

Evaluación de las variables hidrodinámicas en la costa de la Isla Punta Soldado, Buenaventura

Franklin Farid Ayala Cruz^{a,1,*}, Johann K. Delgado^b, Andrés F. Osorio^c

^aIngeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

^bOCEANICOS Research Group, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

^cOCEANICOS Research Group, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

Resumen

El estudio de las variables hidrodinámicas oceánicas que inciden en la costa provee un conocimiento básico de las condiciones que alteran la geomorfología de las playas. Variables tales como el nivel del mar, el período pico, la altura de ola significante y la dirección media del oleaje son estudiadas con el fin de conocer su efecto en un problema de erosión en uno de los lados que da al mar de la Isla Punta Soldado, Buenaventura. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis estadístico de los regímenes medios y extremos para propagar el oleaje que genere las condiciones geomorfológicas actuales de la isla.

Palabras Clave:

Geomorfología, erosión, oleaje

1. Introducción

La acción de diferentes fenómenos como el viento, perturbaciones meteorológicas, tsunamis y demás (llamados generalmente *forzadores*) ocasionan perturbaciones en las masas de agua oceánicas generando así las olas. Cuando el viento actúa como el principal generador en alguna zona, el oleaje allí es más caótico, desordenado e irregular y se conoce como tipo *sea*. A medida que este oleaje se va propagando, ocurren una serie de fenómenos que lo ordenan en trenes de onda y pierde en buena medida su irregularidad, este oleaje es de tipo *swell*.

Cuando en una zona existe un solo tipo de oleaje, ya sea *sea* o *swell*, basta con determinar los parámetros integrales del oleaje: Altura de ola significante, período pico, período medio y dirección media. Dado que en muchos lugares esta situación no ocurre, sino que convergen 2 o más sistemas de oleaje, las técnicas de análisis se vuelven más complejas y se recurre a análisis espectral, este análisis permite una mayor aproximación a las condiciones que realmente se presentan en estas zonas.

En el pacífico colombiano, las condiciones meteorológicas locales están influenciadas por: a) La zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual se mueve según otros eventos macroclimáticos, b) Los tres chorros (Tehuantepec, Papagayo y Panamá) provenientes de los gradientes de presión entre norteamérica y el caribe-pacífico, c) El cinturón de tormentas extratropicales que genera un oleaje propagado a través de largas distancias que arriva a las playas en forma de *swell*.

Según lo descrito, en el pacífico colombiano interactúan más de dos sistemas de oleaje que no podrían ser analizados de una forma verídica con parámetros integrales del oleaje, por lo tanto, el estudio de este fenómeno debería realizarse a través de las condiciones espectrales que existen.

Dado que las técnicas de descomposición espectral de los tipos de oleaje incidentes no son bien dominadas, se asume que los valores de los parámetros del oleaje (dirección, período y altura de ola) están incluyendo los espectros existentes (Portilla et al., 2015). Estos parámetros componen el régimen medio usado para la determinación de las condiciones de frontera de los modelos de propagación de oleaje. Para establecer estas condiciones medias, se deben buscar fuentes de datos con registros fiables, en su preferencia continuos y con las menores resoluciones espaciales. Siguiendo esta línea de requisitos, hay tres fuentes de datos disponibles: Datos de boyas, datos satelitales y datos de reanálisis. Los datos de las boyas están disponibles para 3 años (2008-2010) con frecuencias del orden de días para los años 2008 y 2010 y del orden de horas para el año 2009. Los datos de reanálisis están a una resolución espacial de 0.5×0.5 grados y una resolución temporal horaria. Los datos satelitales tienen frecuencias de medición muy aleatorias y resoluciones espaciales confusas, dado que el satélite aunque realiza tomas puntuales, su órbita lo lleva a realizar un barrido muchas veces no homogéneo.

Es importante definir la zona de estudio, a saber, Isla Punta Soldado, la cual está ubicada al suroeste de la bahía de Buenaventura entre las latitudes $3^{\circ} 45'41,54''N$ y $3^{\circ}48'45,16''N$ y las longitudes $77^{\circ}11'1,40''W$ y $77^{\circ}8'33,83''W$. Su ancho y longitud miden aproximadamente 3.7 km y 5.7 km (Fig.1).

