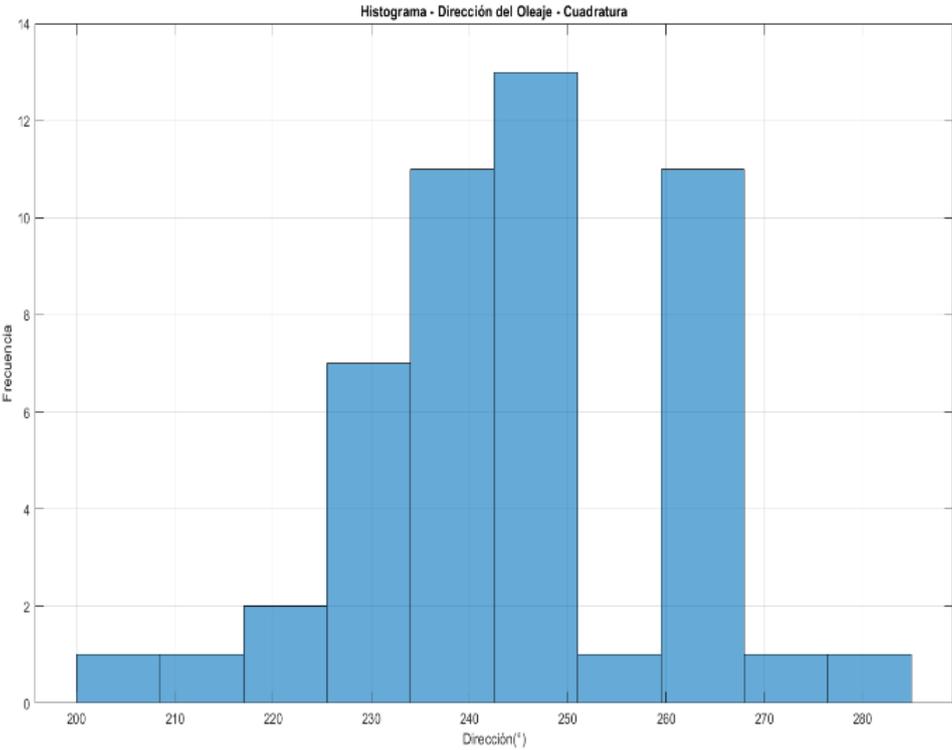
Periodo

Periodo del oleaje observado durante el 8 y 15 de junio del 2019



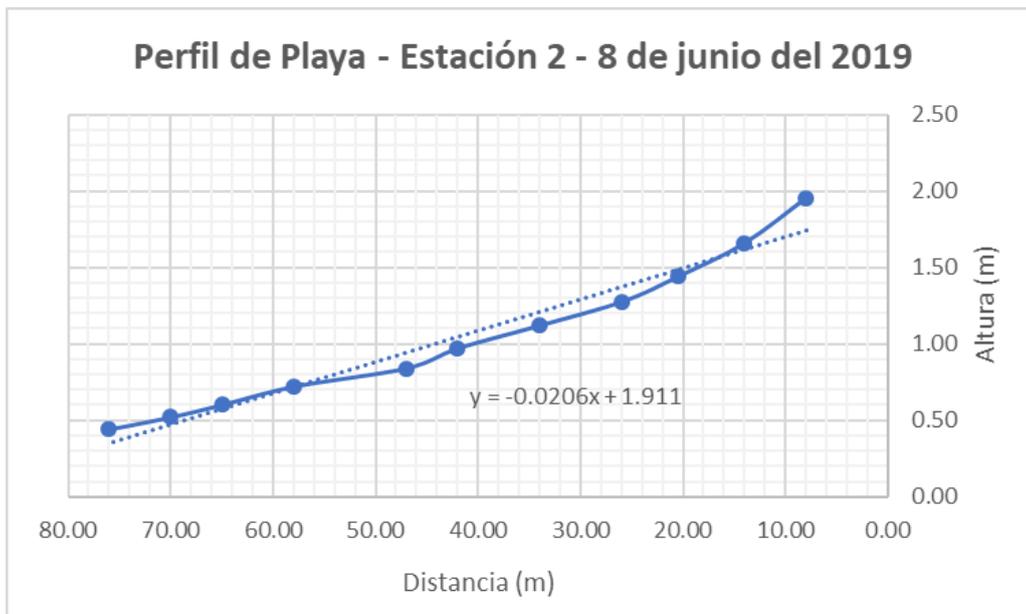
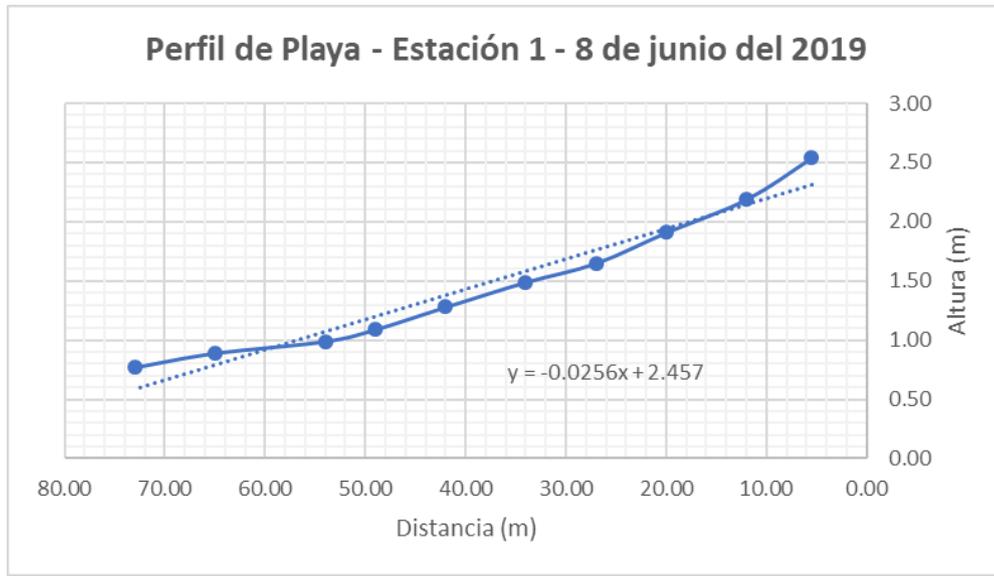
Periodo (s)			
Estaciones	Cuadratura	Sicigia	Promedio
E1	15.19	15.49	15.34
E2	18.55	10.59	14.57
E3	12.16	11.65	11.905
E4	14.95	13.95	14.45
E5	15.33	17.61	16.47
Promedio Total	15.236	13.858	14.547

Dirección del oleaje mas frecuente durante las salidas de cuadratura y sicigia correspondientes al 8 de junio y 15 de junio del 2019 respectivamente.

