



Revista Politécnica

ISSN: 1390-0129

ISSN: 2477-8990

Escuela Politécnica Nacional

Jácome, Edwin

Análisis de Condiciones Extremas de Oleaje en el Archipiélago de Galápagos

Revista Politécnica, vol. 50, núm. 1, 2022, Agosto-Octubre, pp. 7-14

Escuela Politécnica Nacional

DOI: <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n1.01>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688772225001>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Análisis de Condiciones Extremas de Oleaje en el Archipiélago de Galápagos

Jácome, Edwin<sup>1,2,\*</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador

**Resumen:** El presente trabajo tiene como finalidad realizar un análisis de las condiciones extremas de oleaje en el Archipiélago de Galápagos. Para lo cual, se utilizaron datos de oleaje y viento del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF). Primero, se realizó una caracterización del espectro de oleaje, luego se utilizó el Análisis de Valor Extremo EVA, con el método de pico sobre umbral (POT). Para encontrar los eventos extremos y sus periodos de retorno a 100 años. Finalmente, se realizó el análisis físico de las tres mayores tormentas registradas en el periodo de 1979 a 2015. En las cuales se determinó que sus trayectorias ascendentes (de sur a norte) y su gran intensidad, generan el oleaje de fondo (swell) que contribuye con la producción de valores extremos en las Islas Galápagos. Además, la máxima altura significativa de ola es de 3,8 m para un periodo de retorno de 100 años.

**Palabras clave:** Oleaje Galápagos, Análisis de Valor Extremo, pico sobre umbral.

## Analysis of Extreme Wave Conditions in the Galápagos Archipelago

**Abstract:** The aim of this work is to carry out an analysis of the extreme wave conditions in the Galápagos Archipelago. For which, Wave and wind data from the European Center for Medium-Range Weather Prediction (ECMWF) were used. First, we do a characterization of the wave spectrum, then we use the Extreme Value Analysis (EVA), with the peak over threshold method (POT). After that, we found the extreme events and their return periods to 100 years. Finally, the physical analysis of the three largest storms recorded in the period from 1979 to 2015 was carried out. In which we determined that their upward trajectories (from south to north) and their great intensity generate the bottom swell, that contributes to the production of extreme values in the Galapagos Islands. Furthermore, the maximum significant wave height is 3.8 m for a return period of 100 years.

**Keywords:** Galápagos Swell, Extreme Value Analysis, peak over threshold.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las islas Galápagos se encuentran en el pacífico ecuatorial, a unos 1000 km de la costa del Ecuador. Su condición de oleaje se ve afectado principalmente por oleaje y vientos provenientes del sureste (Trueman & d'Ozouville, 2010). El clima se encuentra dividido en dos zonas a lo largo del año, de enero a mayo la estación cálida y de junio a diciembre la estación fría. (Hamann, 1979; Itow, 2003). Durante la estación cálida, se presenta mayor cantidad de precipitación por la temperatura elevada de la superficie. Provocando grandes olas que dificultan el desarrollo de las actividades marítimas en las islas. Además, el clima de Galápagos se ve afectado por el fenómeno del Niño, o "El Niño Oscilación del Sur" (ENOS) por sus siglas en inglés. La fase fría de ENOS se conoce como La Niña y la fase cálida como El Niño (Sachs, 2011). Durante los eventos de El Niño, el Pacífico oriental experimenta una

alta temperatura de la superficie del mar, lo que debilita los vientos alisios del sureste incrementando aún más la temperatura asociada con el desplazamiento hacia el sur de la Zona de convergencia intertropical (ZCIT). Los eventos más fuertes registrados de El Niño en Galápagos incluyen: 1975–6, 1982–3, 1986–7, 1993–4 y 1997–8 (Snell & Rea, 1999). Lo que ha provocado situaciones de riesgo y malestar para la comunidad. Más aún, considerando que muchas actividades de la población (transporte, turismo, pesca, entre otras) están directamente vinculadas al mar. Entre los diversos eventos de riesgo están los de oleaje, marea, viento, tsunamis, entre otros. De estos, el que históricamente ha estado asociado al mayor número de incidentes es el oleaje, debido a su naturaleza variable.