*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: ffayalac@unal.edu.co (Franklin Farid Ayala Cruz), jkdelgadog@unal.edu.co (Johann K. Delgado), afosorioar@unal.edu.co (Andrés F. Osorio)

¹Nota al pie para el autor 1



Figura 1: Zona de estudio

Basados en lo descrito anteriormente, se plantea el objetivo de este estudio como la caracterización del régimen medio de oleaje y marea en la Isla Punta Soldado, ubicada en la costa pacífica colombiana, específicamente en la bahía de Buenaventura.

2. Métodos y fuentes de información

2.1. Fuentes de información

2.1.1. Datos de boyas

La boya 32487 es la única estación cercana a la bahía de Buenaventura con registros de parámetros de oleaje disponibles y está adscrita al *National Data Buoy Center (NOAA)*, su ubicación es 3.517N 77.737W. Los años de los registros son 2008, 2009 y 2010 y entre los parámetros existentes están: Período de ola dominante, período de oleaje medio y altura de ola significante. Los registros de 2008 y 2009 presentan una longitud pequeña y discontinua, por lo que es difícil determinar una frecuencia de medición específica. La serie del 2009 posee una cantidad de registros cercana a los 8760 datos, lo que lleva a inferir que la frecuencia de medición estuvo cercana a la horaria. Esta última serie servirá para realizar una comparación con las demás fuentes de datos y evaluar su confiabilidad, dado que es la más continua de las 3 existentes y es la que representa los datos reales de la zona de estudio.

2.1.2. Datos de satélite

En la red abierta de datos oceánicos australiana (AODN) existen las series de mediciones de diferentes misiones satelitales, es importante aclarar que estas mediciones son secundarias a los objetivos principales que tienen estos satélites, y por ende su calidad no es la mejor. La forma en la que estos satélites logran obtener series de altura de ola es a través una técnica llamada altimetría. El principio fundamental de esta técnica es la superposición de imágenes tomadas por un satélite y el análisis de estas para su correlación con la altura de ola. Según sea el tipo de banda (c, Ku, Ka) en el que emite el satélite será el ajuste que se debe realizar (Ribal y Young, 2019). Debido a la forma en la que orbita un satélite la superposición de imágenes se da bajo la medición en puntos diferentes, esto agrega incertidumbre a los valores finales, puesto que no se puede asumir un solo lugar de medición. Para fines prácticos se asume el promedio de las longitudes y de las latitudes, como el punto específico en el que se midió.

Con el objetivo de comparar las series existentes con respecto a la estación 32487 se descargaron los datos más cercanos a este lugar y que estén en el rango de tiempo de comparación, es decir 2009. La única misión con datos para ese año y en una región espacial relativamente cercana es Sentinel 3. Debe recordarse que no existen valores de período medio, período pico y dirección media del oleaje.

2.1.3. Datos de reanálisis

Los datos de reanálisis fueron obtenidos del centro europeo de pronósticos meteorológicos a medio plazo (ECMWF), esta información surge de un proceso compuesto por registros históricos y una técnica llamada asimilación, en este proceso se emplean modelos de propagación de oleaje que ayuden a determinar los valores de los parámetros en tiempos y ubicaciones que no los tienen medidos. El modelo usado para propagación es el WAM, el cuál utiliza la ecuación de transporte de energía para calcular la evolución del espectro direccional de energía. Es importante hacer la salvedad que este modelo tiene un uso apropiado en zonas de aguas profundas, dado que en zonas de aguas intermedias y sónicas (como lo es regularmente cerca a la plataforma continental) aparece un ruido generado por el lecho marino. La relación h/L_o es mayor a 0.5 para la ubicación de la boya, por lo que puede concluirse que se está trabajando sobre aguas profundas, esta condición siempre deberá tenerse en cuenta para el uso posterior de los datos. Dentro de las diferentes variables que existen, se decargan solamente el período pico, la altura de ola significante y la dirección media del oleaje.

