



# **Análisis de los efectos del oleaje (SEA y SWELL) en los procesos morfodinámicos de la costa en el Golfo de Morrosquillo**

**Francisco Antonio Mercado Martínez**

Universidad del Norte  
Área de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias  
Barranquilla, Colombia  
2021

# **Análisis de los efectos del oleaje (SEA y SWELL) en los procesos morfodinámicos de la costa en el Golfo de Morrosquillo**

**Francisco Antonio Mercado Martínez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Geólogo**

Director (a):

Ph.D. Luis Jesús Otero Díaz

Línea de Investigación:

Hidrodinámica y Erosión Costera

Universidad del Norte

Area de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Geo-Ciencias

Barranquilla, Colombia

2021

*A mi familia y amigos más cercanos.*

## **Agradecimientos**

A mi familia, especialmente a Luz Martínez Borja, a Carlos Reales Martínez y Danis Mestra Rojas, por creer en mí y darme todo su apoyo para alcanzar cada una de mis metas.

A mis amigos más cercanos, Sharon Guerra Ayazo, Cristian Morales Galván, Abraham Calvano Lora, Diego Betancur Cervantes, Jorge Panesso Cárdenas, Fernando Begambre Gonzáles, Johnny Mejía Coronel, María Mosquera Peña y Johan Casadiego Estevez por acompañarme cada día desde la distancia.

A mi mentor PhD. Luis Otero Díaz, por acompañarme y dirigirme en este trabajo, y aportar sus conocimientos para guiarme en el estudio de las ciencias del mar.

Al Departamento de Física y Geociencias de la Universidad del Norte, y los amigos que me ha dejado el estudio de la Geología.

## **Resumen**

Las zonas costeras desde hace décadas se presentan como espacios de vital importancia para territorios delimitados por el mar. Al ser zonas con gran dinamismo, estas se exponen a procesos que modifican su morfología. Así, con el objetivo de conocer la importancia del oleaje SEA y SWELL en los procesos morfodinámicos y la evolución de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo, a partir de series temporales de 40 años y el procesamiento de estas, se modelaron los estados de mar y las magnitudes de viento más probables y energéticas empleando el modelo SWAN. Con la ayuda de la extensión DSAS, se realizó un análisis multitemporal de línea de costa para los años 2010-2018 para determinar las tasas de erosión y acreción. De acuerdo con lo obtenido, se evidencia al Golfo de Morrosquillo como un área que en mayor proporción de su extensión no presenta cambios considerables en su línea de costa. Sin embargo, se presenta la zona sur del Golfo como la más dinámica y crítica dado que registra las mayores tasas de erosión y acreción, asociándosele un mayor aporte del oleaje tipo SEA. Mientras que la zona central y la zona norte del Golfo en mayor proporción no manifiestan cambios, aunque es posible evidenciar la presencia de tramos de costa con tasas de erosión y acreción moderada asociándoles a estas zonas un mayor aporte del oleaje tipo SEA.

**Palabras clave:** Oleaje SEA, oleaje SWELL, Modelo SWAN, procesos morfodinámicos, análisis multitemporal de línea de costa.

## **Abstract**

Coastal areas have been presented for decades as areas of vital importance for territories delimited by the sea. As they are areas with great dynamism, they are exposed to processes that modify their morphology. In this way, with the objective of knowing the importance of the SEA and SWELL waves in the morphodynamic processes and the evolution of the coastline of the Gulf of Morrosquillo, from time series of 40 years and their processing, the sea states and the most probable and energetic wind magnitudes were modeled using the SWAN model. With the help of the DSAS extension, a multi-temporal shoreline analysis was conducted for the years 2010-2018 to determine erosion and accretion rates. According to what was obtained, the Gulf of Morrosquillo is evidenced as an area that in a greater proportion of its extension does not present considerable changes in its coastline. However, the southern part of the Gulf is presented as the most dynamic and critical, since it registers the highest rates of erosion and accretion, associated with a greater contribution from SEA-type waves. On the other hand, the central zone and the northern zone of the Gulf in a greater proportion do not show changes, although it is possible to show the presence of sections of coast with moderate erosion and accretion rates, associating these zones with a greater contribution of SEA-type waves.

**Keywords: SEA waves, SWELL waves, SWAN model, morphodynamic processes, multi-temporal shoreline analysis.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>5</b>
3.1    Objetivo General .....	5
3.2    Objetivos específicos .....	5
<b>4. Área de estudio .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Datos y Métodos .....</b>	<b>8</b>
5.1    Clima Marítimo .....	8
5.2    Análisis direccional y análisis de probabilidad conjunta .....	8
5.3    Modelo SWAN.....	9
5.4    Análisis multitemporal de línea de costa.....	11
5.4.1    Digitalización de líneas de costas.....	11
5.4.2    Cálculo y análisis de las tasas de erosión y acreción .....	11
<b>6. Resultados.....</b>	<b>12</b>
6.1    Clima Marítimo .....	12
6.1.1    Oleaje .....	12
6.1.2    Viento.....	15
6.2    Análisis direccional y análisis de probabilidad conjunta .....	17
6.3    Modelo SWAN.....	18
6.3.1    Oleaje tipo SWELL.....	18
6.3.2    Oleaje tipo SEA.....	20
6.3.3    Oleaje SEA-SWELL .....	22
6.4    Análisis multitemporal de línea de costa.....	24
6.5    Relación oleaje (SEA y SWELL) y la evolución de línea de costa.....	25
6.5.1    Zona sur.....	26
6.5.2    Zona central.....	29
6.5.3    Zona norte .....	32

<b>7. Discusiones.....</b>	<b>35</b>
<b>8. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>38</b>
<b>A. Anexo: Análisis de probabilidad conjunta.....</b>	<b>40</b>
<b>B. Anexo: Condiciones medias del oleaje SWELL.....</b>	<b>41</b>
<b>C. Anexo: Condiciones extremas del oleaje SWELL.....</b>	<b>42</b>
<b>D. Anexo: Condiciones medias del oleaje SEA.....</b>	<b>43</b>
<b>E. Anexo: Condiciones extremas del oleaje SEA.....</b>	<b>44</b>
<b>F. Anexo: Condiciones medias del oleaje SEA-SWELL.....</b>	<b>45</b>
<b>G. Anexo: Condiciones extrema del oleaje SEA-SWELL.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>47</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1:</b> Ubicación del Golfo de Morrosquillo .....	6
<b>Figura 2:</b> Malla computacional empleada por el modelo SWAN. Las + indican la ubicación de la serie del oleaje propagada en la isobata de 4 metros. ....	10
<b>Figura 3:</b> Serie de tiempo de Hs y rosa de oleaje (superior). Serie de tiempo de Tp y rosa de periodo pico (inferior). ....	13
<b>Figura 4:</b> Histograma y distribución acumulada de Hs (superior). Histograma y distribución acumulada de Tp (inferior). ....	14
<b>Figura 5:</b> Serie de tiempo de Vel y rosa de viento. ....	15
<b>Figura 6:</b> Histograma y distribución acumulada de Vel. ....	16
<b>Figura 7:</b> Análisis multitemporal de línea de costa del Golfo de Morrosquillo. ....	17
<b>Figura 8:</b> Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona sur del Golfo de Morrosquillo. ....	26
<b>Figura 9:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 2, 10 y 13 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	27
<b>Figura 10:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 2, 10 y 13 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	28
<b>Figura 11:</b> Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona central del Golfo de Morrosquillo. ....	29
<b>Figura 12:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 28, 44 y 49 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	30
<b>Figura 13:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 28, 44 y 49 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	31
<b>Figura 14:</b> Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona norte del Golfo de Morrosquillo. ....	32
<b>Figura 15:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 58 y 63 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	33
<b>Figura 16:</b> Hs obtenidas en los puntos de registro 58 y 63 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas. ....	34

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1:</b> Estadísticos básicos de Hs.....	13
<b>Tabla 2:</b> Estadísticos básicos de Tp.....	14
<b>Tabla 3:</b> Estadísticos básicos de Vel. ....	16
<b>Tabla 4:</b> Estados de mar del oleaje tipo SWELL....	17
<b>Tabla 5:</b> Velocidades de viento del oleaje tipo SEA.....	18
<b>Tabla 6:</b> Porcentajes del tiempo de las direcciones modeladas.....	27

---

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad SI</b>
$H_s$	Altura significativa de ola	m
$T_p$	Período pico	s
$Vel$	Velocidad del viento	$\frac{m}{s}$

### Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
$LLR$	Linear regression rate

# 1. Introducción

Las zonas costeras en el marco general de los litorales son consideradas como aquellas áreas que se extienden desde las dunas costeras hasta la plataforma continental donde tiene inicio la interacción oleaje – fondo marino (Casarín et al., 2014; Marengo, 2020). Actualmente, estas zonas se denotan como espacios de desarrollo tanto ambiental como de generación de recursos económicos dado que las costas suelen contener ecosistemas con gran productividad y diversidad. De igual manera, las costas están representadas como el área de mayor dinamismo dentro del sistema costero como resultado de la interacción de los vientos, olas y mareas, las cuales modifican la morfología de esta y transportan el material sedimentario que conforman las playas (Guerrero, 2017).

Las costas al ser un sistema geomorfológico muy dinámico se encuentran expuestas a procesos que producen cambios constantes en diversas escalas espaciales y temporales (Crowell et al., 1991; Rangel-Buitrago et al., 2015), tales como la erosión y acreción que resultan de eventos naturales (oleaje, nivel del mar, transporte de sedimento) y de la actividad antrópica desarrollada en estas áreas. El conocimiento más detallado sobre la dinámica costera debe abarcar análisis ligados con las variables oceanográficas correspondientes a la zona de estudio (Molina et al., 1994). Frente a esto, (Vega, 2017) afirma que el agente responsable de las variaciones de las características morfológicas e hidrodinámicas de un área litoral es el oleaje. Sin embargo, para la obtención de regímenes de oleaje, Colombia no posee un adecuado sistema de monitoreo en cuanto a cobertura espacial y temporal. Por esta razón, los diversos programas de retroanálisis de oleaje, basados en la reconstrucción de series de tiempo de estados de mar mediante el empleo de modelos numéricos y técnicas de asimilación de datos, se convierten en una alternativa muy potente para la caracterización del oleaje en zonas donde existen limitaciones de información instrumental de esta variable.

Estudios recientes con respecto a la dinámica costera, basados en series de reanálisis de oleaje, como los de (Osorio et al., 2009), (Escobar, 2011), (Restrepo et al., 2012), (Guerrero, 2017) han sido clave para el entendimiento de la hidrodinámica de las costas del Caribe colombiano de acuerdo con los patrones de variabilidad climatológica. En adición, (Rangel-Buitrago et al., 2015) demostraron cuáles eran las tasas de erosión y acreción a lo largo de la costa Caribe y sus posibles causas. No obstante, es necesario destacar el aporte significativo de los modelos y herramientas usadas para el desarrollo de estas investigaciones, puesto que con la certeza de que los cambios evidenciados en las costas están relacionados con las características hidrodinámicas y ciertos procesos que tienen lugar en las mismas, han ayudado a entender y predecir los posibles efectos que sufrirán las costas (Marengo, 2020).

Así mismo, en la costa Caribe la erosión se ha estado presentando y convirtiendo como la principal problemática ambiental que afecta a esta área litoral en los últimos años, siendo amenazante para toda actividad productiva y poblaciones aledañas (Rangel, 2005; (PNUMA), 2009; Restrepo et al., 2012). Más específicamente, el Golfo de Morrosquillo por sus características morfológicas se evidencia como una zona que posee condiciones aptas para la propagación del oleaje que proviene de aguas profundas (Molina et al., 1994)., conociendo aun así el papel importante que posee el Archipiélago de San Bernardo en la disipación de la energía del oleaje. Es clave entender de igual manera el enfoque del oleaje mismo, diferenciando entre el oleaje tipo SWELL que viaja grandes distancias desde la zona de generación (aguas profundas) y el oleaje tipo SEA (local) que se genera como resultado de la acción del viento en un lugar específico. Teniendo en cuenta lo anterior, con este trabajo se busca conocer la importancia del oleaje SWELL, proveniente por fuera del Golfo, y del oleaje tipo SEA generado dentro del Golfo de Morrosquillo en los procesos morfodinámicos y su relación con la evolución de la línea de costa a partir de un análisis multitemporal de sus cambios recientes.

## 2. Planteamiento del problema

Las zonas costeras se presentan en el tiempo como espacios de vital importancia para territorios delimitados por el mar. Actualmente, estas zonas se denotan como espacios de desarrollo tanto ambiental como de generación de recursos económicos. Teniendo en cuenta que las costas actúan como medios de defensa natural frente a todo tipo de eventos que abarque una alteración de sus condiciones de equilibrio, estos corresponden de igual manera a las zonas de mayor dinamismo en el sistema costero (Restrepo et al., 2012), asociado a cambios en sus condiciones oceanográficas o por intervención antrópica. Sin embargo, conocer y entender estos cambios relacionados a la dinámica costera es clave para el avance en proyectos de interés costero.

Una de las mayores problemáticas a la cual se encuentran expuestos los litorales es la erosión; Las evidencias que son notables a causa de este fenómeno se encuentran directamente relacionadas con variaciones en factores naturales como las condiciones oceanográficas y factores externos como la intervención antrópica (Rangel-Buitrago et al., 2015). Con respecto al modelamiento del sistema costero, el oleaje y los cambios de marea tienen un papel importante puesto que actúan como agentes de erosión, meteorización y acreción, y moldean la costa de acuerdo con los niveles de energía marina y el transporte sedimentario (Restrepo et al., 2012). Por sus características morfológicas, el Golfo de Morrosquillo es fundamentalmente un área que posee condiciones aptas para la propagación del oleaje proveniente de distintas direcciones (Molina et al., 1994). Por tanto, entender y analizar las condiciones hidrodinámicas del Golfo de Morrosquillo es fundamental para interpretar de manera más detallada los procesos morfodinámicos que tienen lugar en él y su relación con la evolución de su línea de costa.

El Golfo de Morrosquillo es un cuerpo de agua importante y resguardado a las condiciones predominantes del oleaje en aguas abiertas del mar Caribe. Cuenta con una línea de costa de 142 km, un área aproximada de 1200 km<sup>2</sup> y una amplitud de 40 km, mientras que su plataforma continental presenta una profundidad aproximada de 35 m (Molina et al., 1994; Ospina & Saavedra, 2015). Por tanto, el Golfo ofrece unas condiciones propicias como fetch natural para la generación de oleaje.

Con el avance en el estudio de la dinámica costera y el aumento progresivo de las tasas de erosión frente al aumento del nivel del mar, muchos investigadores han planteado distintos modelos que buscan reconocer, cuantificar y predecir aquellas fuerzas que afectan y generan cambios significativos en las costas (Marenco, 2020), además del uso de herramientas que permiten evaluar a partir de técnicas geoespaciales estos cambios significativos con respecto a la evolución histórica de la línea de costa. El trabajo desarrollado por (Rangel-Buitrago et al., 2015) ha ayudado a entender cómo se distribuyen las tasas de erosión y acreción a lo largo de toda la costa Caribe colombiana asociando como causas principales el aumento del nivel del mar, eventos extremos, suministro y transporte de sedimento, y la actividad antropogénica. Sin embargo, no hay evidencia de que se hayan discriminado los cambios generados en los procesos morfodinámicos de acuerdo con las condiciones hidrodinámicas de oleaje, bien sea atribuibles al tipo SWELL o al tipo SEA correspondientes a la zona del Golfo de Morrosquillo. De modo que, con este trabajo de grado, a partir de series temporales de reanálisis de 40 años, el modelamiento de oleaje propagado (SWAN) y el uso de la extensión DSAS (Digital Shoreline Analysis System), se buscará analizar las condiciones hidrodinámicas de esta región costera y dar respuesta a el siguiente interrogante:

➤ ¿Cuál es la importancia del oleaje generado fuera (Tipo SWELL) y dentro (tipo SEA) del Golfo de Morrosquillo en los procesos morfodinámicos y su relación con los cambios en la línea de costa?

## **3. Objetivo**

### **3.1. Objetivo General**

Establecer la importancia del oleaje generado por fuera (SWELL) y al interior del Golfo de Morrosquillo (SEA) en los procesos morfodinámicos, y su relación con los cambios en su línea de costa.