A lo largo de los últimos años, el problema del oleaje se ha notado mucho más debido al incremento del tráfico marino en

\*angel891611@hotmail.com

Recibido: 29/03/2021

Aceptado: 12/04/2022

Publicado en línea: 25/05/2022

10.33333/rp.vol50n1.01

CC 4.0

las islas y no solo ha llevado a producir daños materiales si no también riesgo a las personas. Como sucedió en junio del 2014, donde los fuertes oleajes provocaron que dos embarcaciones de pesca artesanal se hundieran y otras dos quedarán dañadas. Además, se instalaron banderas rojas en varios puntos de la playa para que alertar del peligro y se realizó recomendaciones a los capitanes de las embarcaciones y exigir con mayor énfasis el uso de chalecos salvavidas entre los pasajeros (El Universo, 2014). Otro evento de gran magnitud sucedió en mayo del 2015, el cual destruyó parte del Malecón de San Cristóbal, en Galápagos, y hundió una lancha anclada frente a las costas, además tuvieron que retirar del mar a niños y jóvenes que practicaban surf (El Comercio, 2015). También se han reportado accidentes de embarcaciones de transporte de bienes, los mismos que han dejado a las islas en condiciones de desabastecimiento. Por ejemplo, el carguero “Floreana” encalló frente a la isla de San Cristóbal el 28 de enero del 2015. En el mismo sector, el carguero “Galapaface I”, que transportaba combustibles fósiles, encalló el 9 de mayo del 2014. Los dos barcos quedaron fuera de circulación luego del accidente y fueron hundidos.

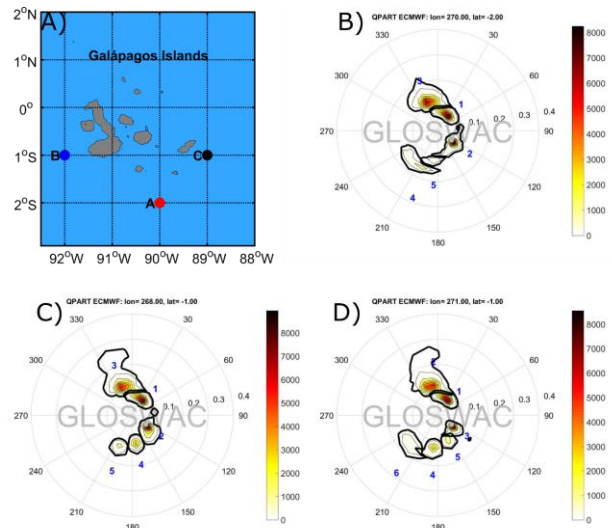
Existen instancias nacionales responsables de suministrar información y establecer protocolos en situaciones de riesgo. Sin embargo, dicha información es de poca utilidad, actualmente ya sea porque es demasiado vaga, demasiado técnica, o simplemente porque la comunidad no está familiarizada con ella. El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de condiciones extremas de oleaje en el archipiélago de Galápagos, para lo cual primero se realizará la revisión de las características espectrales de oleaje que afectan al archipiélago, luego se aplicará la teoría del valor extremo (EVA) por sus siglas en inglés, con datos de altura significativa ( $H_s$ ) de ola desde 1979 hasta 2015. Con esto se tiene el valor  $H_s$  para periodos de retorno de 100 años, que son muy útiles y se utilizan como parámetros de diseño en estructuras marinas y finalmente se analizarán eventos extremos por su condición física.

## 2. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES

El oleaje en el pacífico ecuatorial ha sido estudiado en los últimos años. Sosa y Portilla (2014) presentaron la caracterización espectral a largo plazo de tres localidades en aguas profundas: Islas Galápagos, Esmeraldas y Guayas. En los cuales se caracterizó cuatro regímenes de olas: dos de ellos se propagan al norte, dos al sur. En otro estudio (Portilla, 2016), se presentó la estadística a largo plazo de oleaje al pacífico ecuatorial en el cual se determinó, que en este sector dominan cuatro sistemas de olas. El primero que fluye principalmente a  $40^\circ$ , tiene origen en la tormenta del cinturón antártico en el Pacífico meridional hasta Australia y Nueva Zelanda. El segundo, que va desde  $120^\circ$ , se asocia a tormentas del Atlántico Norte en un cinturón entre  $15^\circ \text{ N}$  y  $30^\circ \text{ N}$ . El tercero fluye en el mismo cuadrante direccional del primero ( $10^\circ$ ), pero la frecuencia característica es más alta. El cuarto está conectado al chorro de Panamá.