2.1.4. Datos de mareógrafo

La comisión oceanográfica intergubernamental de la UNESCO ha reunido un conjunto de estaciones de medición de nivel del mar, dentro de las cuales está el mareógrafo de Buenaventura (Código: Buve: 3.8906° N, -77.0808° W) operado por la CIOH con registros de nivel del mar desde 1970 a una resolución hora y diaria. En ambas resoluciones existen vacíos en los registros que pueden ser debidos a mantenimiento del equipo o inclusive reemplazo del mismo, puesto que existen desde el orden de días hasta el orden de meses. Estas series serán empleadas para el análisis de marea en la zona de estudio.

2.2. Comparación entre fuentes de datos

Dado que para el oleaje existen tres fuentes de datos diferentes debe determinarse la que se va a emplear para el análisis de régimen medio, por lo tanto, se decidió realizar una comparación entre la serie de 2009 de la boya y las series de reanálisis y satélite existentes en el mismo intervalo de tiempo y en las ubicaciones más próximas a la boya (Tabla 1); claramente las resoluciones de los satélites y del reanálisis no permiten una ubicación exactamente igual.

Inicialmente, se presentan las series temporales de H_s descargadas para el año 2009 (Fig. 2). Puede notarse que la resolución de los satélites es muy pobre respecto a la boya y el reanálisis, esto lleva a que se descarten los datos provenientes de satélite.

Para comparar los restantes de una mejor forma, debe igualarse la resolución temporal de las series, esto se realiza mediante una

Fuente	Ubicación
Boya	3.517, N 77.737 W
Satélite	Región $0.1^\circ \times 0.1^\circ$
Reanálisis	3.5 N, 282.5 W

Tabla 1: Localizaciones espaciales de las series temporales de altura de ola significante y periodo pico

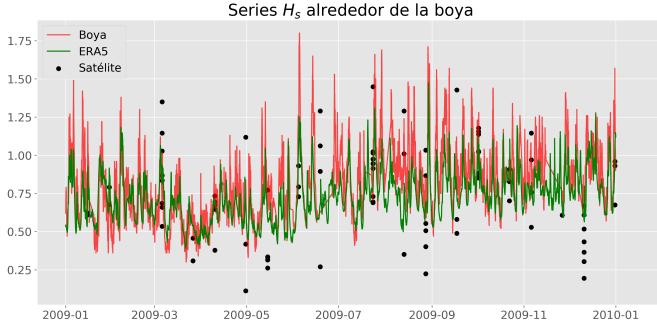


Figura 2: Series temporales de H_s obtenidas

reindexación de la serie de reanálisis, es decir, un ajuste de la resolución presentada por ésta respecto a la resolución presentada por la boya (Fig. 3). Este procedimiento sólo se puede realizar en este sentido dado que la longitud del registro de reanálisis es mayor.

En la figura 3 con las serie reindexada, el reanálisis logra capturar en buena medida los cambios en la magnitud y los valores mínimos de altura de ola significante respecto a la boya, sin embargo, no logra representar los valores máximos. Con el fin de notar esta diferencia, se realiza una comparación de estas series (reanálisis vs boya) en el dominio de la probabilidad a través de un qqplot; este gráfico confronta los cuantiles de una serie respecto a otra, así se conoce si una serie subestima o sobreestima los valores reales.

Se ha decidido involucrar los datos satelitales con el fin de comparar las estimaciones que realiza respecto a las otras fuentes de datos disponibles, puede concluirse a partir de la figura 4 que:

- Reanálisis subestima los valores reales de la boya, es decir, entre más grande es el valor de altura de ola, más se aleja el valor de reanálisis por debajo.