### **3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar el clima marítimo de oleaje y viento de la zona a partir de las series temporales de reanálisis WWIII en aguas externas del Golfo de Morrosquillo.
- Analizar y comparar las características hidrodinámicas del oleaje tanto SEA como SWELL en las playas del Golfo de Morrosquillo a partir del modelo de oleaje espectral SWAN.
- Estimar las tasas de erosión y acreción a partir de un análisis multitemporal de línea de costa del Golfo de Morrosquillo mediante la herramienta de extensión DSAS.
- Analizar la relación entre el oleaje SEA y SWELL en los cambios de la línea de costa en el Golfo de Morrosquillo.

## 4. Área de estudio

El Golfo de Morrosquillo se encuentra localizado en la parte sur del mar Caribe, en la costa norte de Colombia, más específicamente, se extiende desde Punta San Bernardo hasta Boca de Tinajones como se observa en la Figura 1, con coordenadas  $9^{\circ}$  y  $10^{\circ}$  latitud N y  $75^{\circ}$  y  $76^{\circ}$  latitud W (Afanador et al., 2007; Ospina & Saavedra, 2015).



**Figura 1.** Ubicación del Golfo de Morrosquillo.

De manera general, el Golfo de Morrosquillo posee los rasgos climatológicos del Caribe colombiano, y debido a su ubicación estratégica, este presenta un régimen climático influenciado directamente por la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la acción de los vientos Alisios que tienen lugar en la región Caribe

(Barreto et al., 1999; Poveda, 2004). El régimen climático de la zona de estudio se caracteriza por presentar tres épocas climáticas en el marco de un año; primero, una época seca comprendida entre los meses de diciembre y abril donde se evidencia un aumento considerable de los vientos predominantemente del NE-N y una disminución en las tasas de precipitación, siendo enero y febrero los meses de menor índice en cuanto a precipitaciones (Guerrero, 2017). Posteriormente una época de transición comprendida entre los meses de mayo y julio. Por último, una época húmeda comprendida entre los meses de agosto y noviembre donde los vientos presentan variaciones tanto en velocidad como en dirección con bajos porcentajes, y altas tasas de precipitaciones siendo octubre el mes con mayor registro de lluvias (Barreto et al., 1999).

Así mismo, en cuanto al régimen de mareas, el Golfo de Morrosquillo presenta el régimen del Caribe colombiano, es decir, uno de tipo micro mareal y considerado de tipo semidiurno. Estas mareas presentan variaciones de amplitud menores a 60 cm (Barreto et al., 1999; Molina et al., 1994).

## **5. Datos y métodos**

Las series temporales poseen datos de oleaje y viento, y son empleadas en este trabajo para la obtención de las condiciones medias y extremas (clima marítimo) de las características oceanográficas correspondientes a la zona de estudio. Estos datos se obtuvieron de una boya virtual de reanálisis Wavewatch III de la NOAA, ubicada en la zona offshore del Golfo de Morrosquillo con coordenadas  $9,83^{\circ}\text{N}$  y  $76^{\circ}\text{W}$  (figura 1). Esta boya posee una resolución temporal de 3 h y cubre un periodo de tiempo entre 1979 y 2018. La metodología aplicada corresponde a una reducción de escala estadística, es decir, se generan propagaciones estacionarias en aguas someras de estados de mar en aguas profundas a partir de un análisis estadístico (Vega, 2017)

### **5.1. Clima marítimo**

Para obtener las estadísticas descriptivas básicas, el régimen medio y el régimen extremo de las series de datos de oleaje y viento, se empleó el programa CAROL, que tiene como funcionalidad caracterizar variables oceanográficas a partir de series temporales. Para la serie temporal de viento, fue necesario calcular la magnitud y dirección de cada dato usando el sistema computacional numérico MATLAB dado que la serie solo contenía registros de su componente  $v$  y componente  $u$ .

### **5.2. Análisis direccional y análisis de probabilidad conjunta**

Para el análisis direccional, una vez obtenidas las estadísticas básicas y los regímenes medios y extremos, se establecieron a partir de las rosas y tablas de probabilidad las

direcciones predominantes de oleaje y viento con mayor incidencia en el Golfo de Morrosquillo.

De acuerdo con lo obtenido en el análisis direccional de las rosas y tablas de probabilidad se procede con un análisis de probabilidad conjunta de las variables  $H_s$  y  $T_p$  para las direcciones de oleaje generado en la zona offshore. Este análisis de probabilidad conjunta hace referencia a la probabilidad de que ocurra una altura de ola y ocurra un periodo pico específico, sin implicar una relación causal entre las variables (Vega, 2017). Posteriormente, se tomaron como escenarios a evaluar mediante el modelo SWAN los estados de mar más representativos del oleaje generado fuera del Golfo (SWELL) de acuerdo con la dirección. Como criterio de selección se tuvo en cuenta el oleaje con mayor ocurrencia y el oleaje con mayor energía. Para el caso de la serie de viento, se tomaron las direcciones más representativas, es decir, con mayor probabilidad y mayores velocidades

### 5.3. Modelo SWAN

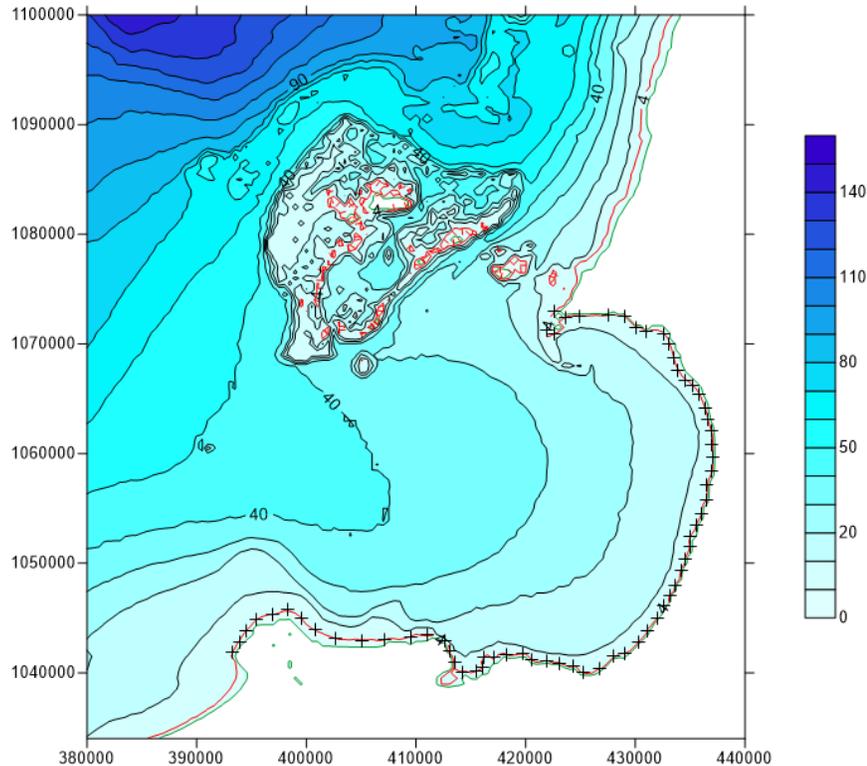
Para obtener las series sintéticas de las condiciones de oleaje cerca de la costa del Golfo de Morrosquillo se empleó el modelo espectral SWAN. Este modelo simula la propagación del oleaje de aguas profundas y del oleaje local generado por el viento local, (Booij et al., 1999; Vega, 2017; Ferrucho, 2021). El espectro de oleaje está definido por la ecuación de balance de acción ( $I$ ) (Booij et al., 1999; Guerrero, 2017; Vega, 2017).

$$\frac{\partial}{\partial t}(N) + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

El primer término de la izquierda a derecha corresponde al cambio local de la densidad de la acción, el segundo y tercer término corresponden al cambio en las coordenadas geográficas, el cuarto término corresponde al cambio de frecuencias por profundidad y corrientes, el quinto término corresponde al cambio por refracción. El término en la derecha corresponde a la fuente de energía (Guerrero, 2017; Vega, 2017).

Los datos propagados en este modelo corresponden a los escenarios más representativos seleccionados a partir del análisis de probabilidad conjunta para el oleaje y las tablas de probabilidad de dirección del viento. Como parámetros físicos se tuvo en cuenta la fricción

con el fondo, la difracción y la refracción del oleaje. Para la propagación del oleaje a partir del viento, fue necesario desestimar las condiciones de contorno, es decir, no tener en cuenta las condiciones iniciales de oleaje (SWELL) puesto que solo se evaluará el oleaje generado por el viento dentro del Golfo de Morrosquillo. De igual manera, se activaron las cuadrupletas correspondientes a la interacción del estrés del viento con la superficie del océano.



**Figura 2.** Malla computacional empleada por el modelo SWAN. Las + indican la ubicación de la serie del oleaje propagada en la isobata de 4 metros.

El modelo se implementó sobre una malla computacional con resolución espacial de 500 metros (figura 2). A lo largo de la costa, sobre la isobata de los 4 metros (línea roja) se ubicaron 67 puntos (+) en los cuales se registró cómo llega el oleaje SWELL propagado desde fuera del Golfo de Morrosquillo y SEA generado dentro del Golfo; en estos puntos de salida, el registro de las condiciones de oleaje está estimado en altura de ola, periodo pico, y dirección.

## **5.4. Análisis multitemporal de línea de costa**

Una vez realizada la modelación a partir del modelo SWAN y conociendo las condiciones hidrodinámicas del oleaje a la que se encuentra expuesta la costa del Golfo de Morrosquillo, se procede con el análisis multitemporal de línea de costa usando la herramienta de extensión DSAS (Digital Shoreline Analysis System). Para este apartado del trabajo, el proceso de análisis se realizó en dos partes:

### **5.4.1. Digitalización de línea de costa**

Para la digitalización de las líneas de costa se usaron como herramienta base imágenes históricas de Google Earth de los años 2010, 2012, 2016, 2018 correspondiente al mes de diciembre, dividiendo la zona del Golfo en 3 zonas, desde la Boca de Tinajones hasta Punta San Bernardo. Como criterios de digitalización se tomaron las líneas de costa como la interacción del mar con la tierra y se asumió todo desarrollo antrópico en la costa (Ferrucho, 2021). La digitalización de las líneas se hizo de manera manual cada año y posteriormente procesadas en ARCGIS.

### **5.4.2. Cálculo y análisis de las tasas de erosión y acreción**

Usando el programa ARCGIS y su herramienta de extensión DSAS se procedió a realizar el cálculo de las tasas de erosión y acreción. Las líneas de costa digitalizadas en Google Earth fueron combinadas generando una capa contenedora, y en adición, se creó una capa de línea base, necesaria para estimar los cambios evolutivos de la costa. Con la extensión DSAS se configuraron los transectos de evaluación a 1500 m desde la línea base y con un espaciado de 20 metros entre cada uno de ellos. Para calcular y visualizar las tasas de erosión y acreción se empleó el estadístico de *Linear Regression Rate (LRR)* dado que este es el más adecuado para determinar las tasas de cambio ya que se calculan a partir de una tendencia lineal entre las fechas más antiguas y recientes (Baig et al., 2020; Ferrucho, 2021).

## **6. Resultados**

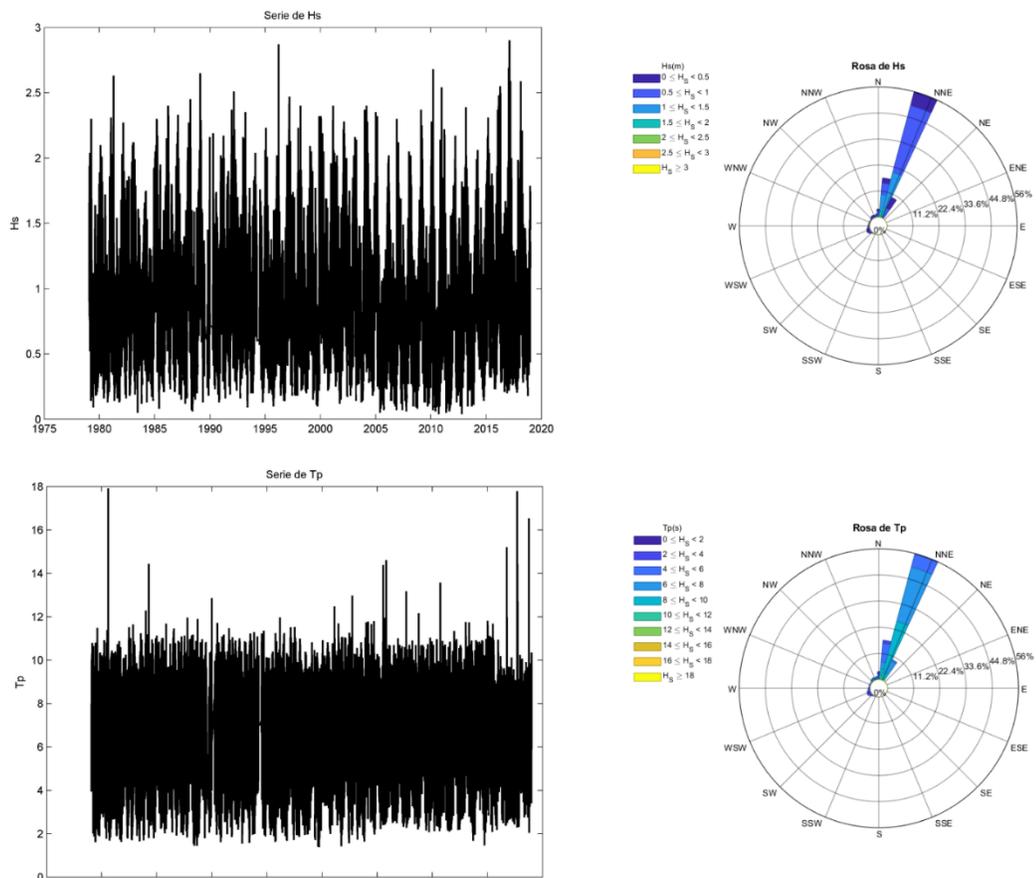
### **6.1. Clima marítimo**

#### **6.1.1. Oleaje**

En la zona de aguas profundas del Golfo de Morrosquillo, las condiciones medias que se obtienen del registro histórico de la serie de oleaje entre 1979 y 2018, se tiene que las series de tiempo de alturas de ola y periodos pico presentan los comportamientos de la figura 3, del cual se observa que las alturas significantes de la ola ( $H_s$ ) y los periodos pico ( $T_p$ ) oscilaron entre 0,1 m y 3 m y entre 1,6 s y 18 s, respectivamente.

Con respecto a los estadísticos básicos de  $H_s$  (Tabla 1) y la rosa de oleaje (figura 3), se obtiene que la dirección del oleaje predominante es proveniente del NNE con 75% de probabilidad de ocurrencia y alturas de olas de 0,8 m. De igual manera, se evidencia un aporte importante del oleaje proveniente del N con 11 % de probabilidad de ocurrencia y alturas de olas de 0,8 m. Con respecto a los estadísticos básicos de  $T_p$  (Tabla 2) y la rosa de  $T_p$  (figura 3), se obtiene que la dirección predominante del oleaje NNE registra períodos pico de 7,7 s. Así mismo, se evidencia un aporte significativo del oleaje del N con períodos pico de 5 s.