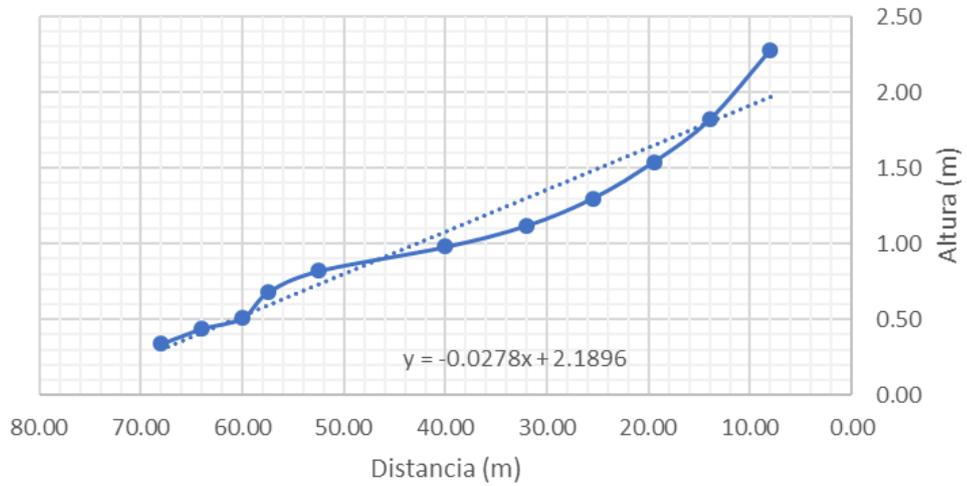


Perfiles de playa

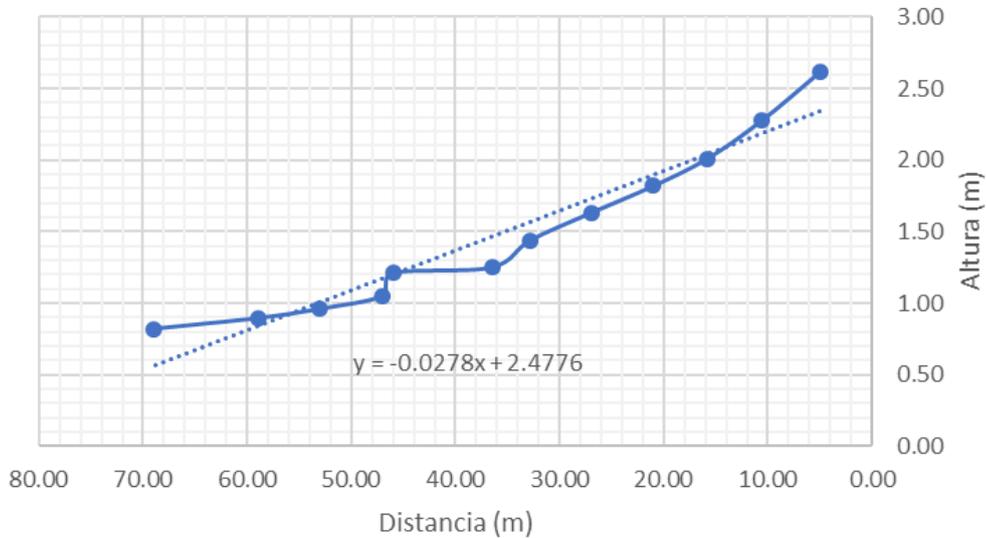
Cuadratura 8 de junio del 2019