Las características espectrales en las Islas Galápagos no varían demasiado de estos estudios. Para el presente estudio se utilizarán datos de Portilla (2018), en el cual se puede obtener datos estadísticos de oleaje a largo plazo. Los resultados se

presentan en función de la frecuencia y utilizando la técnica de partición espectral (Portilla et al., 2009), se puede visualizar los diferentes sistemas de los que está compuesto el espectro. Se ha dividido tres puntos distribuidos a lo largo de las Islas Galápagos los cuales son: (ver Figura 1) el punto A localizado en longitud  $270^\circ$  y latitud  $-2^\circ$  ( $S 2^\circ O 90^\circ$ ) el punto B localizado en longitud  $268^\circ$  y latitud  $-1^\circ$  ( $S 1^\circ O 92^\circ$ ) y el punto C localizado en longitud  $271^\circ$  y latitud  $-1^\circ$  ( $S 1^\circ O 89^\circ$ ).



**Figura 1.** Características espectrales de la región insular del Ecuador (Islas Galápagos): Panel A) localización geográfica de los puntos de análisis, B) Punto A localizado en  $S 2^\circ O 90^\circ$ , C) Punto B localizado en  $S 1^\circ O 92^\circ$ , D) Punto C localizado en  $S 1^\circ O 89^\circ$

Información tomada de: (Portilla-Yandún & Jácome, 2020; Portilla, 2018)

El punto A presenta 5 sistemas: El primero se propaga hacia  $30^\circ$  (desde el suroeste) y su pico de frecuencia está alrededor de  $0,07 \text{ Hz}$ . El segundo sistema fluye a  $120^\circ$  y su frecuencia está cercana a  $0,08 \text{ Hz}$ . El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de  $135^\circ$  y una frecuencia de  $0,1 \text{ Hz}$ . El cuarto tiene una dirección de  $200^\circ$  con una frecuencia de  $1,4 \text{ Hz}$  y proviene del Norte. El quinto es despreciable. En cambio, el punto B presenta 5 sistemas: El primero se propaga hacia  $30^\circ$  (desde el suroeste) y su pico de frecuencia está alrededor de  $0,075 \text{ Hz}$  (Similar al punto A y C). El segundo sistema fluye a  $130^\circ$  y su frecuencia está cercana a  $0,09 \text{ Hz}$ . El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de  $135^\circ$  y una frecuencia de  $0,1 \text{ Hz}$  (Similar al punto A y C). El cuarto tiene una dirección de  $175^\circ$  con una frecuencia de  $1,3 \text{ Hz}$ . El quinto tiene una dirección de  $200^\circ$  y una frecuencia pico de  $1,4 \text{ Hz}$  (Similar al cuarto del punto A). Por último, para el punto C presenta 6 sistemas. El primero se propaga hacia  $30^\circ$  (desde el suroeste) y su pico de frecuencia está alrededor de  $0,07 \text{ Hz}$  (Similar al punto A y B). El segundo sistema fluye a  $125^\circ$  y su frecuencia está cercana a  $0,09 \text{ Hz}$  (Similar al punto B). El tercero es el más amplio y está relacionado con el viento local con una dirección de  $140^\circ$  y una frecuencia de  $0,1 \text{ Hz}$  (Similar al punto A y B). El cuarto tiene una dirección de  $185^\circ$  con una frecuencia de  $1,3 \text{ Hz}$ . El quinto tiene una dirección de  $160^\circ$  y una frecuencia pico de  $1,1 \text{ Hz}$ . El sexto es despreciable.