En la figura 4 se puede observar el histograma y distribución acumulada para altura significativa ( $H_s$ ) y el histograma y distribución acumulada para periodo pico ( $T_p$ ). Se obtiene que las alturas predominantes se encuentran entre 0,5 m y 0,75 m y el 50% del tiempo se registran alturas menores o iguales a 0,75 m. En cuanto al periodo pico, se obtiene un rango entre 6 s y 9 s y el 50% del tiempo se registran periodos menores o iguales a 7 s



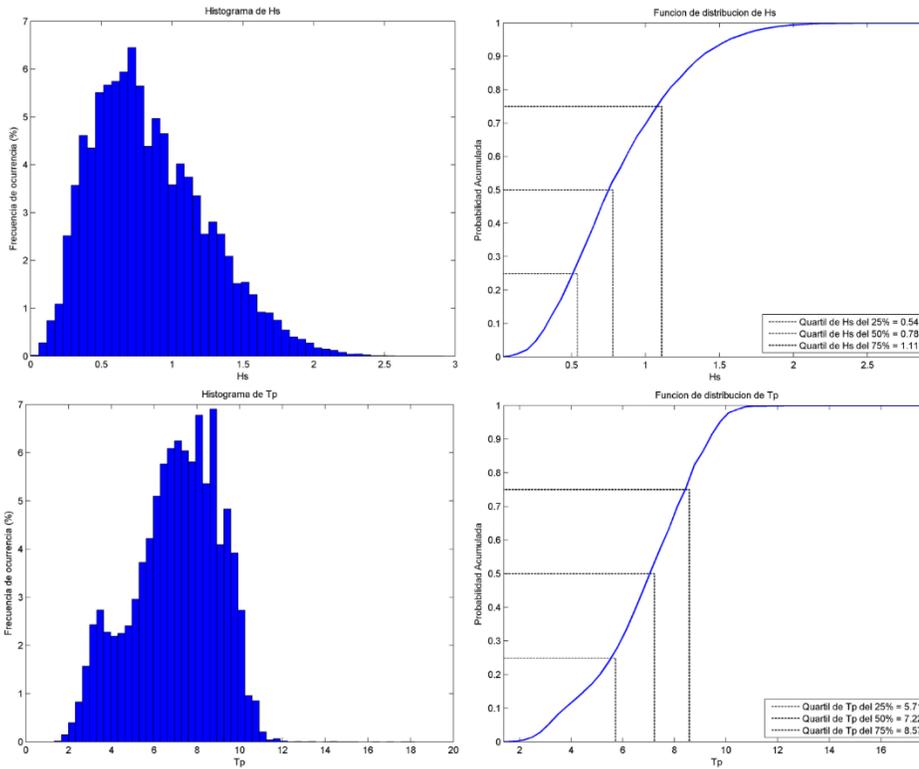
**Figura 3.** Serie de tiempo de  $H_s$  y rosa de oleaje (superior). Serie de tiempo de  $T_p$  y rosa de periodo pico (inferior).

**Tabla 1.** Estadísticos básicos de  $H_s$ .

Variable medida: $H_s$					
direcciones(°)	prob.direccion	$H_{s_{50\%}}$	$H_{s_{90\%}}$	$H_{s_{99\%}}$	$H_{s_{12}}$
N	0.1110	0.8200	1.4500	1.9500	2.2577
NNE	0.7573	0.8300	1.4400	1.9400	2.2400
NE	0.0010	0.4000	0.9584	0.9861	0.9877
ENE	0.0005	0.7189	0.8967	0.9147	0.9149
E	0.0007	0.7041	0.8180	0.8449	0.8459
ESE	0.0009	0.4300	0.7363	0.7754	0.7777
SE	0.0011	0.4100	0.6901	0.8523	0.8600
SSE	0.0015	0.4000	0.6784	0.8978	0.9900
S	0.0016	0.5094	0.7400	0.9701	1.0800
SSW	0.0032	0.5700	0.8720	1.1481	1.2199
SW	0.0183	0.5600	0.8800	1.2538	1.5458
WSW	0.0343	0.4800	0.8300	1.4100	1.7205
W	0.0151	0.4400	0.7900	1.3900	1.9130
WNW	0.0109	0.4200	0.8400	1.4880	1.9656
NW	0.0183	0.5200	1.3000	2.2500	2.6548
NNW	0.0245	0.5700	1.3040	2.0400	2.5516

**Tabla 2.** Estadísticos básicos de Tp.

Variable medida:Tp					
direcciones(°)	prob.direccion	TP <sub>50%</sub>	TP <sub>90%</sub>	TP <sub>99%</sub>	TP <sub>12</sub>
N	0.1110	4.9700	8.3000	10.8006	12.4399
NNE	0.7573	7.7100	9.6200	10.6824	11.0600
NE	0.0010	8.5012	10.6377	10.6891	10.6918
ENE	0.0005	8.2611	10.4917	10.5387	10.5394
E	0.0007	7.5891	10.2414	10.3355	10.3389
ESE	0.0009	2.8900	9.8947	10.0730	10.0825
SE	0.0011	2.6100	9.4368	9.7233	9.7410
SSE	0.0015	2.5450	7.9153	9.2670	9.3025
S	0.0016	2.8000	7.1852	8.7075	8.7553
SSW	0.0032	3.0700	5.5775	7.9029	8.0439
SW	0.0183	3.5200	4.3540	5.6610	6.7821
WSW	0.0343	3.5100	4.4000	5.4403	6.0304
W	0.0151	3.4400	4.7600	6.4264	9.0664
WNW	0.0109	3.8900	6.3400	8.7618	9.7804
NW	0.0183	6.8500	9.7290	11.6728	13.0365
NNW	0.0245	6.6100	8.6601	10.0000	10.5200

**Figura 4.** Histograma y distribución acumulada de Hs (superior). Histograma y distribución acumulada de Tp (inferior).

### 6.1.1.1. Régimen medio

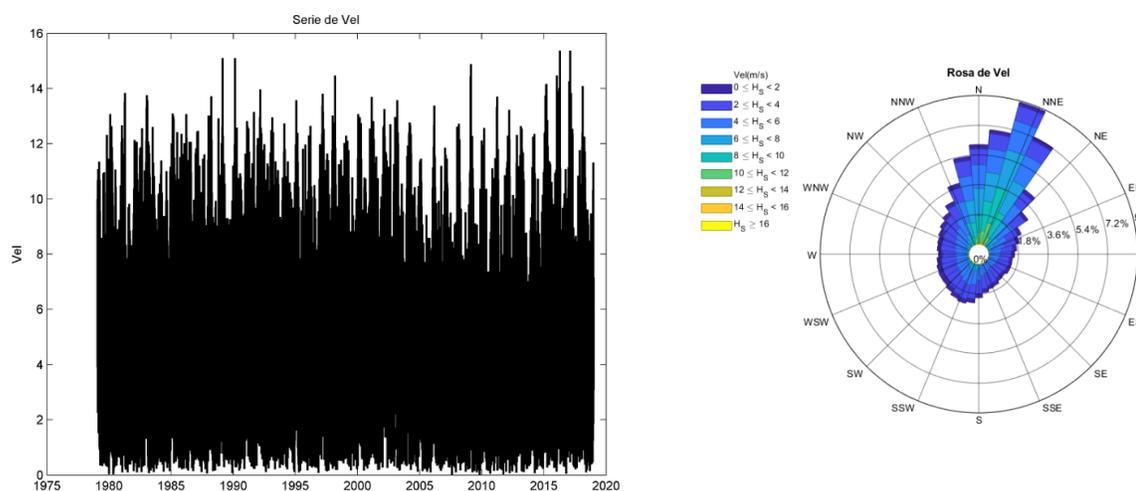
A partir de un ajuste de distribución Weibull de mínimos para la altura significativa (Hs) y el periodo pico (Tp), se obtuvo que el 50% del tiempo se registran oleajes con alturas de ola  $\leq 0,8$  m y periodos pico  $\leq 7$  s. Esto confirma lo obtenido en las distribuciones acumuladas de Hs y Tp presentadas en la Figura 4.

### 6.1.1.2. Régimen extremo

Con el uso del ajuste de Máximos Anuales de Gumbel, se obtuvo que, para las condiciones extremas en esta zona se encontraron 40 máximos anuales. Se evidencia que, para un periodo de retorno de 50 años, se estiman alturas de ola entre 1,9 m y 2,9 m y periodos pico entre 10,5 s y 18 s.

### 6.1.2. Viento

En la zona de aguas profundas del Golfo de Morrosquillo, las condiciones medias que se obtienen del registro histórico de la serie de oleaje entre 1979 y 2018, se tiene que la serie de tiempo de velocidad del viento presenta el comportamiento de la Figura 5, del cual se observa que la velocidad del viento (Vel) osciló entre 0,1 s y 15,5 s.



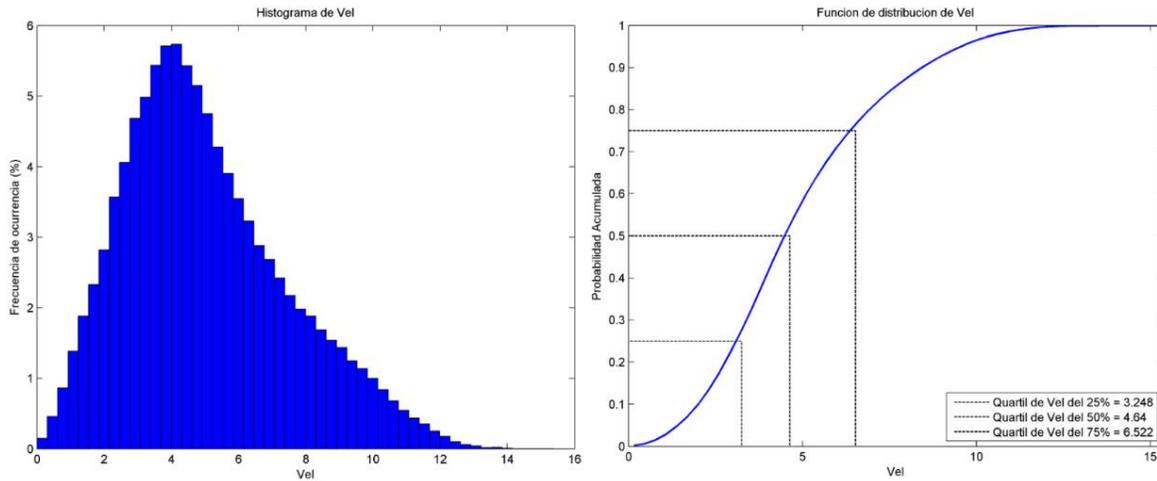
**Figura 5.** Serie de tiempo de Vel y rosa de viento.

Con respecto a los estadísticos básicos de Vel (Tabla 3) y la rosa de viento (Figura 5), se obtiene que las direcciones predominantes del viento son los provenientes del NNE y N con 18% de probabilidad de ocurrencia con vientos de 7 m/s, y con 13% de probabilidad de ocurrencia y vientos de 6,5 m/s, respectivamente. Sin embargo, en la Tabla 3, se evidencia un aporte considerable de otras direcciones como los vientos provenientes del NE y NNW con 8% de probabilidad de ocurrencia y vientos de 5,2 m/s y 5,1 m/s respectivamente.

**Tabla 3.** Estadísticos básicos de Vel.

Variable medida: Vel					
direcciones(°)	prob.direccion	Vel <sub>50%</sub>	Vel <sub>90%</sub>	Vel <sub>99%</sub>	Vel <sub>12</sub>
N	0.1357	6.5147	10.0443	12.1021	13.1417
NNE	0.1840	7.0737	10.2888	12.2456	13.6170
NE	0.0817	5.1977	7.9665	9.8267	10.9447
ENE	0.0454	4.1366	6.1796	7.3827	7.9752
E	0.0355	3.7862	5.6573	6.8700	7.5563
ESE	0.0328	3.5895	5.4644	7.1159	8.1109
SE	0.0308	3.4385	4.9757	6.4744	7.9585
SSE	0.0356	3.5151	5.1183	7.1430	9.0186
S	0.0453	3.9325	6.2562	8.5387	10.3913
SSW	0.0550	4.1822	6.6717	9.4768	11.7328
SW	0.0482	3.8891	6.2300	8.7981	11.1504
WSW	0.0458	3.6543	5.7312	8.2200	10.4060
W	0.0425	3.7302	5.6857	7.4250	8.8123
WNW	0.0452	3.8221	5.9087	7.6592	9.0345
NW	0.0536	4.1166	6.6490	8.5694	9.2561
NNW	0.0829	5.0929	8.3465	10.2390	11.0380

En la Figura 6 se puede observar el histograma y la distribución acumulada para la velocidad del viento (Vel). Se obtiene que las velocidades predominantes se encuentran entre 3 m/s y 6 m/s, y el 50% del tiempo se registran velocidades menores o iguales a 4,6 m/s.

**Figura 6.** Histograma y distribución acumulada de Vel.

### 6.1.2.1. Régimen medio

A partir de un ajuste de distribución Weibull de mínimos para la velocidad del viento (Vel), se obtuvo que el 50% del tiempo se registran magnitudes de viento  $\leq 4,6$  m/s. Esto confirma lo obtenido en la distribución acumulada de Vel, presentada en la Figura 6.

### 6.1.1.2. Régimen extremo

Con el uso del ajuste de Máximos Anuales de Gumbel, se obtuvo que, para las condiciones extremas en esta zona se encontraron 40 máximos anuales. Se evidencia que, para un periodo de retorno de 50 años se estiman magnitudes de viento entre 11 m/s y 16 m/s.

## 6.2. Análisis direccional y análisis de probabilidad conjunta

Para el análisis direccional, una vez obtenidas las estadísticas básicas, se establecieron a partir de las rosas y tablas de probabilidad las direcciones predominantes de oleaje y viento con mayor incidencia en el Golfo de Morrosquillo. Para este trabajo, se seleccionaron 9 direcciones de oleaje y viento de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia obtenida en la Tabla 1 y Tabla 3.

El anexo A muestra la probabilidad acumulada de Hs y Tp de las 9 direcciones seleccionadas. Se seleccionaron como escenarios a evaluar los estados de mar más representativos de cada dirección en cuanto al oleaje con mayor probabilidad de ocurrencia y el oleaje de mayor energía. La Tabla 4 muestra como escenarios a evaluar para el oleaje SWELL, estados de mar entre 0.5 m – 4 s y 1 m – 10 s como los de mayor ocurrencia y entre 1,8 m – 8 s y 3 m – 10 s como los de mayor energía.

**Tabla 4.** Estados de mar del oleaje tipo SWELL.

	> FRECUENCIA	> ENERGÍA
<b>N</b>	1.0 m - 6 s	3 m - 10 s
<b>NNE</b>	1.0 m - 10 s	3 m - 10 s
<b>NE</b>	0.8 m - 10 s	1.25 m - 12 s
<b>SW</b>	0.8 m - 6 s	1.8 m - 8 s
<b>WSW</b>	0.8 m - 6 s	2.25 m - 8 s
<b>W</b>	0.8 m - 6 s	2.25 m - 8 s
<b>WNW</b>	0.5 m - 6 s	2.5 m - 12 s
<b>NW</b>	0.5 m - 4 s	3 m - 10 s
<b>NNW</b>	0.8 m - 6 s	3 m - 10 s

Para la modelación de oleaje tipo SEA es necesario conocer la velocidad del viento que se modela. Así, la Tabla 5 muestra como escenarios a evaluar para el oleaje tipo SEA, velocidades de viento entre 4 m/s y 7,1 m/s como las de mayor ocurrencia y entre 8,8 m/s y 13,6 m/s como las mayores velocidades.

**Tabla 5.** Velocidades de viento del oleaje tipo SEA.

	> FRECUENCIA	> VELOCIDAD
<b>N</b>	6.5 m/s	13 m/s
<b>NNE</b>	7.1 m/s	13.6 m/s
<b>NE</b>	5.2 m/s	11 m/s
<b>SW</b>	3.8 m/s	11.2 m/s
<b>WSW</b>	3.6 m/s	10.4 m/s
<b>W</b>	3.7 m/s	8.8 m/s
<b>WNW</b>	3,8 m/s	9 m/s
<b>NW</b>	4 m/s	9.3 m/s
<b>NNW</b>	5 m/s	11 m/s

## 6.3. Modelo SWAN

### 6.3.1. Oleaje tipo SWELL

#### 6.3.1.1. Condiciones medias

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de los estados de mar de oleaje tipo SWELL con mayor frecuencia de incidencia en la zona offshore del Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones medias para las direcciones de oleaje con mayor porcentaje de ocurrencia en el tiempo como se observa en el anexo B.

Para un oleaje proveniente del N y NNE con Hs de 1 m y Tp de 6 s y 10 s respectivamente, se observan las mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas, mientras que las menores alturas se encuentran próximas a los sectores de Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo. A medida que avanza, el oleaje presenta un cambio en su dirección, el frente de ola modela una dirección paralela a la costa del Golfo a medida que se propaga en su interior. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,15-0,6 m.