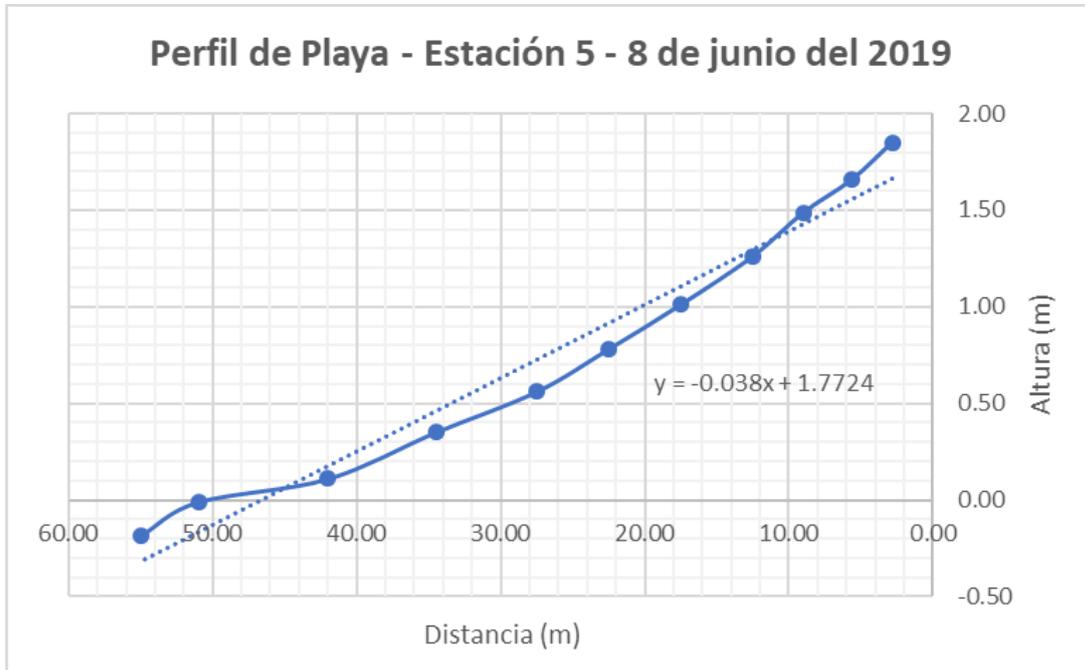


Perfil de Playa - Estación 3 - 8 de junio del 2019

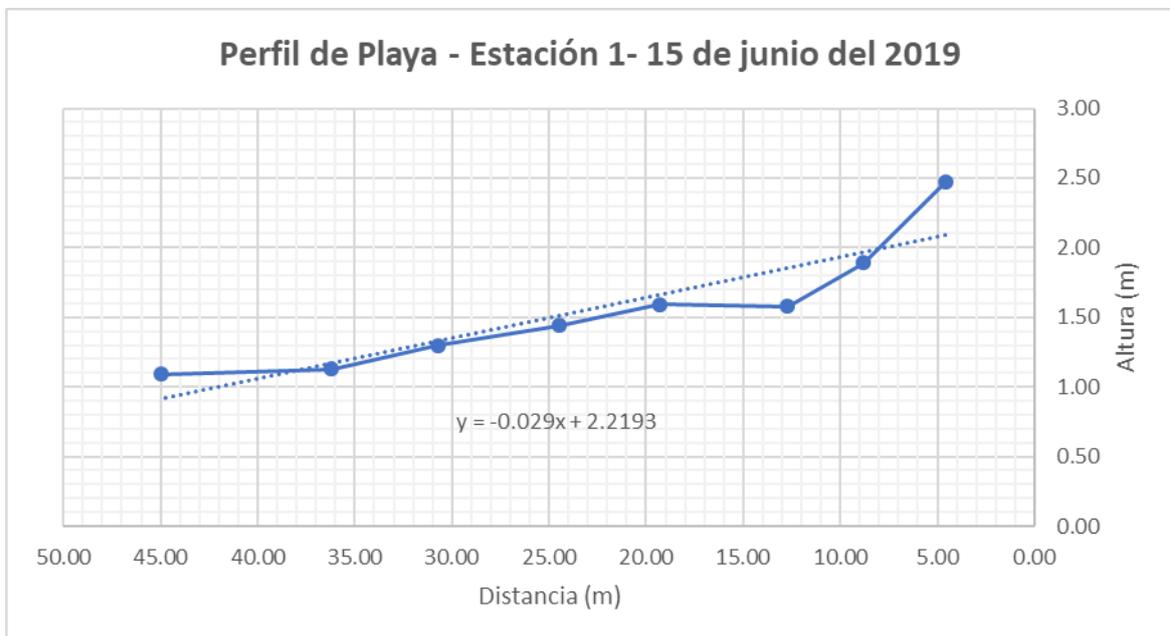