### 3. ANÁLISIS DE VALOR EXTREMOS EVA

En los procesos de diseño, por ejemplo, de estructuras oceánicas como rompeolas u otras estructuras expuestas a factores medioambientales, uno de los parámetros fundamentales es el valor de las cargas máximas a las que serán expuestas. Estas cargas definen su requerimiento de resistencia y por lo tanto están directamente relacionadas a los costos de fabricación. El diseño bajo parámetros inferiores a los requerimientos involucra riesgo de falla, mientras que el sobre-dimensionamiento implica costos elevados, probablemente no factibles (Jácome, 2017). Sin embargo, las variables medioambientales (e.g., viento, caudal hidrológico, oleaje, entre otros) son variables esencialmente aleatorias, por lo que la metodología para la determinación de las cargas de diseño, debe ser necesariamente de carácter estocástico, incurriendo en un problema donde no siempre se tienen registros estadísticos de estas variables y si existen no suelen ser muy extensos. En general, el tiempo de vida útil considerado para el diseño siempre las supera, por lo que es necesario estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento extremo en el futuro.

La metodología para abordar este tipo de problemas está bien especificada y se basa en la teoría de valores extremos (EVA por sus siglas en inglés), que consiste en proyectar o “extrapolar” a partir de una serie limitada de datos observados, la probabilidad de ocurrencia de un valor futuro extremo (Holthuijsen, 2007). Las condiciones estadísticas necesarias para la aplicación de esta teoría son: 1) Los eventos deben ser estadísticamente independientes. Por ejemplo, en el oleaje, el valor de altura significativa comúnmente no es independiente, un valor alto de la altura significativa de ola es por lo general precedido y seguido por otro alto valor. 2) Los eventos deben estar idénticamente distribuidos en cuanto a su naturaleza. Esto generalmente no ocurre porque los datos pueden tener orígenes diferentes (Jácome, 2017).

La contribución del presente trabajo es realizar una evaluación de EVA, a series de tiempo separadas según su origen. Para ello, mediante el uso de la técnica de partición espectral (Portilla, 2009) se identifica y separa los eventos según su génesis física para obtener proyecciones estadísticas independientes que en principio son más robustas en el cálculo de valores extremos. Así mismo, los valores de periodo de retorno obtenidos de esta manera serán también más precisos para el diseño. Para realizar este análisis se utilizarán series de oleaje del Pacífico Ecuatorial Oriental, de la base de datos de REANALISIS ERA-INTERIM del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF por sus siglas en inglés) (Dee et al., 2011). Estos datos cubren el período desde 1979 hasta el 2018, discretizados espacialmente en una malla Gaussiana reducida con una resolución espacial de aproximadamente 110 km. La variable principal es el espectro de oleaje, disponible en intervalos de 6 h, haciendo para un punto un total de más de 54.000 espectros con una resolución de  $30 \times 24$  en el espacio ( $f-\theta$ ). Con esto se espera obtener periodos de retorno para valores extremos, series totales y separadas, con el fin de estimar los parámetros estadísticos (eg. periodo de retorno), y determinar casos en los cuales pueda existir subestimación o sobrestimación de los mismos (Portilla-Yandún & Jácome, 2020).

Para la extrapolación se utiliza la distribución que mejor se ajusta a los valores. Con la finalidad de facilitar la capacidad de juzgar un ajuste, es conveniente usar la función de distribución acumulada, en lugar de la función de densidad de probabilidad (Holthuijsen, 2007), porque cuando se representa en el papel las escalas adecuadas, la función de distribución acumulativa aparecerá como una línea recta alrededor de la cual los datos deben agruparse como se puede observar en la Figura 2.

La elección de las distribuciones es bastante arbitraria, pero la experiencia basada en la literatura ayuda a limitar la elección a sólo unas pocas funciones. Una de ellas es la que se deriva del pico sobre umbral o Peaks Over Threshold (POT), la cual considera sólo el valor máximo de  $H_s$  en un espacio temporal conocido como tormenta. Una tormenta se define como una secuencia ininterrumpida de valores de  $H_s$ , que superan un cierto valor y este debe ser bastante alto (umbral), precedido y seguido por un valor menor. El valor elegido para este umbral depende en gran medida de las condiciones locales (Coles & Walshaw, 1994).