Para un oleaje proveniente del SW, WSS y W con Hs de 0,8 m y Tp de 6 segundos, se evidencian mayores alturas de ola en el sector próximo a Punta San Bernardo, Berrugas y

Tolú, mientras que las menores alturas se encuentran cerca a Coveñas y la Bahía de Cispata. De igual manera, Boca de Tinajones presenta alturas de olas mayores debido a la trayectoria de propagación del oleaje. Para estos escenarios, el oleaje propagado del SW presenta un mayor cambio en su dirección a medida que ingresa al interior del Golfo, mientras que el oleaje proveniente del WSW y W presenta cambios considerables en su dirección cerca de la costa de Boca de Tinajones, Bahía de Cispata y Coveñas.

Para un oleaje proveniente del WNW, NW y NNW con estados de mar de 0,5 m - 6 s; 0,5 m - 4s y 0.8 m - 6 s respectivamente, se obtienen mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispata, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Para estos escenarios el oleaje a medida que se propaga no presenta un cambio de dirección considerable al interior del Golfo de Morrosquillo. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,1 m - 0,6 m.

#### **6.3.1.2. Condiciones extremas**

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de los estados de mar de oleaje tipo SWELL con mayor energía en la zona offshore del Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones extremas para las direcciones de oleaje con mayor energía en el tiempo como se observa en el anexo C.

Para un oleaje proveniente del N, NNE, NW y NNW con Hs de 3 m y Tp de 10 s, se observa que todo el Golfo en su extensión en cercanía a sus costas se encuentra directamente influenciado por alturas de olas de gran amplitud; más específicamente, las mayores alturas se obtienen en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispata, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Con respecto a la dirección del oleaje a medida que este se propaga al interior del Golfo rota y cambia su dirección. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0.2 m – 2.5 m.

Para un oleaje proveniente del SW (1,8 m - 8 s), y oleajes del WSW y W con un estado de mar de Hs 2,25 m y 8 s, se evidencian mayores alturas de ola por las zonas de Boca de

Tinajones, Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo mientras que cerca a las costas de Coveñas y la Bahía de Cispatá se registran las menores alturas. Para el oleaje propagado del SW se presenta un mayor cambio en su dirección a medida que ingresa al interior del Golfo, mientras que el oleaje proveniente del WSW y W presenta cambios considerables en su dirección cerca de la costa de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo corresponden entre 0,4 m - 1,6 m.

Para un oleaje proveniente del WNW con un estado de mar de Hs 2,25 m y Tp 12 s, se obtienen las mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveña y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Para este escenario el oleaje a medida que se propaga presenta un cambio de dirección considerable al interior del Golfo de Morrosquillo, más exactamente por las costas de Tolú y Berrugas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,4 m - 2 m.

### **6.3.2. Oleaje tipo SEA**

#### **6.3.2.1. Condiciones medias**

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de las velocidades de los vientos con mayor frecuencia de incidencia para la generación de oleaje tipo SEA dentro Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones medias para las direcciones de viento con mayor porcentaje de ocurrencia en el tiempo como se observa en el anexo D.

Para los vientos provenientes del N, NNE, y NE con velocidades de 6,5 m/s, 7,1 m/s y 5,2 respectivamente, se evidencian mayores alturas de ola por la zona de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas, mientras que cerca a las costas de Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo se registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,2 m - 0,5 m.

Para los vientos provenientes del SW, WSW y W con velocidades de 3,8 m/s, 3,6 m/s y 3,7 m/s respectivamente, el modelo no genera contornos debido a que la escala de medición empleada es relativamente grande con respecto a los valores obtenidos cerca de la línea de

costa. Sin embargo, se evidencian mayores alturas de ola por las zonas de Berrugas, Punta San Bernardo y Tolú, mientras que cerca a las costas de Coveñas y la Bahía de Cispatá se registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0.1 m - 0,25 m.

Para vientos provenientes del WNW y NW con velocidades de 3,8 m/s y 4 m/s respectivamente, el modelo no genera contornos debido a que la escala de medición empleada es relativamente grande con respecto a los valores obtenidos cerca de la línea de costa. Sin embargo, se obtienen las mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,1 m y 0,25 m.

#### **6.3.2.2. Condiciones extremas**

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de las velocidades de los vientos con mayor magnitud para la generación de oleaje tipo SEA dentro Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones extremas para las direcciones de viento con mayor porcentaje de ocurrencia en el tiempo como se observa en el anexo E.

Para vientos provenientes del N y NNE con velocidades de 13 m/s y 13,6 m/s y provenientes del NE y NNW con velocidades de 11 m/s, se observa que todo el Golfo en su extensión en cercanía a sus costas se encuentra directamente influenciado por alturas de olas de gran amplitud; más específicamente, las mayores alturas se obtienen en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,5 m - 1,5 m.

Para vientos provenientes del SW, WSS y W con velocidades de 11,2 m/s, 10,4 m/s y 8,8 m/s respectivamente, se evidencian mayores alturas de ola por las zonas de Berrugas, Punta San Bernardo y Tolú, mientras que cerca a las costas de Coveñas y la Bahía de Cispatá se registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0.5 m - 1 m.

Para vientos provenientes del WNW y NW con velocidades de 9 m/s y 9,3 m/s respectivamente, se obtienen las mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,5 m y 0,8 m.

### **6.3.3. Oleaje SEA-SWELL**

#### **6.3.3.1. Condiciones medias**

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de los estados de mar de oleaje tipo SWELL con mayor frecuencia de incidencia en la zona offshore y de las velocidades de los vientos con mayor frecuencia de incidencia para la generación de oleaje tipo SEA dentro Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones medias para las direcciones de oleaje con mayor porcentaje de ocurrencia en el tiempo como se puede ver en el anexo F.

Para oleajes provenientes del N y NNE con Hs de 1 m, Tp de 6 y 10 segundos y con velocidades de viento de 6,5 m/s y 7,1 m/s respectivamente, se observan las mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas, mientras que las menores alturas se encuentran próximas a los sectores de Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,1-0,8 m.

Para oleajes provenientes del SW, WSS y W con Hs de 0,8 m, Tp de 6 segundos y con velocidades de viento de 3,8 m/s, 3,6 m/s y 3,7 m/s respectivamente, se evidencian mayores alturas de ola en el sector próximo a Punta San Bernardo, Berrugas y Tolú, mientras que las menores alturas se encuentran cerca a Coveñas y la Bahía de Cispatá. De igual manera, Boca de Tinajones presenta alturas de olas mayores debido a la trayectoria de propagación del oleaje. Para estos escenarios, el oleaje propagado del SW presenta un mayor cambio en su dirección a medida que ingresa al interior del Golfo, mientras que el oleaje proveniente del WSW y W presenta cambios considerables en su dirección cerca de la costa de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,1-0,6 m.

Para oleajes provenientes del WNW, NW y NNW con estados de mar de 0,5 m - 6 s; 0,5 m - 4 s, 0,8 m - 6 s y con velocidades de viento de 3,8 m/s, 4 m/s y 5 m/s respectivamente, se obtienen mayores alturas de ola en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Para estos escenarios el oleaje a medida que se propaga no presenta un cambio de dirección considerable al interior del Golfo de Morrosquillo. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,1 m - 0,6 m.

### **6.3.3.2. Condiciones extremas**

Para la propagación estacionaria en el modelo SWAN, de los estados de mar de oleaje tipo SWELL con mayor energía en la zona offshore y de las velocidades de los vientos con mayor magnitud para la generación de oleaje tipo SEA dentro Golfo de Morrosquillo se modelaron condiciones extremas para las direcciones de oleaje con mayor energía en el tiempo como se observa en el anexo G.

Para oleajes provenientes del N, NNE, NW y NNW con Hs de 3 m, Tp de 10 s y con velocidades de viento de 13 m/s, 13.6 m/s, 9.3 m/s y 11 m/s respectivamente, se observa que todo el Golfo en su extensión en cercanía a sus costas se encuentra directamente influenciado por alturas de olas de gran amplitud; más específicamente, las mayores alturas se obtienen en los sectores de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Con respecto a la dirección del oleaje a medida que este se propaga al interior del Golfo rota y cambia su dirección. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0.5 m – 2 m.

Para un oleaje proveniente del SW (1,8 m - 8 s), y oleajes del WSW y W con un estado de mar de Hs 2,25 m y 8 s, y velocidades de viento de 11,2 m/s, 10,4 m/s y 8,8 m/s respectivamente, se evidencian mayores alturas de ola por las zonas de Boca de Tinajones, Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo mientras que cerca a las costas de Coveñas y la Bahía de Cispatá se registran las menores alturas. Para el oleaje propagado del SW se presenta un mayor cambio en su dirección a medida que ingresa al interior del Golfo, mientras que el oleaje proveniente del WSW y W presenta cambios considerables en su dirección cerca de

la costa de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo corresponden entre 0,5 m - 1,5 m.

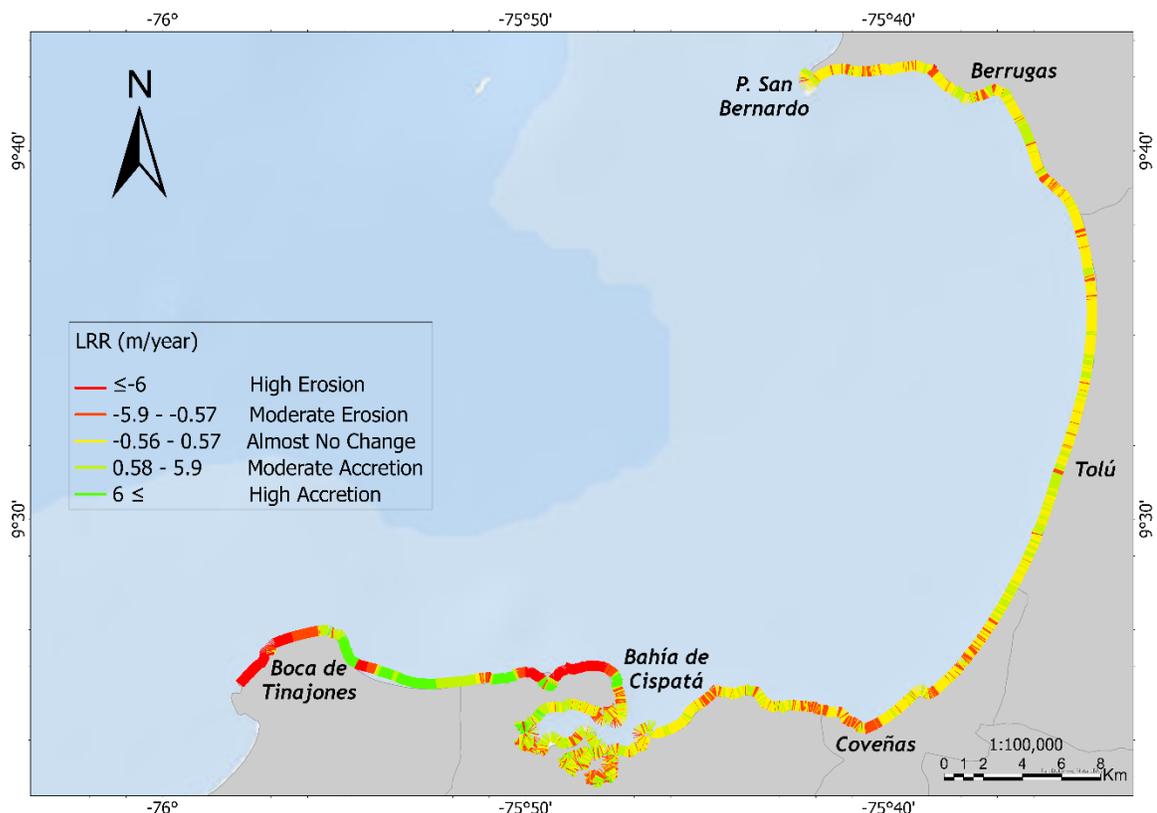
Para un oleaje proveniente del WNW con un estado de mar de Hs 2,25 m, Tp 12 s y con velocidad de viento de 9 m/s, se obtienen las mayores alturas de ola en los sectores de Boca Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveña y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores alturas. Para este escenario el oleaje a medida que se propaga presenta un cambio de dirección considerable al interior del Golfo de Morrosquillo, más exactamente por las costas de Tolú y Berrugas. Los valores de Hs obtenidos cerca de la línea de costa corresponden entre 0,6 m - 2 m.

#### **6.4. Análisis multitemporal de línea de costa**

De acuerdo con el análisis multitemporal de línea de costa realizado con la extensión DSAS, se empleó el método estadístico *Linear Regression Rate (LRR)* para calcular las tasas de erosión y acreción que han tenido lugar en la línea de costa del Golfo de Morrosquillo entre 2010 y 2018. En la figura 7, se evidencian las tasas de erosión y acreción a lo largo de toda la extensión del Golfo de Morrosquillo. Los valores máximos de erosión y acreción pueden alcanzar los -28.54 m/año y 71.36 m/año, respectivamente a lo largo de los 8 años de estudio de línea costa.

De manera general, el Golfo de Morrosquillo en mayor proporción evidencia un comportamiento no tan variable en cuanto a la evolución de línea costera, es decir, en su mayor extensión no presenta cambios tan considerables ya que se obtienen tasas de cambio entre -0.56 m/año y 0.57 m/año. Sin embargo, como se observa en la figura 7, las zonas comprendidas entre Boca de Tinajones y la Bahía de Cispatá se presentan como las más dinámicas del Golfo, siendo Boca de Tinajones y la zona más próxima a la Bahía de Cispatá las más afectadas en cuanto a procesos erosivos, mientras que los procesos de acreción tienen lugar en la parte central entre estas dos zonas. En la parte más central del Golfo de Morrosquillo, se evidencia a Coveñas como una zona que ha presentado cambios moderados de línea costera dado que se obtienen valores de erosión entre -5.9 m/año y -0.57 m/año. Mientras que, las costas de Tolú no presentan casi cambios, aunque en algunas zonas se presentan procesos tanto de erosión moderada como de acreción moderada (en mayor

proporción). Por último, las costas de Berrugas y Punta San Bernardo se consideran zonas que han presentado cambios moderados puesto que se evidencian procesos de erosión y acreción.



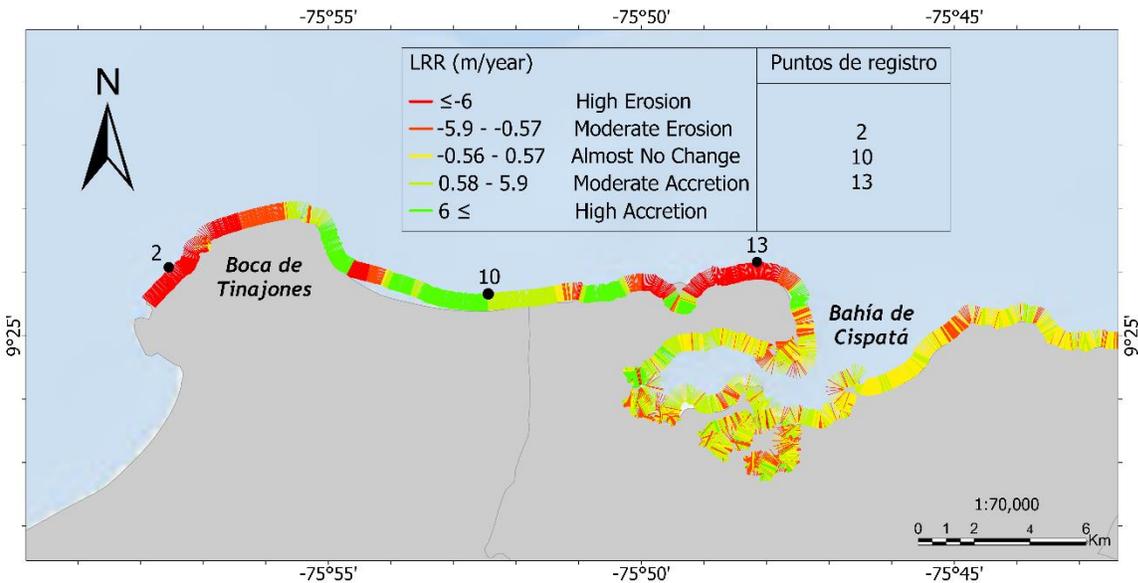
**Figura 7.** Análisis multitemporal de línea de costa del Golfo de Morrosquillo.

## 6.5. Relación oleaje (SEA Y SWELL) y la evolución de línea de costa

Para determinar y analizar con detalle la relación existente entre la evolución de la línea costera y el oleaje que llega a la costa del Golfo de Morrosquillo, se dividió al mismo en tres zonas: Zona Sur, Zona Central y Zona Norte. Para cada zona se analizaron las alturas de olas obtenidas en los puntos de registros definidos en la malla computacional del modelo SWAN sobre la isóbata de los 4 m.