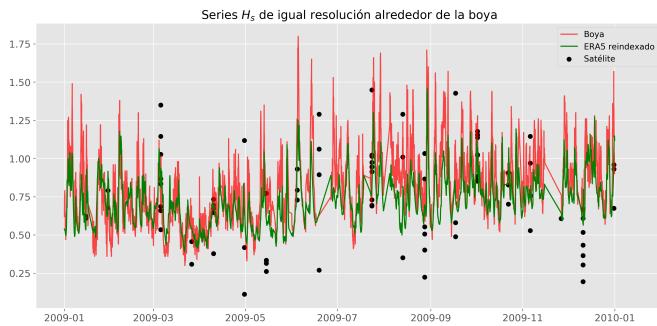


Figura 3: Series temporales de H_s ajustadas

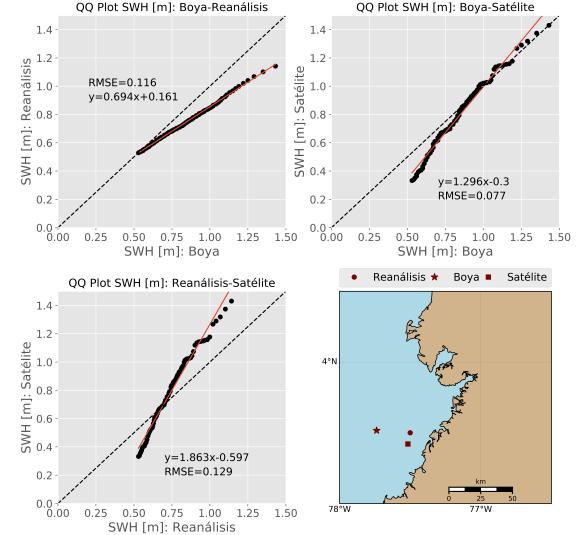


Figura 4: QQplots para H_s

- El satélite, por el contrario, en el primer segmento subestima los valores de la boya, pero después adopta una buena predicción conforme avanzan los valores de altura de ola.
- En el primer segmento del gráfico entre el satélite vs el reanálisis, es decir, en los primeros valores de altura de ola significante, el satélite subestima al reanálisis. Posteriormente pasa a sobreestimarlo a medida que aumentan los valores de altura de ola. En este caso se asumen los datos de reanálisis como más veraces y seguros que los satelitales.

Las ecuaciones presentadas en los QQplots, deben ajustarse a la línea $y=x$, con el objetivo de realizar el ajuste a los datos que se van a usar, esto permitirá representar los valores máximos y mínimos captados por la boya.

Reconociendo que los registros de reanálisis no sólo presentan un mejor ajuste frente a los de la boya (RMSE:0.116, PEARSON:0.77) sino que es la única fuente de datos con registros continuos y en resoluciones temporales de buenas y bien definidas, se decide descargar los datos existentes en ERA5 ya no sólo para 2009, sino desde 1973 (primer año de registros) hasta 2018. La descarga de estos datos dada la densidad que representan, se realiza con el API request del usuario creado en ERA5. Cada archivo representa un año de datos de período pico, altura de ola significante y dirección del oleaje y está en formato netCDF.

2.3. Climatología de olas

Con el fin de caracterizar el régimen medio del oleaje presente en la zona, se analiza la variación anual y estacional a lo largo de la longitud del registro (39 años)

2.3.1. Variación anual

La figura 5 muestra la varación anual de la altura de ola significante (H_s), período pico (T_p) y dirección media (Dir). El valor

medio anual de altura de ola es H_s y el valor máximo presentado es H_s^* , para el período pico el valor medio anual es T_p y el valor máximo fue T_p^* . Es notorio que los valores máximos se presentaron en el año 1998, año en el que se presentó un fenómeno ENSO (El Niño South Oscillation) muy fuerte (Capel Molina, 1999). Otros valores máximos de altura y período también parecen estar ligados a dicho fenómeno macroclimático (años 1988 y 1995). Esta especificación anterior, también permite reafirmar que la altura de ola y el período pico son eventos dependientes, dado que variaciones importantes de uno repercuten sobre el otro, como si de hecho, fuera un sistema acoplado.

La dirección del oleaje presenta variaciones de 260° hasta 273° . La tendencia de la altura de ola promedio anual no es significativa (del orden de $-0,001 \text{ mm/año}$), de igual forma para el período pico promedio anual ($-0,001 \text{ s/año}$)