El método de pico sobre umbral (POT) permite seleccionar de una mejor manera los eventos extremos de una serie de datos, este valor de umbral o también conocido como valor de tormenta, es un dato empírico a partir del cual se puede considerar como extremo a un evento. Sin embargo, en la selección de este umbral reside la complejidad de este método ya que un valor muy bajo infringiría las condiciones básicas del modelo. En cambio, mientras más alto sea este valor se trabajará con una cantidad menor de datos, por ende, se perdería confiabilidad en el ajuste (Holthuijsen, 2007). Hay que mencionar que no existe un criterio unificado para definir estrictamente lo que se considera un evento pico o evento extremo (Coles et al., 2001), la característica fundamental presente en este método, es conseguir una población de valores elevados y estadísticamente independientes. Una forma de garantizar esta condición estadística es seleccionar un valor dentro de la variable tiempo, cuya duración debe ser determinada por las características del fenómeno ambiental, en el caso del oleaje un valor recomendado es de 48 horas, este valor de duración de evento se justifica, ya que es el tiempo medio que suelen durar las perturbaciones atmosféricas causantes del oleaje (González, 2013; Simiu & Heckert, 1996; Walton, 2000), de esta forma cada valor de máximo seleccionado pertenecerá a perturbaciones diferentes. En este análisis, se utilizará una separación de 24 horas, seleccionando en dicho intervalo el mayor valor. La distribución del máximo en una secuencia de valores que ocurren encima de un umbral se ajusta a la distribución generalizada de Pareto (Castillo, 2012; Coles et al., 2001; Holthuijsen, 2007). Este enfoque POT tiene dos ventajas importantes: (a) Seleccionar únicamente los valores elevados en la altura significativa de ola. La eliminación de eventos menores tiende a concentrar el análisis en el régimen que domina a los extremos; y (b) las tormentas son estadísticamente eventos independientes, que proporcionan una base teórica más sólida y simplifican la interpretación de los resultados del análisis (por ejemplo, la estimación de los errores de muestreo involucrado).

Para la estimación del umbral, se utilizará la técnica descrita en Portilla-Yandún & Jácome (2020). La cual sugiere que para

datos de oleaje un valor de tormenta se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

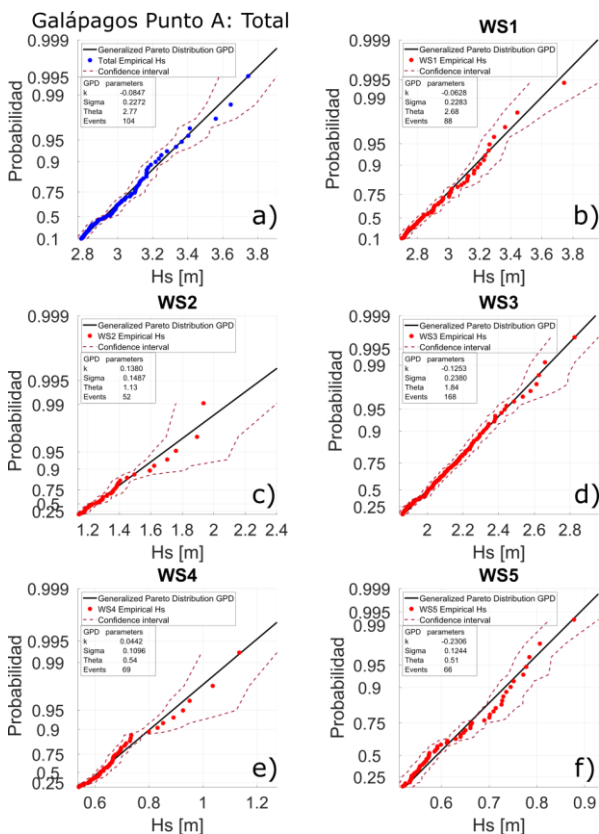
$$\sigma^* = \sigma_\mu - \kappa_\mu \quad (1)$$

En dónde  $\sigma^*$  parámetro de normalización modificado,  $\sigma_\mu$  es el parámetro de normalización para un determinado umbral y  $\kappa_\mu$  es el parámetro de forma para un determinado umbral. En base a la estabilidad mostrada por  $\sigma^*$  y el periodo de retorno para el máximo número de años del estudio ( $H_{s37}$ ) se determina el valor del umbral óptimo para cada punto de análisis de la serie de datos seleccionada.