### 6.5.1. Zona Sur

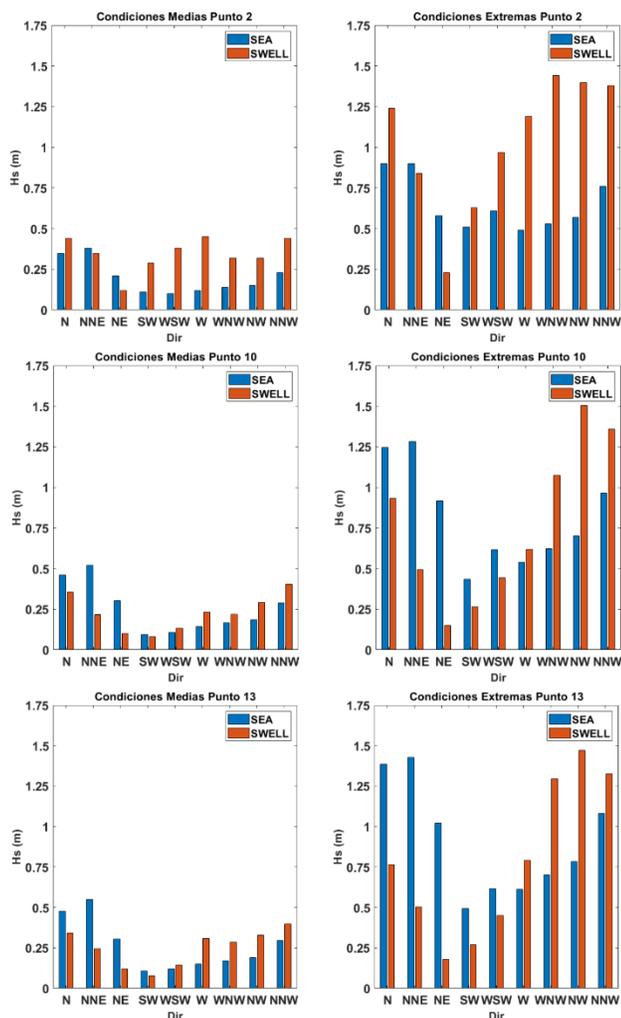
Como se mencionó, la zona Sur del Golfo de Morrosquillo se presenta como la más dinámica en toda su extensión en cuanto a la evolución de su línea de costa, siendo Boca de Tinajones y la zona más próxima a la Bahía de Cispata las más afectadas en cuanto a procesos erosivos, mientras que los procesos de acreción tienen lugar en la parte central entre estas dos zonas. Para esta zona se tomaron en cuenta los puntos de registro 2, 10 y 13, como se observa en la figura 8.



**Figura 8.** Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona sur del Golfo de Morrosquillo.

A partir de la Figura 9 y la Tabla 6 se obtiene que: El punto 2, ubicado en la zona de Boca de Tinajones, registra para condiciones medias  $H_s$  entre 0.10 m y 0.45 m, donde la mayor  $H_s$  proviene del N asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 11% del tiempo. Para condiciones extremas se registran  $H_s$  entre 0.2 m y 1.44 m, donde la mayor  $H_s$  proviene del WNW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.1% del tiempo. El punto 10, ubicado entre Boca de Tinajones y la Bahía de Cispata, registra para condiciones medias  $H_s$  entre 0.09 m y 0.51 m, donde la mayor  $H_s$  proviene del NNE asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 18% del tiempo. Para condiciones extremas se registran  $H_s$  entre 0.15 m y 1.5 m, donde la mayor  $H_s$  proviene del NW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.8% del tiempo. El punto 13, ubicado en la zona más próxima a la Bahía de Cispata, registra para condiciones

medias Hs entre 0.07 m y 0.54 m, donde la mayor Hs proviene del NNE asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 18% del tiempo. Para condiciones extremas se registran Hs entre 0.18 m y 1.5 m, donde la mayor Hs proviene del NW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.8% del tiempo.

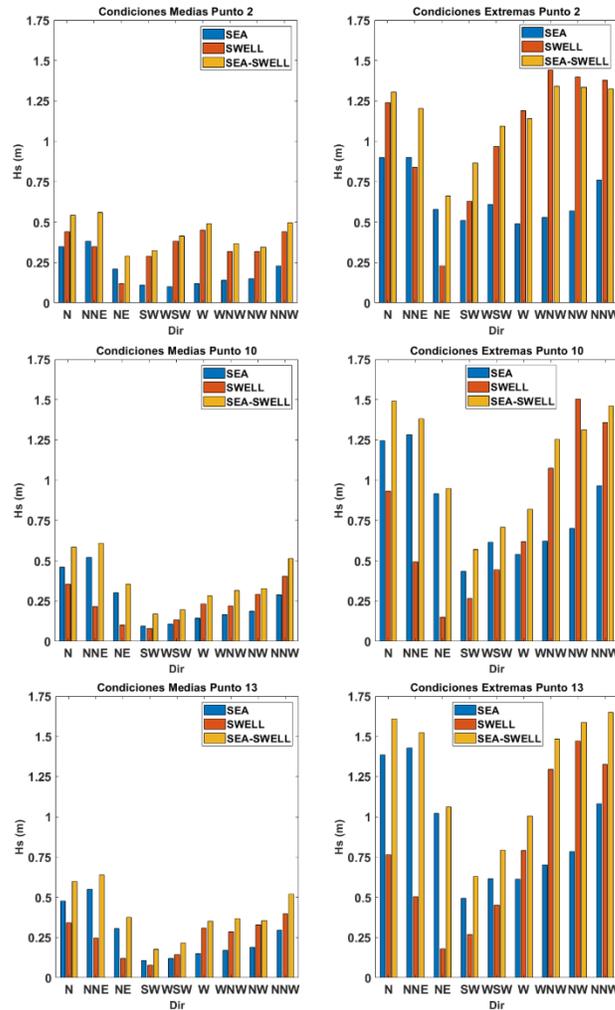


**Figura 9.** Hs obtenidas en los puntos de registro 2, 10 y 13 en la isóbara de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.

**Tabla 6.** Porcentajes del tiempo de las direcciones modeladas.

	N	NNE	NE	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
<b>OLEAJE</b>	11%	75%	1%	1.8%	3.4%	1.5%	1.1%	1.8%	2.5%
<b>VIENTO</b>	13%	18%	8%	4.8%	4.5%	4.2%	4.5%	5.3%	8.2%

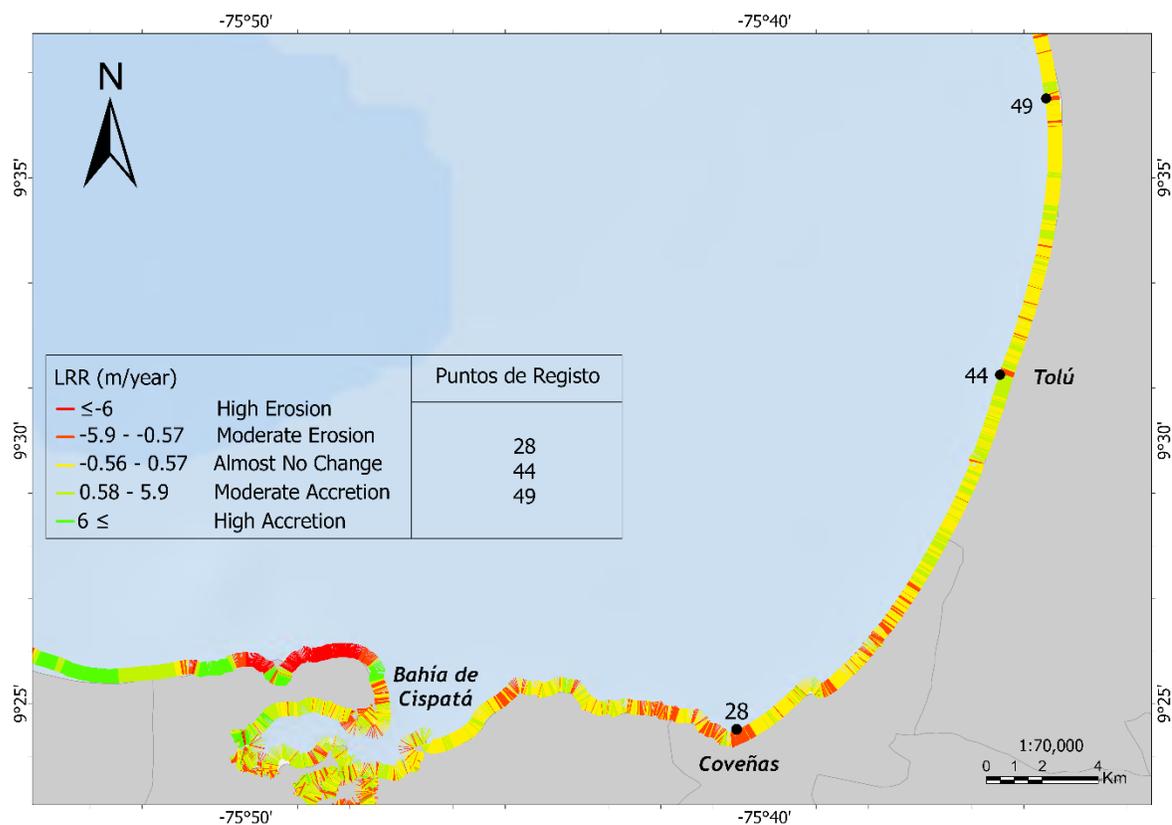
Como se observa en la figura 10, las mayores Hs se obtienen cuando se tienen en cuenta ambas contribuciones, tanto SEA como SWELL. Sin embargo, al comparar las mayores frecuencias (tabla 6) en los puntos anteriores, se observa que para el NNE las contribuciones del oleaje tipo SEA y oleaje SEA-SWELL no evidencian diferencias tan grandes. Por tanto, en esta zona en particular los cambios morfológicos se asocian al oleaje tipo SEA mayormente.



**Figura 10.** Hs obtenidas en los puntos de registro 2, 10 y 13 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.

### 6.5.1. Zona Central

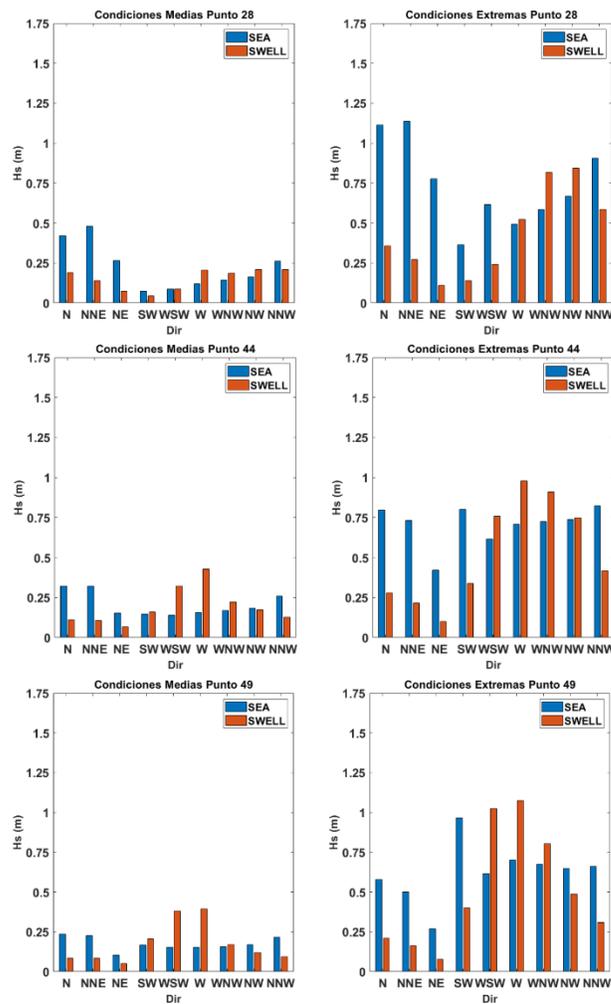
En la parte más central del Golfo de Morrosquillo, se evidencia a Coveñas como una zona que ha presentado cambios moderados de línea costera dado que se obtienen valores de erosión entre  $-5.9$  m/año y  $-0.57$  m/año. Mientras que, las costas de Tolú no presentan casi cambios, aunque en algunas zonas se presentan procesos tanto de erosión moderada como de acreción moderada (en mayor proporción). Para esta zona se tomaron en cuenta los puntos de registro 28, 44 y 49, como se observa en la figura 11.



**Figura 11.** Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona central del Golfo de Morrosquillo.

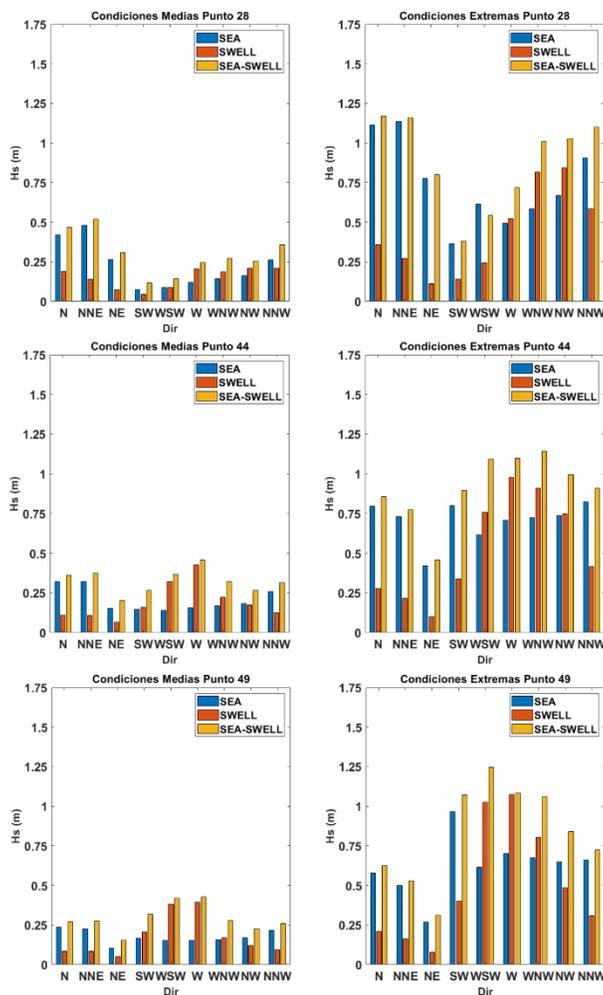
A partir de la Figura 12 y la Tabla 6 se obtiene que: El punto 28, ubicado en la costa de Coveñas, registra para condiciones medias  $H_s$  entre  $0.04$  m y  $0.47$  m, donde la mayor  $H_s$  proviene del NNE asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 18% del tiempo. Para condiciones extremas se registran  $H_s$  entre  $0.11$  m y  $1.13$  m, donde la mayor  $H_s$  proviene del NNE asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 18% del tiempo. El punto 44, ubicado frente a la costa de Tolú, registra para condiciones medias

Hs entre 0.06 m y 0.42 m, donde la mayor Hs proviene del W asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.5% del tiempo. Para condiciones extremas se registran Hs entre 0.09 m y 0.97 m, donde la mayor Hs proviene del W asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.5% del tiempo. El punto 49, ubicado más al norte de las costas de Tolú, registra para condiciones medias Hs entre 0.05 m y 0.39 m, donde las mayores Hs provienen del W y WSW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.5% y 3.4% del tiempo, respectivamente. Para condiciones extremas se registran Hs entre 0.09 m y 0.97 m, donde la mayores Hs provienen del W y WSW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 1.5% y 3.4% del tiempo, respectivamente.



**Figura 12.** Hs obtenidas en los puntos de registro 28, 44 y 49 en la isóbara de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.