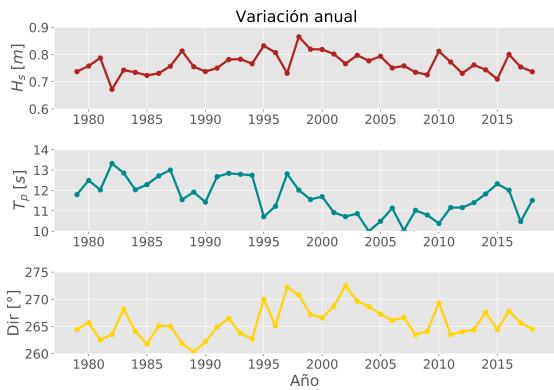


Figura 5: Variación anual del oleaje

2.3.2. Variación estacional

La temporada seca y húmeda en Colombia, está marcada por el paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), en la primera parte del año (Enero-Junio) se presenta la temporada seca, esto debido a que la ZCIT se encuentra en la posición más al sur de su recorrido, esto permite el paso de los vientos alisios del noreste, estos vientos como forzadores generan el mayor oleaje desde esa zona. Cuando la ZCIT se traslada hacia el norte, permite la entrada de los vientos alisios del sureste, según la figura 6 se espera un oleaje más energético desde esta dirección, aunque deberá corroborarse con una rosa de oleaje.

La dirección del oleaje presenta una transición desde el noroeste hacia el suroeste entre los meses de enero y mayo, a partir de mayo el oleaje se concentra más en la dirección suroeste, más adelante se concluirá acerca de estas direcciones predominantes. La máxima variación mensual es de 14° y el valor promedio de 5°

2.4. Análisis de marea

El primer paso con los datos de marea es eliminar la tendencia asociada a datos de superficie libre, esto se reliza elaborando los promedios anuales y obteniendo la pendiente que marca el ascenso anual de cada promedio.

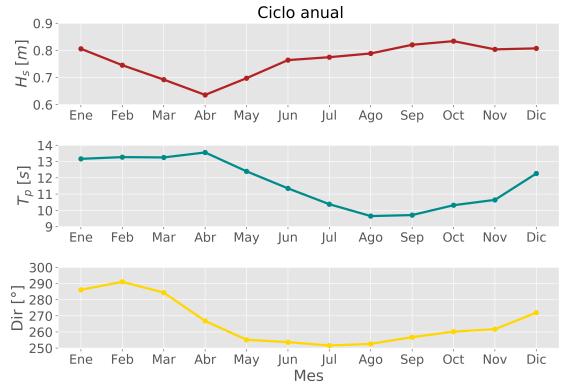


Figura 6: Ciclo anual del oleaje

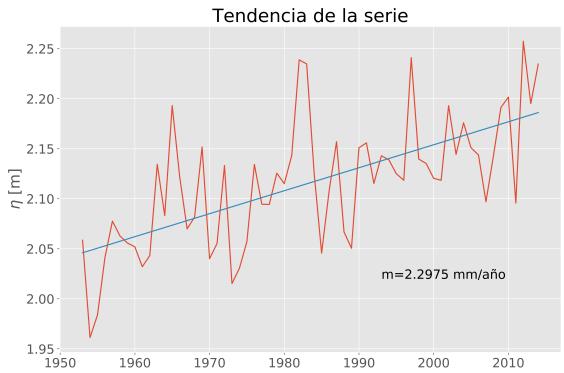


Figura 7: Tendencia de la serie de nivel del mar

Posteriormente, como es bien sabido, la marea está compuesta por una parte astronómica (determinística) y otra parte aleatoria (estocástica), por lo tanto, se requiere de un análisis armónico que determine la marea astronómica como resultado del aporte de las amplitudes de cada componente.

La herramienta utilizada para el análisis armónico es el script `t_tide.py`, basado en la rutina `t_tide` desarrollada inicialmente para Matlab (Pawlowicz et al., 2002). Este script exige dos condiciones iniciales que deben cumplir las series de nivel del mar para poder determinar a cabalidad las componentes de dicha marea, adicionalmente, solicita como datos de entrada la serie de anomalías del nivel del mar, el intervalo de muestreo y la latitud de la zona donde se captó la serie.

- Menor a 18.6 años: Esta condición existe debido a que el cabeceo de la luna, es decir, su cambio orbital, ocurre en este intervalo de tiempo. Por lo tanto, cada 18.6 años la marea astronómica es igual y determinándola para dicha franja de tiempo se puede determinar para muchos años más.
- Continuidad de la serie: Cuando la serie de nivel del mar tiene muchos huecos, así sean llenados con valores *Nan*, las componentes de la marea se alejan de su valor verdadero.