Perfil de Playa - Estación 4 - 8 de junio del 2019

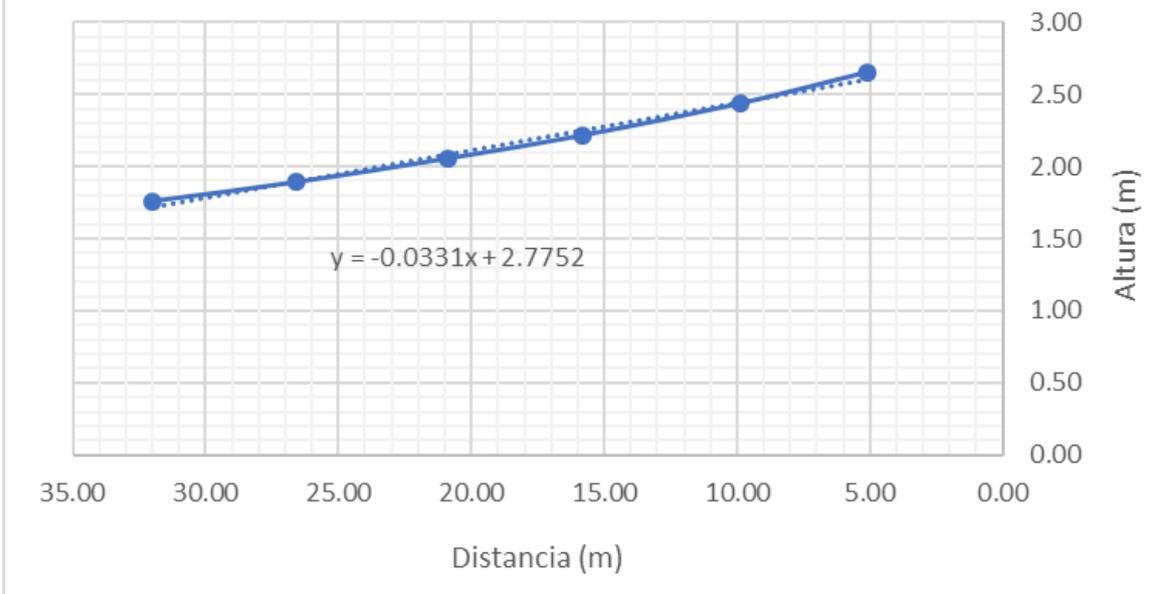




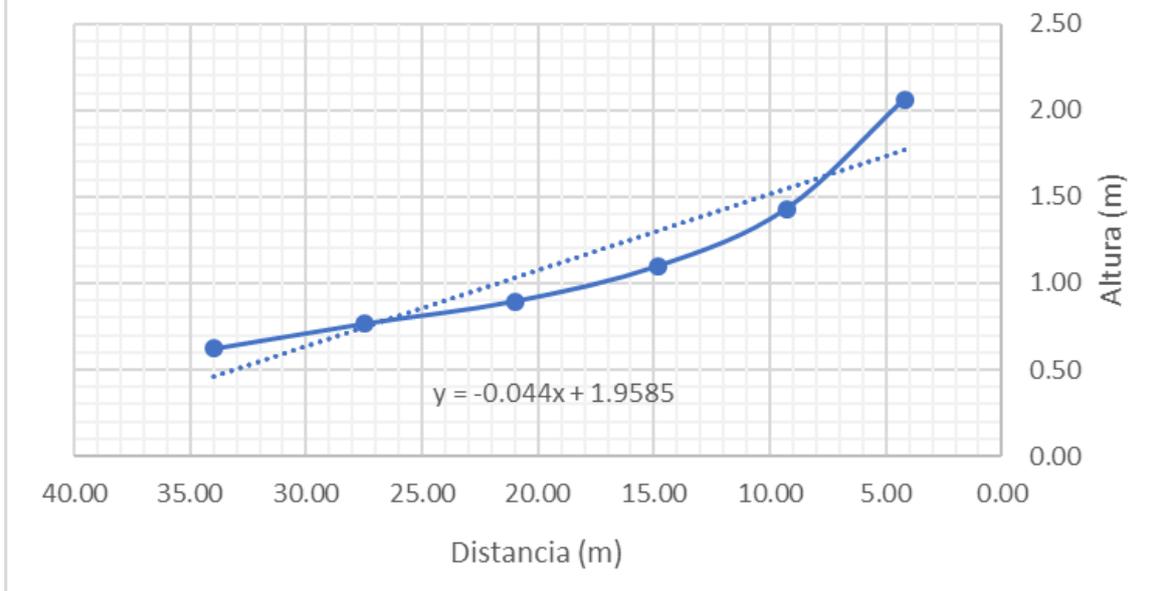