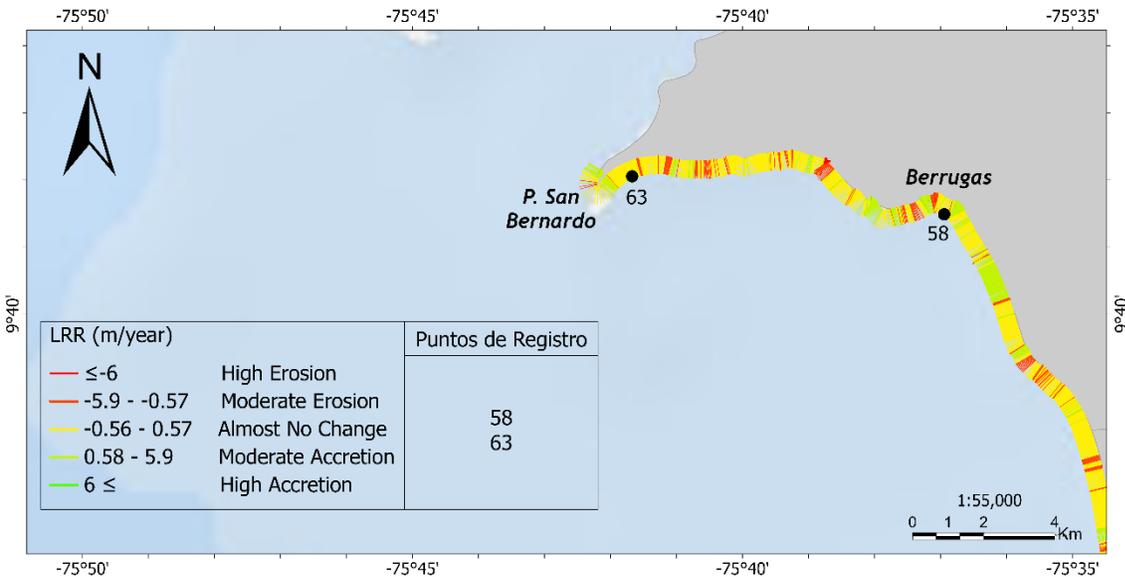
Como se observa en la figura 13, las mayores Hs se obtienen cuando se tienen en cuenta ambas contribuciones, tanto SEA como SWELL. Sin embargo, al comparar las mayores frecuencias (tabla 6) en los puntos anteriores, se observa que para el NNE las contribuciones del oleaje tipo SEA y oleaje SEA-SWELL no evidencian diferencias tan grandes. Por tanto, en esta zona en particular los cambios morfológicos se asocian al oleaje tipo SEA mayormente.



**Figura 13.** Hs obtenidas en los puntos de registro 28, 44 y 49 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.

### 6.5.3. Zona Norte

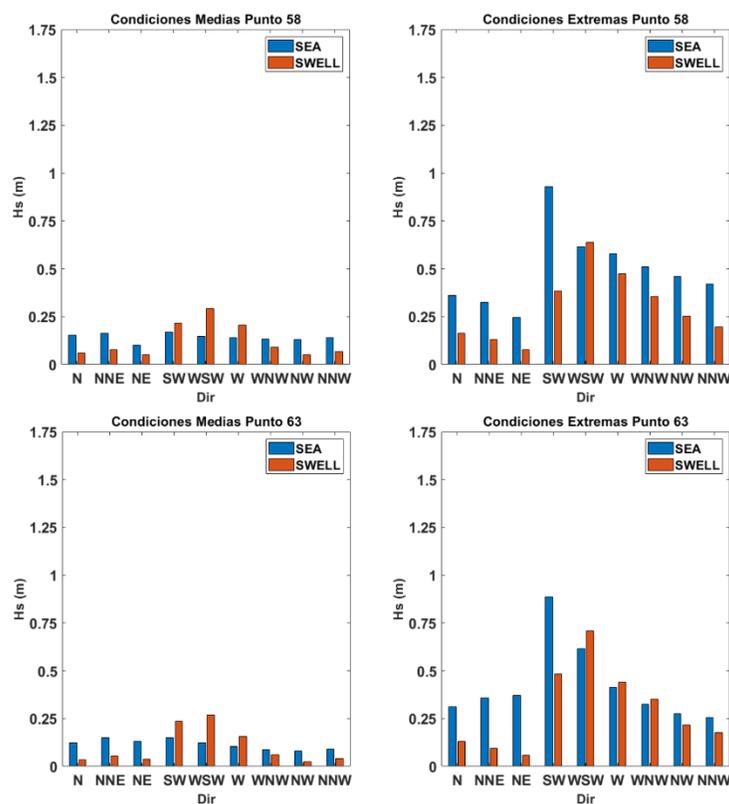
Las costas correspondientes a los sectores de Berrugas y Punta San Bernardo se consideran zonas que han presentado cambios moderados puesto que se evidencian procesos de erosión y acreción. Para esta zona Norte del Golfo de Morrosquillo se tomaron en cuenta los puntos de registro 58 y 63, como se observa en la figura 14.



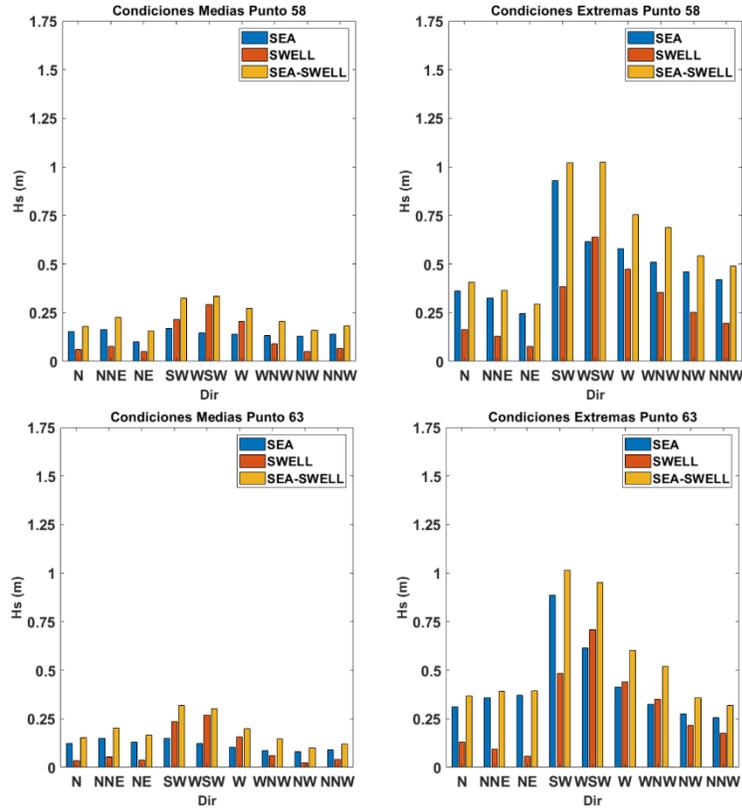
**Figura 14.** Tasas de erosión y acreción, y puntos de registros de la zona norte del Golfo de Morrosquillo.

A partir de la Figura 15 y la Tabla 6 se obtiene qué: El punto 58, ubicado frente a la costa de Berrugas, como se observa en la figura 21 y en la Tabla 6, registra para condiciones medias Hs entre 0.05 m y 0.29 m, donde las mayores Hs provienen del WSW y SW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 3.4% y 1.8% del tiempo, respectivamente. Para condiciones extremas se registran Hs entre 0.07 m y 0.92 m, donde la mayores Hs provienen del SW asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 1.8% del tiempo. El punto 63, ubicado frente a Punta San Bernardo, como se observa en la figura 21 y en la Tabla 6, registra para condiciones medias Hs entre 0.02 m y 0.27 m, donde las mayores Hs provienen del WSW y SW asociando mayor aporte del oleaje tipo SWELL correspondiente al 3.4% y 1.8% del tiempo, respectivamente. Para condiciones extremas se registran Hs entre 0.05 m y 0.88 m, donde la mayores Hs provienen del SW asociando mayor aporte del oleaje tipo SEA correspondiente al 1.8% del tiempo.

Como se observa en la figura 16, las mayores Hs se obtienen cuando se tienen en cuenta ambas contribuciones, tanto SEA como SWELL. Sin embargo, al comparar las mayores frecuencias (tabla 6) en los puntos anteriores, se observa que para el NNE las contribuciones del oleaje tipo SEA y oleaje SEA-SWELL no evidencian diferencias tan grandes. Por tanto, en esta zona en particular los cambios morfológicos se asocian al oleaje tipo SEA mayormente.



**Figura 15.** Hs obtenidas en los puntos de registro 58 y 63 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul) y oleaje SWELL (naranja) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.



**Figura 16.** Hs obtenidas en los puntos de registro 58 y 63 en la isóbata de 4 m correspondiente a oleaje SEA (azul), oleaje SWEL (naranja) y oleaje SEA-SWELL (amarillo) asociado a cada dirección inicial de modelación en condiciones medias y extremas.

## 7. Discusiones

En este trabajo se calcularon los parámetros medios para las variables de oleaje (Hs y Tp) y viento (Vel) con la finalidad de caracterizar el clima marítimo presente en el Golfo de Morrosquillo. De lo cual se obtuvo qué, en aguas profundas, Hs y Tp alcanzan valores entre 0.82 m - 1.95 m y 4.9 s - 10.8 s provenientes del NNE el 75% del tiempo y del N el 11% del tiempo. Mientras que los vientos alcanzan valores 6.5 m/s y 12.2 m/s provenientes del NNE el 18% del tiempo y del N el 13% del tiempo. Sin embargo, a partir del análisis direccional de los estadísticos básicos de Hs, Tp y Vel, fue posible realizar un análisis de probabilidad conjunta con las direcciones de mayor aporte en el tiempo para cada una de las variables. Así, se seleccionaron como escenarios a modelar a partir del modelo SWAN las condiciones más probables y energéticas.

De los resultados obtenidos en el modelo SWAN se puede mencionar que se mantiene una relación en las modelaciones tanto en condiciones medias como en condiciones extremas; para oleajes provenientes del N, NNE y NE se obtienen que las mayores Hs se evidencian en las zonas de Boca de Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas, mientras que las menores Hs se obtienen en las zonas de Tolú, Berrugas y Punta San Bernardo. A medida que avanza desde aguas profundas el oleaje presenta un cambio en su dirección, debido al fenómeno de refracción el frente de ola modela una dirección paralela a la costa del Golfo a medida que se propaga en su interior. Para oleajes provenientes del SW, WSW y W se obtienen las mayores Hs cerca de Boca Tinajones (debido a la trayectoria del oleaje proveniente de aguas profundas), Berrugas y Punta San Bernardo, y las menores Hs en la Bahía de Cispatá y Coveñas. En estos escenarios, el oleaje propagado del SW presenta un mayor cambio en su dirección a medida que ingresa al interior del Golfo, mientras que el oleaje proveniente del

WSW y W presenta cambios considerables en su dirección cerca de la costa de Boca Tinajones, Bahía de Cispatá y Coveñas. Para oleajes provenientes del WNW, NW, NNW se obtienen las mayores Hs en los sectores de Boca Tinajones, Bahía de Cispatá, Coveñas y Tolú, mientras que Berrugas y Punta San Bernardo registran las menores Hs. Aquí el oleaje a medida que se propaga no presenta un cambio de dirección considerable al interior del Golfo de Morrosquillo. Para estos escenarios modelados, es necesario destacar la importancia de rasgos geomorfológicos como el Archipiélago de San Bernardo y la influencia del Río Sinú en los procesos de refracción y difracción del oleaje, puesto que actúan como disipadores de energía y modificadores de la dirección de este.

Por otro lado, con respecto al análisis multitemporal de línea de costa, (Rangel-Buitrago et al., 2015) determinaron que la zona sur del Golfo de Morrosquillo presenta un dinamismo considerable en cuanto a tasas de erosión y acreción, presentando a Boca de Tinajones como un área que se encuentra acrecionada, la zona más próxima a la Bahía de Cispatá altamente erosionada, y parte central entre estas dos zonas estable. Sin embargo, para el registro histórico de línea de costa entre 2010 y 2018, se obtiene que Boca de Tinajones se encuentra altamente erosionada, esto se sustenta dado que en esta zona sur se registran las mayores Hs provenientes de todas las direcciones y los sedimentos en suspensión del delta del río Sinú son transportados al interior del Golfo como resultado del cambio de dirección del oleaje a medida que se propaga al interior de este. Por tanto, la parte central de la zona sur es coincidente con estos resultados puesto que se evidencian las mayores tasas de sedimentación dada la deposición de los sedimentos transportados del delta. Así mismo, la parte más próxima a la Bahía de Cispatá (Punta Mestizos) presenta altas tasas de erosión puesto que en esta zona costera se evidencia la escasez del sedimento depositado en la parte central entre este sector y Boca de Tinajones. En la parte central del Golfo de Morrosquillo, se evidencia a Coveñas como una zona que ha presentado cambios moderados de línea costera dado que se obtienen valores de erosión entre  $-5.9$  m/año y  $-0.57$  m/año, y la gran actividad antrópica en cuanto al diseño de estructuras duras para la recuperación de las playas de esta área costera en los últimos años. Mientras que, las costas de Tolú no presentan casi cambios, aunque en algunas zonas se presentan procesos tanto de erosión moderada como de acreción moderada (en mayor proporción). Esto último difiere de lo propuesto por (Rangel-Buitrago et al., 2015), que plantea a Tolú como la zona más crítica del Golfo en

cuanto a procesos erosivos. Para las costas correspondientes a la zona Norte del Golfo de Morrosquillo, más específicamente los sectores de Berrugas y Punta San Bernardo, se registran las menores alturas de olas de todo el Golfo. Aunque las mayores alturas de ola que pueden ocurrir son provenientes del SW y WSW, no obstante, se consideran zonas que han presentado cambios moderados en su línea de costa puesto que se evidencian procesos de erosión y acreción. Según (Rangel-Buitrago et al., 2015), esto podría relacionarse con la construcción de estructuras duras para la regeneración de las costas dado que en dichas zonas estas construcciones han repercutido de manera negativa concentrando la energía de las olas y por consiguiente la erosión costera.

De manera general, de la relación oleaje (SEA y SWELL) y evolución de la línea de costa se destacan la zona sur, central y norte del Golfo de Morrosquillo como áreas influenciadas directamente la mayor parte del tiempo por el oleaje tipo SEA en sus procesos morfodinámicos. Para sus condiciones hidrodinámicas, estas áreas presentan oleajes provenientes del NE con una frecuencia del 40% del tiempo, del SW el 14% del tiempo y del NW el 18% del tiempo, así, se destaca el oleaje tipo SEA proveniente del NE como el de mayor dominio e influencia en las costas pertenecientes al Golfo de Morrosquillo. Para este tipo de accidentes geográficos costeros, se puede discutir, entre el Golfo de Morrosquillo y el Golfo de Urabá, las tendencias en cuanto a la influencia de los tipo de oleaje. (Osorio et al., 2010; Suarez, 2013; Molina, 2014) determinaron una mayor influencia del oleaje tipo SWELL en la zona más externa del Golfo de Urabá, mientras que el aporte del oleaje tipo SEA se evidencia en mayor medida al interior de este, esto es consistente con la tendencia que presenta el Golfo de Morrosquillo a una mayor incidencia del oleaje tipo SEA en su interior. Las características geomorfológicas juegan un papel fundamental en la transformación del oleaje (Suarez, 2013), para el Golfo de Urabá estas características son Punta Caribaná y el delta del Rio Atrato (Suarez, 2013; Quintero, 2020), mientras que para el Golfo de Morrosquillo son el Archipiélago de San Bernardo y el delta del Rio Sinú, es por esto que, el oleaje tipo SEA se evidencia con mayor aporte en el interior de los golfos debido a que la energía del oleaje de fondo (SWELL) se disipa a medida que se propaga hacia el interior.