Se realizó primeramente la determinación de la mayor cantidad de años con registros continuos, el resultado encontrado

fue desde el año 1980 hasta el año 1986. La situación ideal sería tener 18.6 años de datos, que aunque no continuos, tuvieran menos datos faltantes que los que en realidad hay, pues sólo hay 3728642 de los 48282 que podrían existir para un registro horario.

A continuación, mediante el uso de ttide, sólo se presentan 5 componentes (M2, S2, N2, K1 y K2), dado que resumen cerca del 90 % de la marea astronómica en la zona. Los valores observados, son bastante similares a los reportados por el IDEAM en un documento de caracterización de marea en el Pacífico, aunque hay que tener en cuenta que pueden haber magnitudes en las amplitudes que no aparezcan debido al registro menor a 18.6 años. A su vez, puesto que la componente principal o de mayor importancia es la M2, se concluye que la marea es semidiurna, es decir, presenta una pleamar o una bajamar cada 6 horas; esto último también concuerda con lo reportado en la literatura.

La siguiente gráfica presenta las series de marea real, astronómica y residual. La marea residual se obtiene al restar la componente astronómica de la marea real.

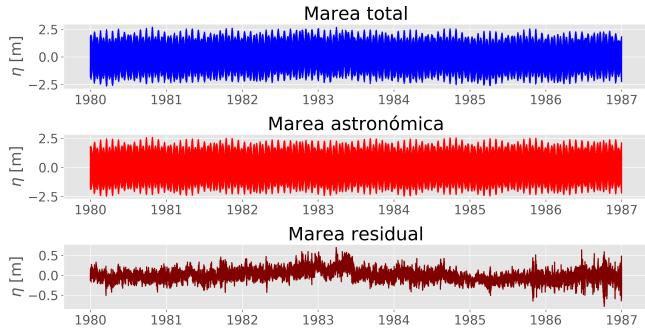


Figura 8: Series de marea (1980-1986)

Aunque muchos valores de marea residual sean naturalmente elevados dadas las condiciones climáticas para esos años, existen unos valores pico en la serie que no parecen normales. A continuación se presenta un ejemplo.

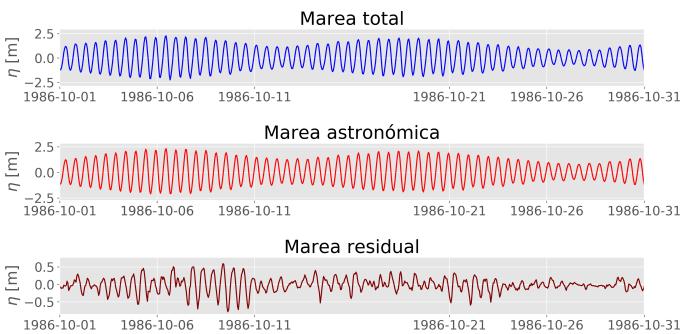


Figura 9: Picos en los registros de la serie residual de marea

Haciendo un zoom en la franja de tiempo que presenta los picos, se tiene:

Como puede notarse, esto obedece a un error de fase entre las series real y astronómica y, dado que no es justificable, se emplean otras formas de obtener las series de marea astronómica,

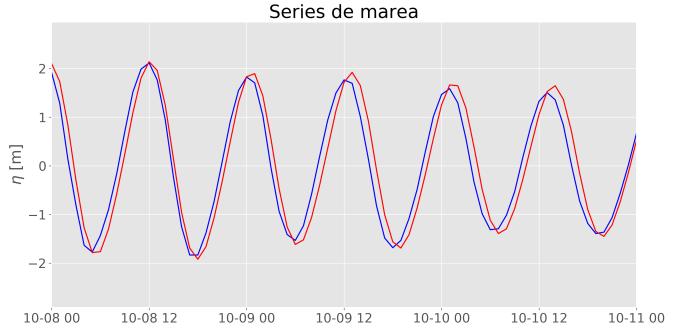


Figura 10: Desfases entre la serie real y la astronómica

con el objetivo de que aparezcan bien enfocadas respecto a las condiciones medidas.