Sicigia 15 de junio del 2019



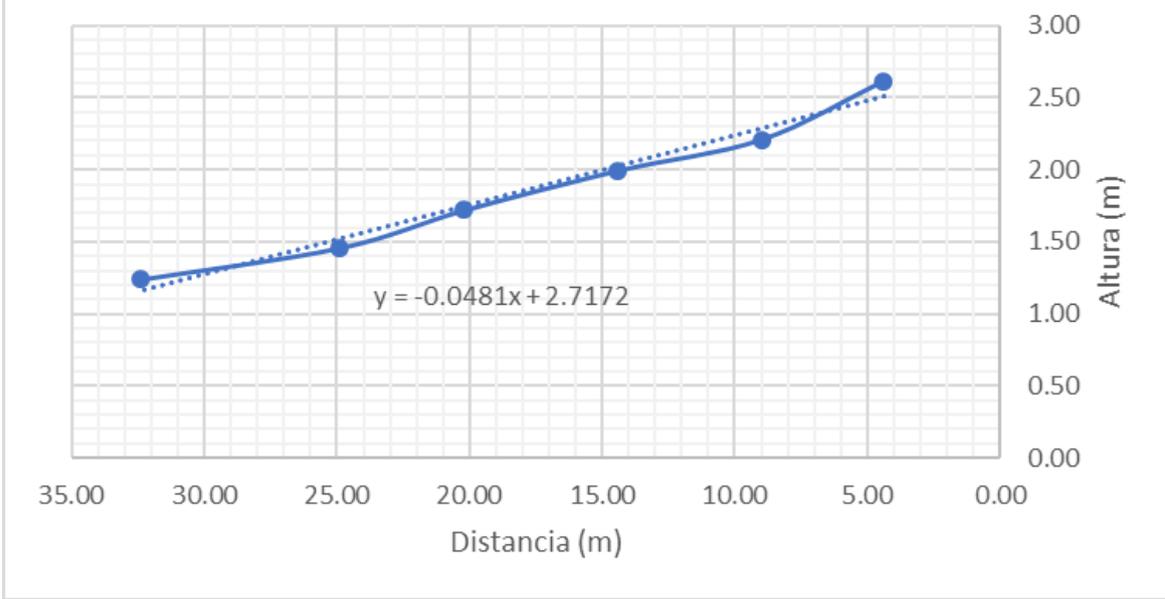
Playa Bruja - Estación 2 - 15 de junio del 2019