## 8. Conclusiones y recomendaciones

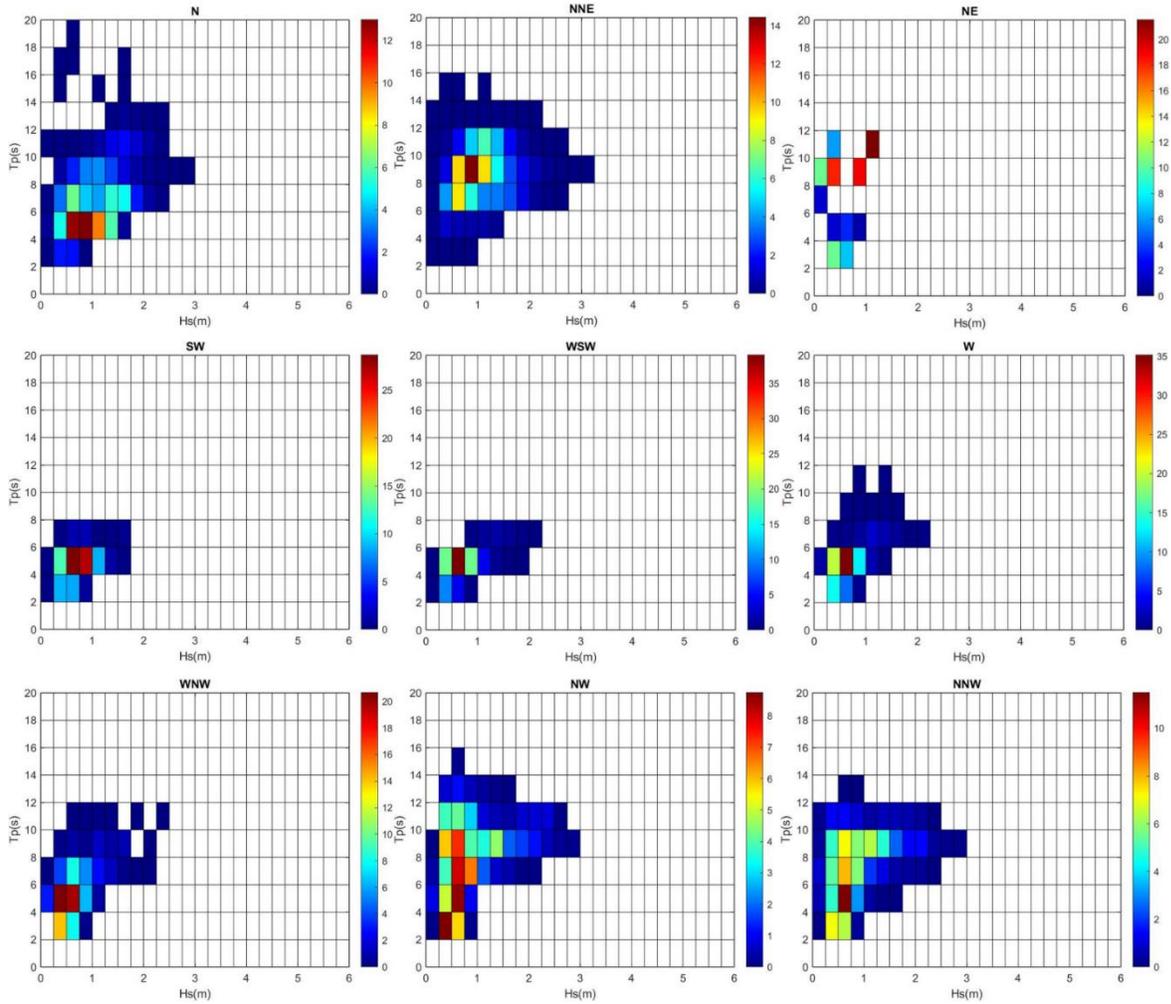
Una vez condensado todo el análisis del Golfo de Morrosquillo, se puede concluir que este se caracteriza por presentar en aguas profundas, Hs y Tp con valores entre 0.82 m - 1.95 m y 4.9 s -10.8 s provenientes del NNE el 75% del tiempo y del N el 11% del tiempo. Mientras que los vientos alcanzan valores 6.5 m/s y 12.2 m/s provenientes del NNE el 18% del tiempo y del N el 13% del tiempo. Con las propagaciones estacionarias en SWAN, se destaca que se mantiene una relación en las modelaciones tanto en condiciones medias como en condiciones extremas; para oleajes del N, NNE y NE, las mayores Hs se registran en la zona sur y las menores Hs en la zona norte. Para oleajes del SW, WSW y W, las mayores Hs se obtienen en la zona norte y las menores Hs en la zona sur. Y para los oleajes del WNW, NW y NNW, las mayores Hs se registran en la zona sur y la zona central, y las menores Hs en la zona norte.

Del análisis multitemporal de línea de costa se concluye que, de manera general, el Golfo de Morrosquillo en mayor proporción evidencia un comportamiento no tan variable en cuanto a la evolución de línea costera, es decir, en su mayor extensión no presenta cambios tan considerables ya que se obtienen tasas de cambio entre -0.56 m/año y 0.57 m/año. Sin embargo, se destaca la zona sur del Golfo como la más dinámica y la más crítica puesto se evidencian las mayores tasas de erosión y de acreción, mientras que la zona central y la zona norte en mayor proporción se mantiene en equilibrio, aunque se evidencian tramos de costa que sufren procesos de erosión y acreción moderada.

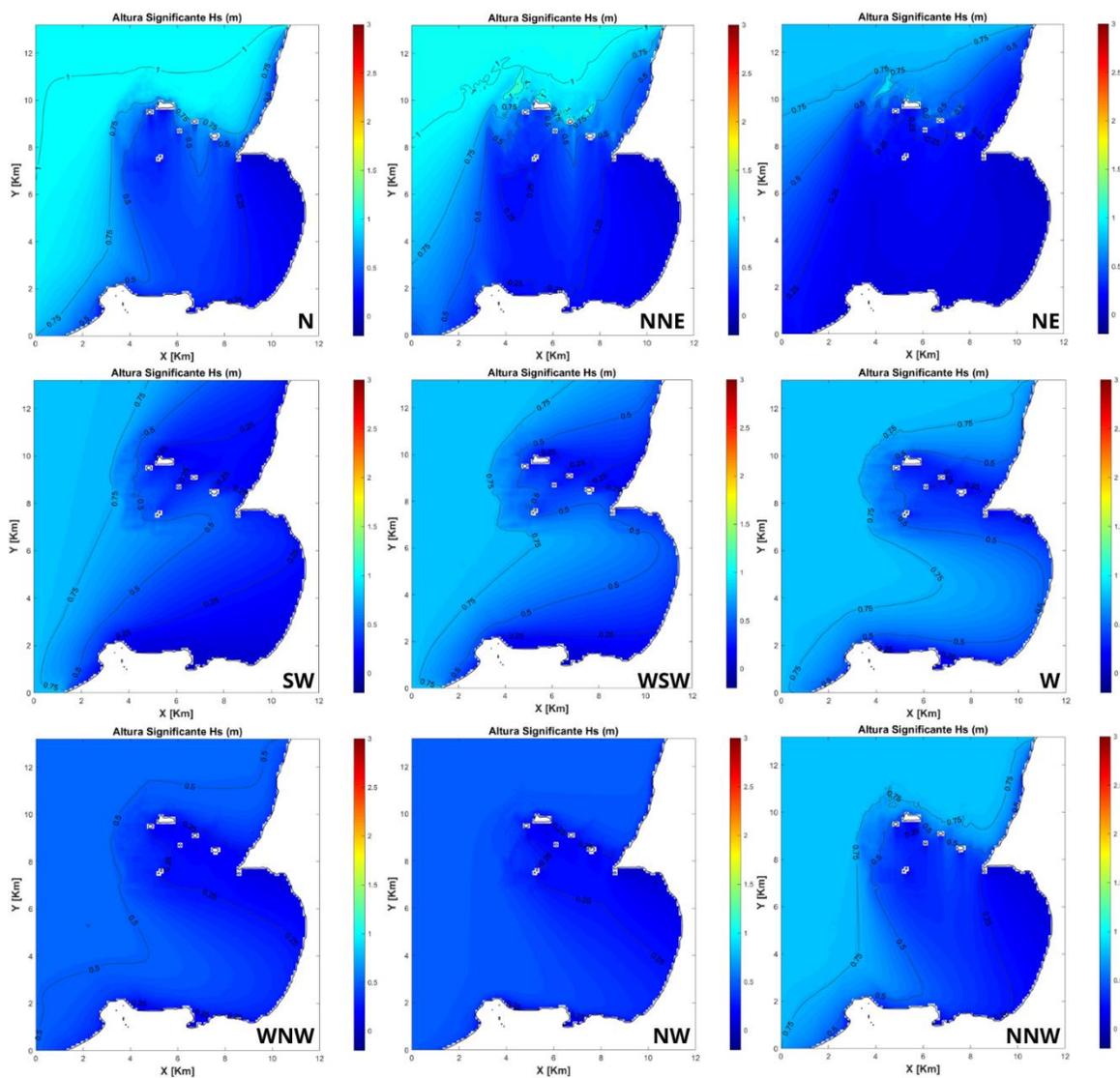
Finalmente, de la relación oleaje (SEA y SWELL) y evolución de la línea de costa del Golfo de Morrosquillo se obtiene que: para las zonas sur, central y norte el oleaje que más aporta en las condiciones hidrodinámicas y en los procesos morfodinámicos es el tipo SEA.

Para estudios posteriores encaminados en analizar cómo evolucionan las costas del Golfo de Morrosquillo a partir del análisis de sus condiciones hidrodinámicas, se propone y recomienda el uso de imágenes landsat, dado que Google Earth no cuenta con un registro adecuado de imágenes históricas de la zona. De igual manera, se recomienda tener en cuenta y evaluar el aporte de la variabilidad estacional del oleaje SEA y oleaje SWELL.

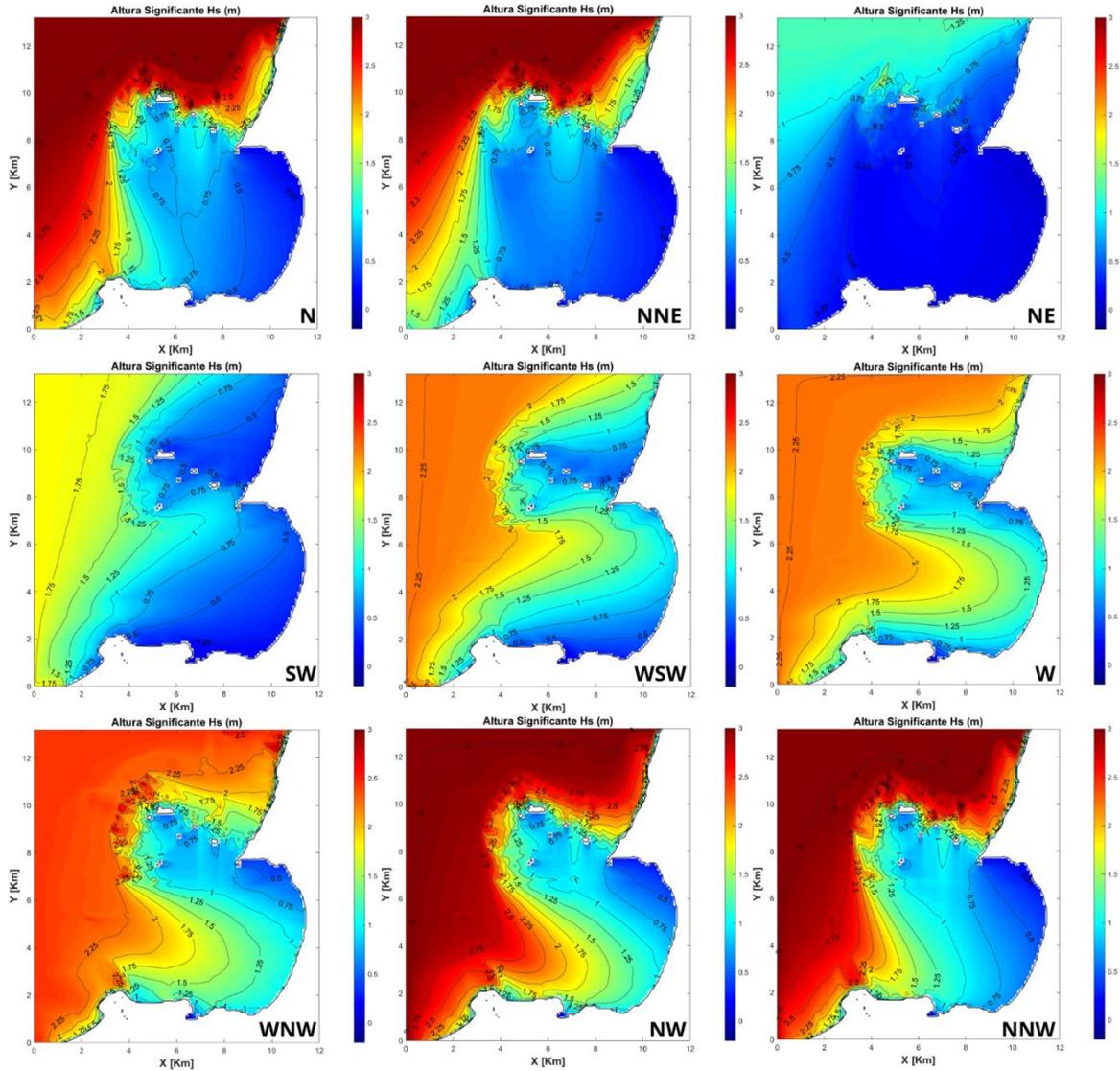
# A. Anexo: Análisis de probabilidad conjunta



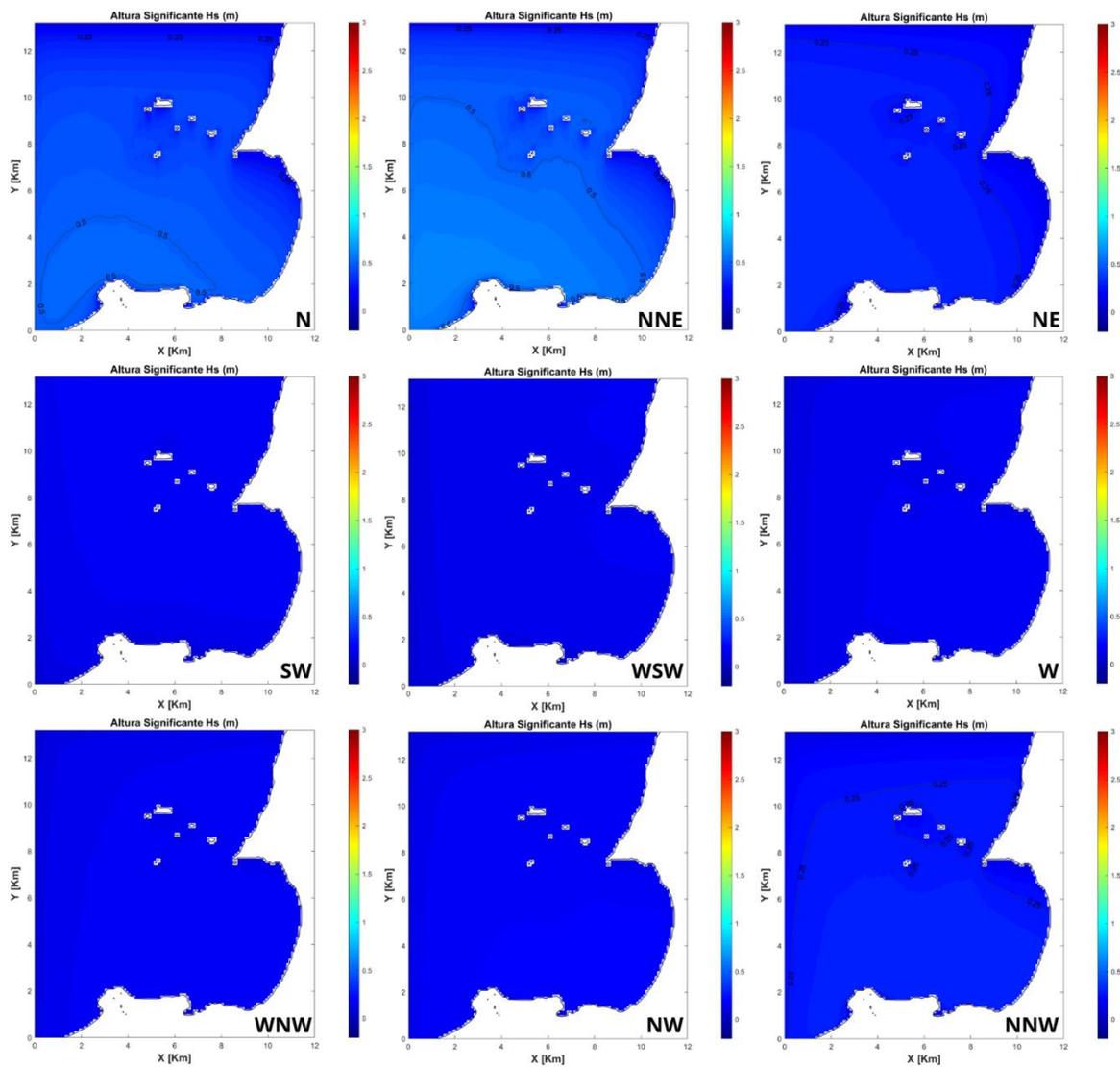
## B. Anexo: Condiciones medias del oleaje SWELL