Dentro de las técnicas usadas estuvieron:

- Completar la serie con valores correspondientes a 28 días y 10 horas (ciclo lunar aproximado)
- Intentar evaluar año a año reemplazando valores vacíos con NaN
- Intentar reconstruir la marea astronómica desde las componentes extraídas del análisis armónico (xout), esto involucró revisar el script original de ttide de python.
- Verificar si existe un comportamiento anómalo de los períodos (pasos ascendentes por cero)
- Obtener la marea astronómica para 18 años al haber reemplazado con NaN y reemplazar los datos faltantes con los obtenidos de la astronómica, con el objetivo de volver a realizar un análisis armónico (es similar a un proceso de iteración)

3. Resultados

3.1. Eventos medios

Para determinar los eventos medios, primero debe reconocerse que existe un oleaje que incide desde diferentes direcciones, por lo tanto debe graficarse una rosa de oleaje que represente dichas condiciones.

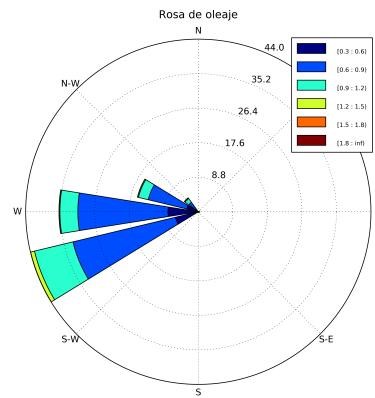


Figura 11: Rosa de oleaje

La rosa de oleaje muestra las direcciones principales del oleaje, la frecuencia que tienen cada una de ellas y las respectivas alturas de olas significantes. El campo de dirección se compone de 16 zonas de 12.5° cada una, esto discretiza el dominio direccional, útil en el uso posterior de modelos de propagación.

Tal como se relata una cartilla meteorológica de Buenaventura y cómo puede notarse en la figura 6, el oleaje comienza al principio del año en una dirección sur oeste y al final del año va avanzando hacia el norte, dejando sus principales registros en las direcciones W y WSW con cerca del 70 % de los datos (Fig.12). Otras direcciones importantes son, aunque con probabilidades más bajas.

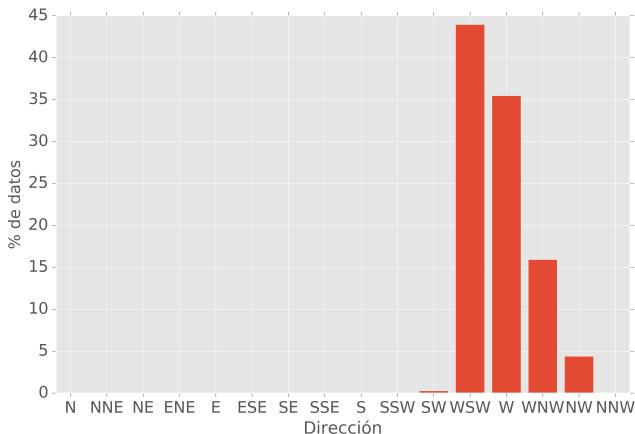


Figura 12: Probabilidad direccional

Posteriormente, se filtra el registro temporal a través de éstas direcciones y a partir de los histogramas bivariados entre H_s y T_p para cada dirección, se determina en cada región (x, y), el número de duplas (H_s, T_p) que quedaron contenidas. El objetivo de estos histogramas es la determinación de la frecuencia relativa normalizada respecto a la frecuencia máxima.

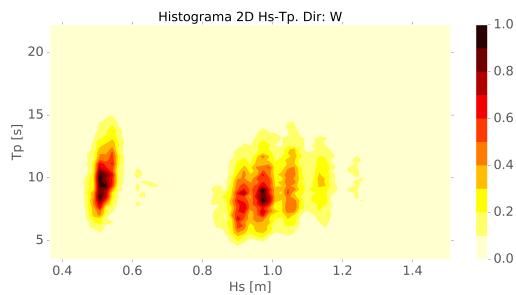


Figura 13: Frecuencia relativa 2D $H_s - T_p$. Dir: W

Los gráficos de frecuencia relativa (Fig. 13, Fig. 14 y Fig. 15) finalmente determinan los casos más representativos del oleaje para cada una de las direcciones (H_s - T_p -Dir), elegidos en un uso posterior, como parámetros de entrada para los modelos de propagación de oleaje. Es posible verificar la hipótesis de la existencia de 2 o más sistemas de oleaje en la zona, dado que existen dos regiones (H_s, T_p) diferentes que concentran una mayor probabilidad conjunta que las demás.