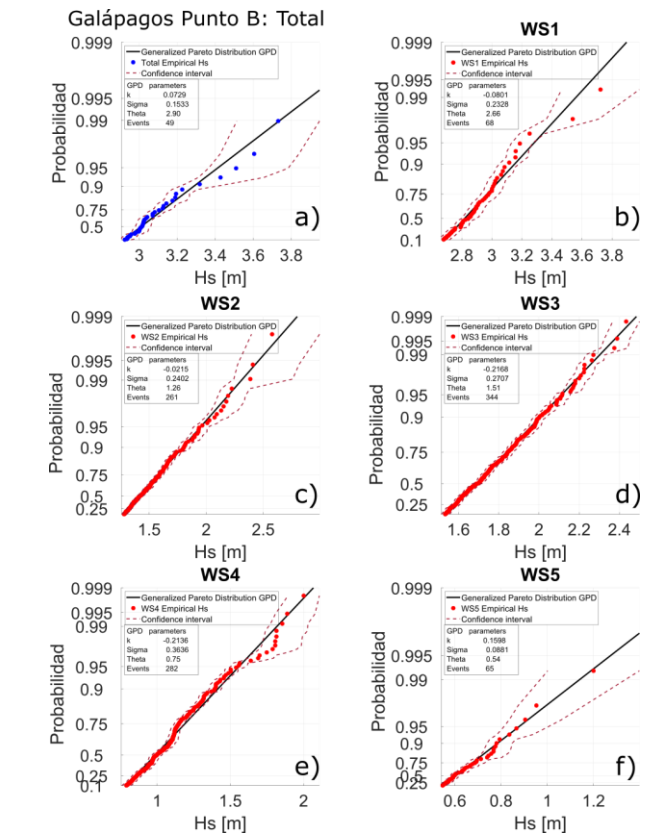
### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de valor extremo EVA en Galápagos

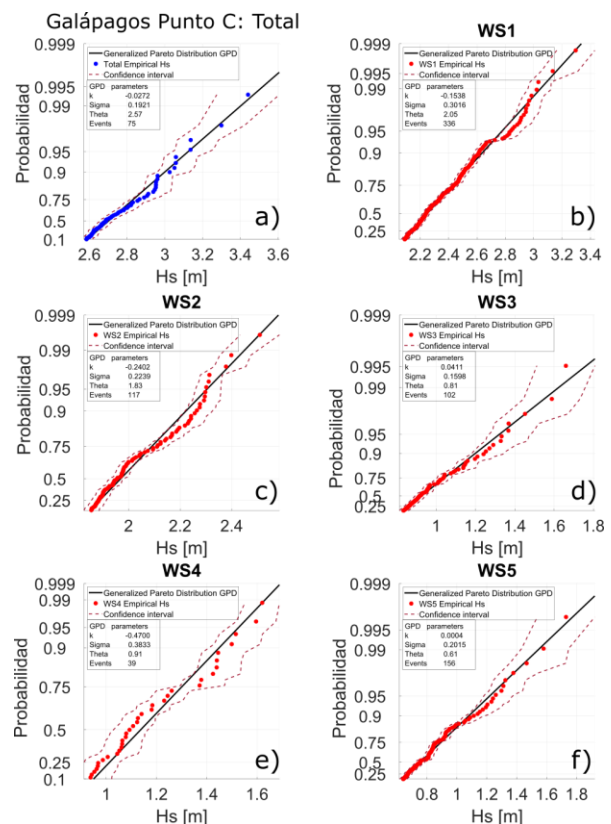
Al realizar el análisis de valor extremo es necesario obtener las series separadas en el espacio temporal, para lo cual se utiliza la técnica de separación espectral (Ver Portilla, 2009) y el método de selección de umbral descrito en Portilla-Yandún & Jácome (2020). Los resultados de este análisis se presentan en las Figuras de la dos a la cinco.