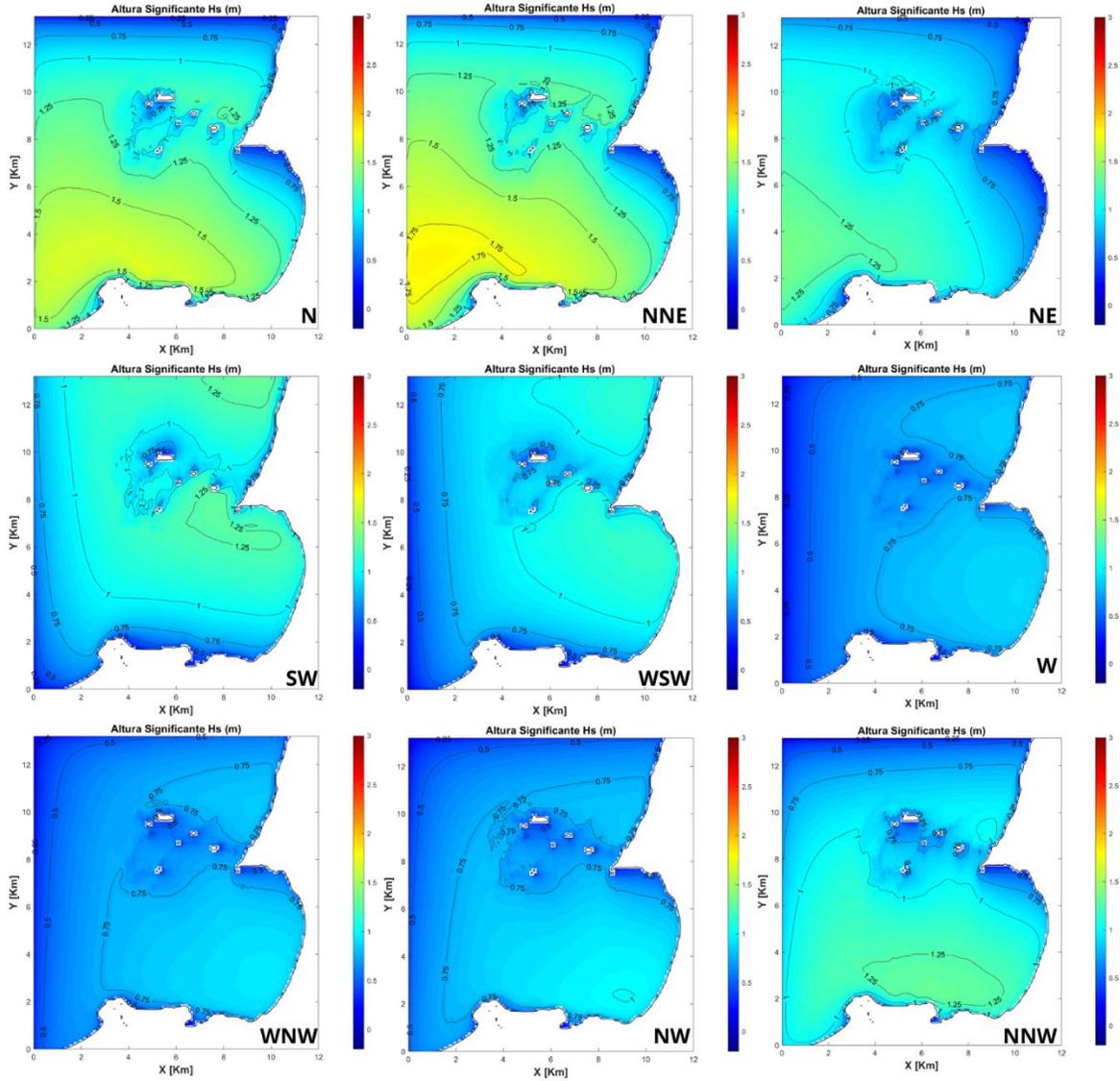
## C. Anexo: Condiciones extremas del oleaje SWELL



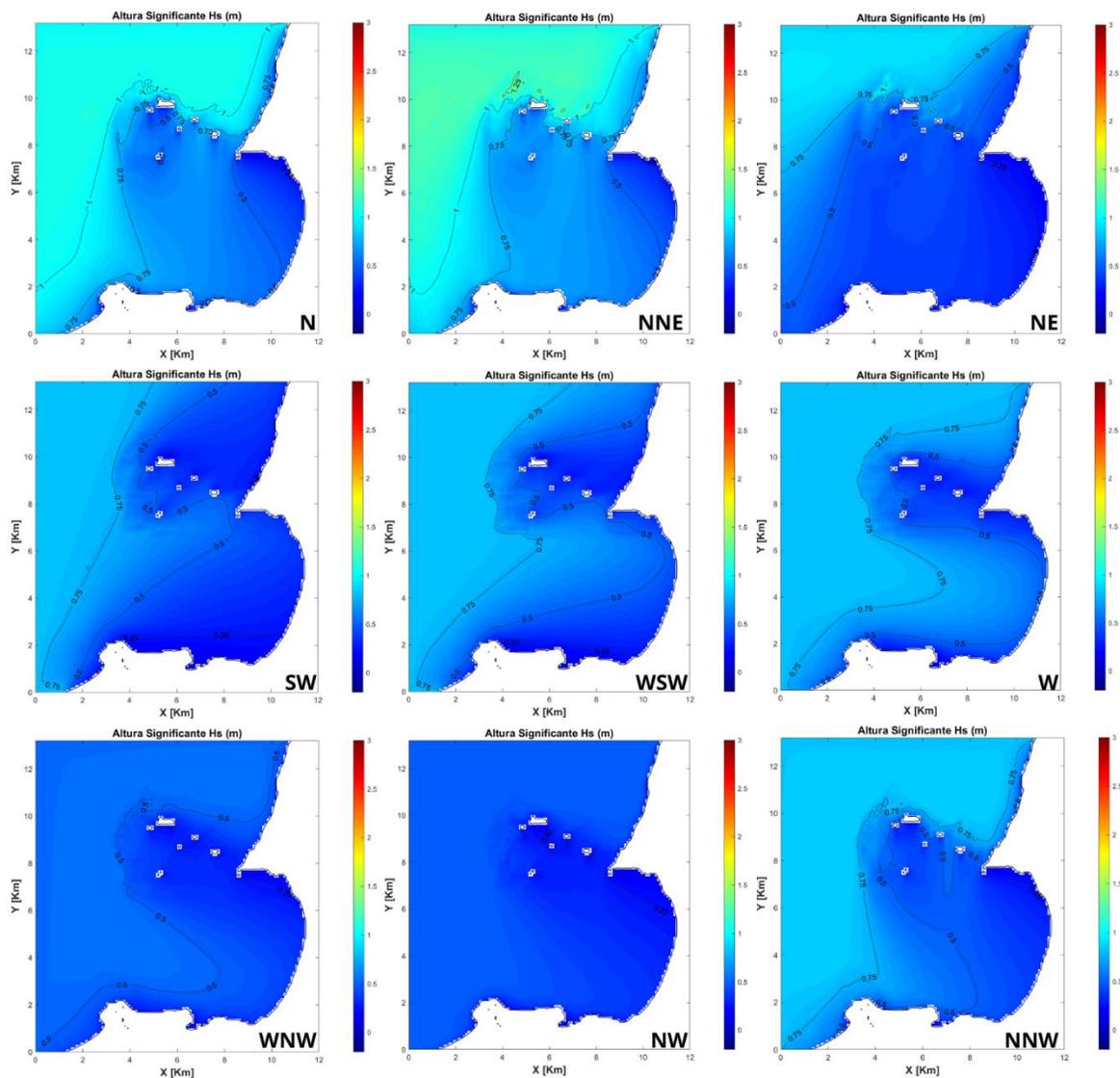
## D. Anexo: Condiciones medias del oleaje SEA



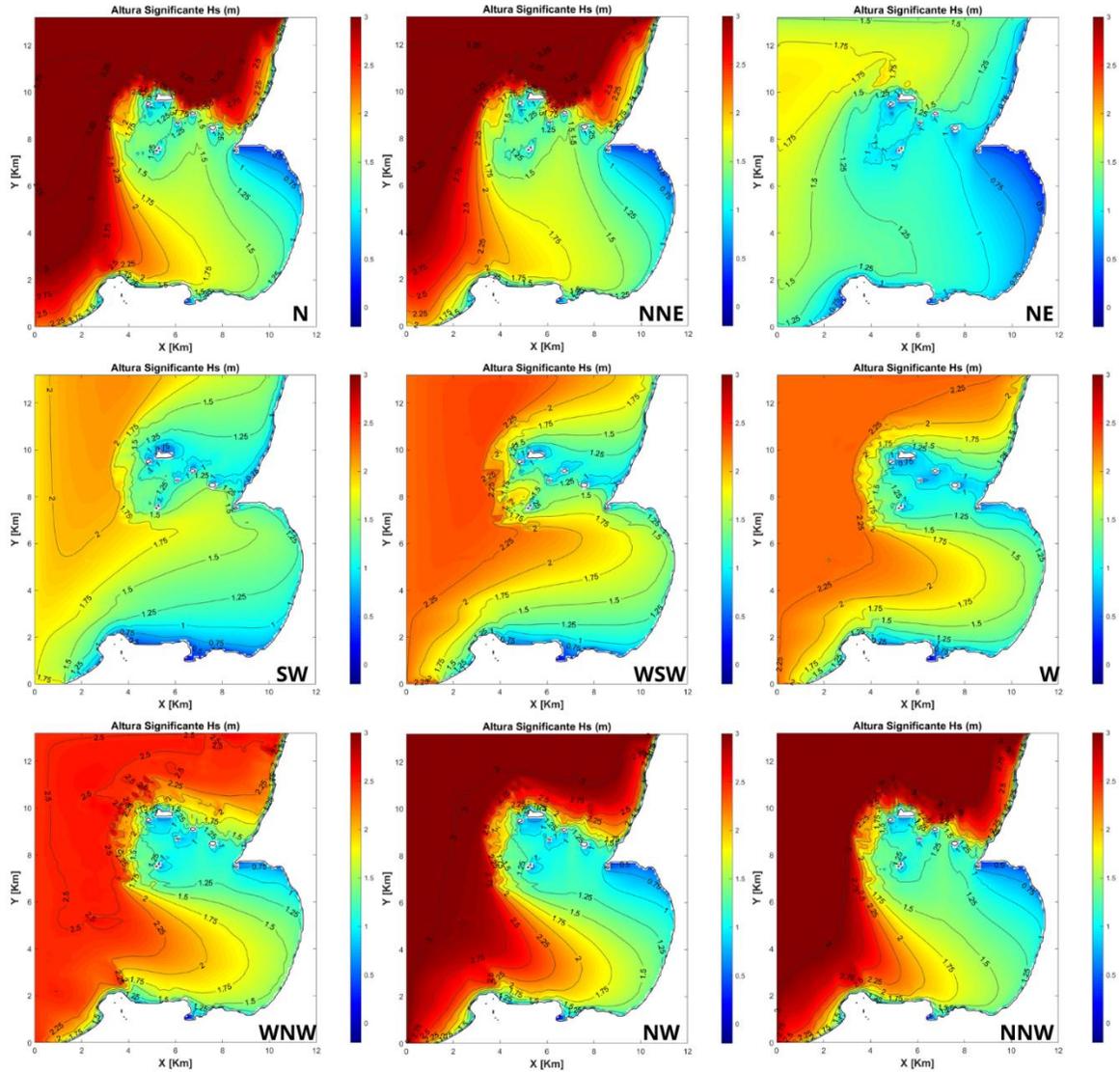
## E. Anexo: Condiciones extremas del oleaje SEA



## F. Anexo: Condiciones medias del oleaje SEA-SWELL



## G. Anexo: Condiciones extremas del oleaje SEA-SWELL



## Bibliografía

- Afanador, F., Castro, I., & Torres, N. (2007). *Información espacial para el control y administración del litoral en el Golfo de Morrosquillo, Caribe colombiano*. Boletín Científico CIOH No.25.
- Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26(4), 361–376. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1815839>
- Barreto, M., Barrera, R., Benavides, J., Cardozo, E., Hernández, H., Marín L, Oliva, B., Salvatierra, C., Sierra, P., & Villa, A. (1999). *Diagnóstico Ambiental del Golfo de Morrosquillo (Punta Rada-Tolú). Una Aplicación de Sensores Remotos y SIG como Contribución al Manejo Integrado de Zonas Costeras*. Applied Geomorphological Surveys.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions I. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Casarín, R. S., Lacouture, M. M. V., Ramos, F. J., Daniela, D., Paez, P., Ortiz Pérez, M. A., Mendoza Baldwin, E. G., Delgadillo Calzadilla, M. A., Del, M., Escudero, C., Angélica, C., Delgado, F., & Salinas, A. C. (2014). *Caracterización De La Zona Costera Y Planteamiento De Elementos Técnicos Para La Elaboración De Criterios De Regulación Y Manejo Sustentable*. Instituto de Ingeniería UNAM. Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos.
- Crowell, M., Leatherman, P., & Buckley, M. (1991). Historical shorelines change error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 839–852.
- Escobar, A. (2011). *Relevancia de procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Uraba (Caribe colombiano)*. Boletín De Investigaciones Marinas Y Costeras, 40(2). <https://doi.org/10.25268/bimc.invenmar>.
- Ferrucho, I. (2021). *Cambios recientes de la línea de costa entre Bocas de Ceniza y Puerto Velero; y su relación con el transporte potencial longitudinal de sedimentos a escala intra e interanual*. Trabajo de Grado. Universidad del Norte.
- Guerrero, M. (2017). *Clasificación morfológica e hidrodinámica de las playas del caribe colombiano*. Universidad del Norte.

- Marengo, R. (2020). *Análisis de las condiciones hidrodinámicas en una playa micromareal intermedia reflejante: Caso de estudio Costa Verde, Magdalena*. Trabajo de Grado. Universidad del Norte.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Parra, C., & Chevillot, P. (1994). Dinámica Marina Y Sus Efectos Sobre La Geomorfología Del Golfo De Morrosquillo. In *Boletín Científico CIOH*.
- Osorio, A., Mesa, J., Bernal, G., & Montoya, R. (2009). *Fourty years of wave hindcast using Wave Watch III model and calibration with several data sources at the Caribbean Sea*. <http://oceanicos.unalmed.edu.co/www.cioh.org.co>
- Osorio, A.F., Gómez, A., Molina, L., Álvarez, O., Osorio, J., (2010). Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local (sea) y de fondo (swell) en el golfo de Urabá. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este, Uruguay.
- Ospina, L., & Saavedra, D. (2015). Variación espaciotemporal de la calidad del agua del Golfo de Morrosquillo durante el año 2013. In *Boletín Científico CIOH* (Vol. 33).
- Poveda, G. (2004). *La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna*. *Ciencias de La Tierra*, 201
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2009). *Perspectivas del medio ambiente: América Latina y el Caribe: GEO ALC 3*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe (ORPALC), División de Evaluación y Alerta Temprana (DEAT).
- Quintero Medina, E. Y. (2020). Análisis de la variabilidad del oleaje en el caribe colombiano y el golfo de Urabá.
- Rangel, N. (2005). *Geomorfología Y Procesos Erosivos En La Costa Norte Del Departamento De Córdoba, Caribe Colombiano (Sector Paso Nuevo-Cristo Rey)*. Instituto De Investigaciones Marinas Y Costeras.
- Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, 114, 129–144.
- Restrepo, J. C., Otero, L., Casas, A. C., Henao, A., & Gutiérrez, J. (2012). Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia). *Ocean and Coastal Management*, 69, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.027>
- Suárez Gómez, J. A. (2013). Influencia de factores oceánicos y climáticos en los manglares del golfo de Urabá. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.

Vega, M. (2017). *Comparación De Metodologías De Refinamiento De Escala De Reanálisis De Oleaje*. Universidad del Norte.