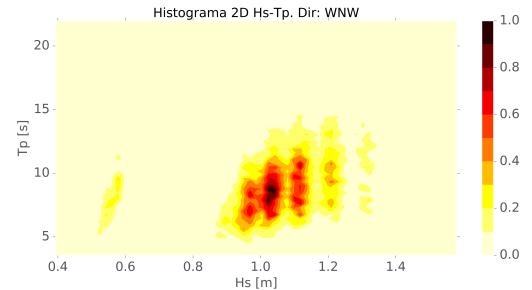


Figura 14: Frecuencia relativa 2D $H_s - T_p$. Dir: WNW

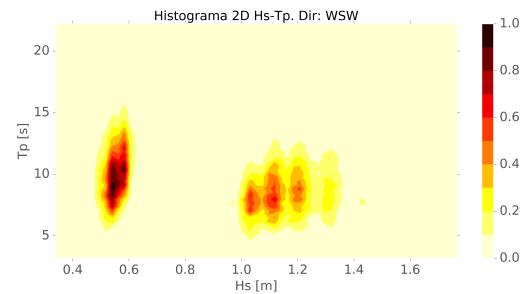


Figura 15: Frecuencia relativa 2D $H_s - T_p$. Dir: WSW

Es importante recordar que, como condiciones de frontera, se deben descargar las series de reanálisis en los puntos más próximos al área de modelado del SMC, por lo tanto, las posiciones de dichos puntos son [3.5°N, 282.5°W] y [4.0°N, 282.5°W]

4. Conclusiones

Las fuentes de datos disponibles con buenas resoluciones temporales y espaciales son limitadas, siendo un inconveniente para los futuros análisis que se realicen en el pacífico colombiano. Aunque los datos de reanálisis presentan características aceptables, tienen restricciones en su aplicación, junto con los satelitales, cerca a la costa. Es de intereses futuros, realizar modelos de propagación en las proximidades de las costas del pacífico, con el fin de obtener condiciones espaciales y temporales del oleaje, que ayuden a entender cómo este fenómeno modula la morfodinámica de las mismas.

La variación anual y estacional del oleaje en isla Punta Soldado es influyente por fenómenos locales (regímenes de vientos) y de gran escala (corrientes extratropicales) que merecen un análisis espectral exhaustivo. Aunque las variables de reanálisis, al parecer involucren tanto el oleaje sea como el swell, no se llega a conocer como determinan un sólo parámetro de altura de ola y período

Debe continuarse un análisis exhaustivo acerca del llenado de las series de nivel del mar que permitan obtener las series astronómicas, existen metodologías en la literatura que podrían emplearse (Otero, 2017) o ajustes a realizar en los parámetros de entrada del script t_tide.py. Despues de determinarse la series astronómicas, el propósito fundamental será la obtención de las series residuales que permitan identificar los eventos

asociados a procesos meteorológicos aleatorios (tormentas, huracanes, entre otros) y otros eventos que pueda tener períodos más largos y en una escala espacial mayor (Fenómeno ENSO y otros)

Es de interés colectivo, conocer la influencia del cambio climático y de los fenómenos macroclimáticos en el oleaje y la marea de la zona, con el fin de obtener planes de contingencia que sirvan como herramientas de diagnóstico y planeación del territorio puesto que, en las zonas costeras colombianas, las dinámicas económicas son muy dependientes del estado del mar. Posteriormente estudios deberán estar orientados hacia esta realidad inminente

Referencias

- Capel Molina, J. J., 1999. EL FENÓMENO ENSO (EL NIÑO / OSCILACIÓN DEL SUR) EN 1997-1998. ALTERACIONES INDUCIDAS EN EL MUNDO, 37–62.
- Otero, L., 2017. Determinación del régimen medio y extremal del nivel del mar para la Bahía de Buenaventura (August).
DOI: 10.26640/01213423.11.30
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE § 28, 929–937.
- Portilla, J., Lucía, A., Padilla-hernández, R., Cavalieri, L., 2015. Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean (June).
DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.06.005
- Ribal, A., Young, I. R., 2019. 33 years of globally calibrated wave height and wind speed data based on altimeter observations (January).