Perfil de Playa - Estación 3 - 15 de junio del 2019



Perfil de Playa - Estación 5 - 15 de junio del 2019



Granulometría

Fecha	Estación	Zona	D ₈₄	D ₁₆	$\sqrt{D_{84}/D_{16}}$	D ₅₀
15/06/2019	5	BAJA	0.40	0.14	1.72	0.17
		MEDIA	0.37	0.15	1.57	0.19
		ALTA	0.34	0.13	1.64	0.17
	4	BAJA	0.39	0.14	1.65	0.24
		MEDIA	0.19	0.14	1.15	0.17
		ALTA	0.38	0.16	1.54	0.25
	3	BAJA	0.05	0.13	0.59	0.18
		MEDIA	0.39	0.16	1.55	0.26
		ALTA	0.42	0.13	1.79	0.36
	2	BAJA	0.38	0.14	1.65	0.19
		MEDIA	0.38	0.16	1.56	0.23
		ALTA	0.36	0.16	1.49	0.18
	1	BAJA	0.39	0.16	1.59	0.28
		MEDIA	0.40	0.17	1.55	0.29
		ALTA	0.39	0.14	1.69	0.28
8/06/2019	5	BAJA	0.38	0.15	1.61	0.21
		MEDIA	0.34	0.14	1.57	0.17
		ALTA	0.38	0.16	1.56	0.23
	4	BAJA	0.39	0.14	1.65	0.24
		MEDIA	0.19	0.14	1.15	0.17
		ALTA	0.38	0.16	1.54	0.25
	3	BAJA	0.36	0.15	1.57	0.18
		MEDIA	0.39	0.16	1.54	0.25
		ALTA	0.42	0.13	1.79	0.36
	2	BAJA	0.40	0.17	1.53	0.32
		MEDIA	0.39	0.14	1.69	0.29
		ALTA	0.39	0.16	1.55	0.28
	1	BAJA	0.37	0.14	1.63	0.18
		MEDIA	0.38	0.15	1.60	0.22
		ALTA	0.40	0.17	1.52	0.32
7/07/2018	3	BAJA	0.38	0.09	2.06	0.15
		MEDIA	0.37	0.15	1.56	0.18
		ALTA	0.39	0.16	1.53	0.28
	2	BAJA	0.39	0.09	2.08	0.20
		MEDIA	0.36	0.12	1.73	0.18
		ALTA	0.38	0.16	1.55	0.24
	1	BAJA	0.34	0.13	1.62	0.17
		MEDIA	0.39	0.17	1.53	0.28
		ALTA	0.40	0.18	1.51	0.32

16/06/2018	3	BAJA	0.38	0.12	1.75	0.24
		MEDIA	0.39	0.15	1.59	0.28
		ALTA	0.40	0.17	1.52	0.31
	2	BAJA	0.39	0.16	1.55	0.26
		MEDIA	0.39	0.15	1.59	0.25
		ALTA	0.40	0.17	1.52	0.31
	1	BAJA	0.37	0.12	1.80	0.18
		MEDIA	0.39	0.16	1.58	0.28
		ALTA	0.40	0.18	1.51	0.32

Transporte litoral

Fecha	Estación	Fase	Q _{neto}	
		Lunar	m ₃ /s	m ₃ /día
16/Junio/2018	1	S	0.004	309
7/Julio/2018	1	C	0.002	144
21/Julio/2018	1	C	0.005	453
14/Agosto/2018	1	S	0.006	514
8/Junio/2019	1	S	0.002	144
15/Junio/2019	1	C	0.004	309
Promedio	1		0.004	312
16/Junio/2018	2	S	0.005	444
7/Julio/2018	2	C	0.011	987
21/Julio/2018	2	C	0.008	649
14/Agosto/2018	2	S	0.004	365
8/Junio/2019	2	S	0.011	987
15/Junio/2019	2	C	0.005	444
Promedio	2		0.007	646
16/Junio/2018	3	S	0.004	316
7/Julio/2018	3	C	0.001	81
21/Julio/2018	3	C	0.003	294
14/Agosto/2018	3	S	0.003	235
8/Junio/2019	3	S	0.001	81
15/Junio/2019	3	C	0.004	316
Promedio	3		0.003	220
8/Junio/2019	4	S	0.001	124
15/Junio/2019	4	C	0.018	1515
Promedio	4		0.009	820

8/Junio/2019	5	S	0.002	151
15/Junio/2019	5	C	0.007	631
Promedio	5		0.005	391

S 'Sicigia'

C 'Cuadratura'

VII.- Fotografías salidas de campo



Levantamiento topográfico con uso de vehículos aéreos no tripulados



Levantamiento de perfil de playa con nivel y estadia



Uso de la estadia por alumnos de Oceanografía Costera 2019 I Término



Vuelo de dron Phantom 4 Pro para levantamiento topográfico



Medición de corrientes litorales en la zona de rompiente