**Figura 2.** Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto A ubicado en Lon: 268° y Lat: -2°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente

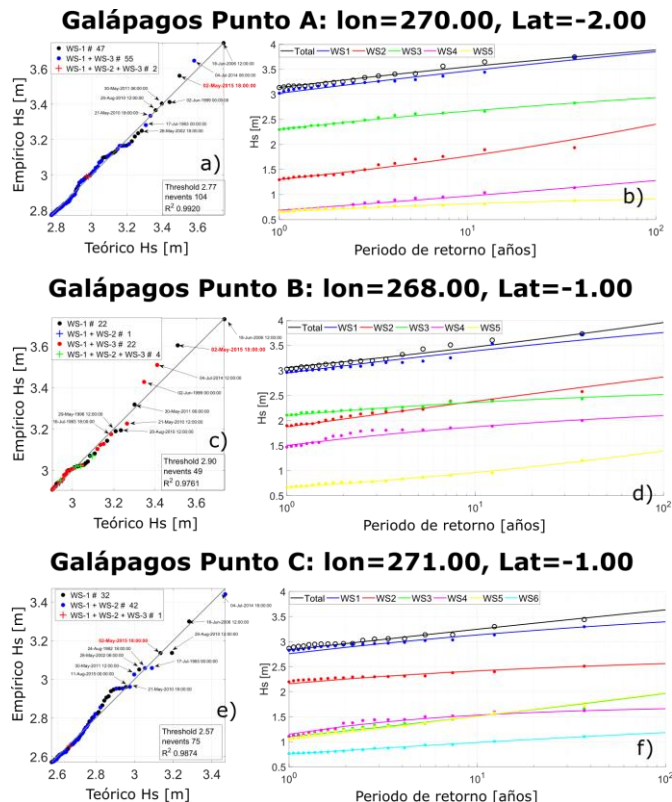


**Figura 3.** Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto B ubicado en Lon: 268° y Lat: -1°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente



**Figura 4.** Gráficos Q-Q resultado de EVA, para el punto C ubicado en Lon: 271° y Lat: -1°. Panel A serie total, Panel B – F, Series particionadas WS1, WS2, WS3, WS4, WS5, respectivamente





**Figura 5.** Altura significativa de ola para diferentes periodos de retorno, panel a) gráfico Q-Q y b) periodo de retorno del punto A; panel c) gráfico Q-Q y d) periodo de retorno del punto B; e) gráfico Q-Q y f) periodo de retorno del punto C

En la Figura 2, se muestra el análisis EVA para el punto A (Lon: 268° y Lat: -2°), en el cual se observa que, para la serie total el parámetro de forma  $\kappa$  es negativo, es decir, que tiene un límite para su valor extremo, mientras que en las series particionadas SW2, SW4 el parámetro de forma  $\kappa$  es positivo, esto es, que no tiene un límite superior. En este ejemplo se muestra que tres de las series presentan un comportamiento estadístico similar a la serie total (SW1, SW3 y SW5), mientras que las otras dos (SW2 y SW4) por su condición estadística podrían superar a la total, en la proyección de extremos.

En la Figura 3, se muestra el análisis EVA para el punto B (Lon: 268° y Lat: -1°), a diferencia del anterior, para la serie total el parámetro de forma  $\kappa$  es positivo, es decir que sus extremos pueden crecer de manera infinita, mientras que en las series particionadas SW1, SW2, SW3 y SW4 el parámetro de forma  $\kappa$  es positivo, es decir tiende a converger en un valor máximo (límite). En este ejemplo, a pesar de que cuatro de sus componentes se comportan diferente estadísticamente hablando predomina la serie SW5 con un parámetro de forma positivo.

En la Figura 4, se muestra el análisis EVA para el punto C (Lon: 271° y Lat: -1°), en el cual se visualiza que para la serie total el parámetro de forma  $\kappa$  es negativo (igual al punto 1), es decir, que tiene un límite para su valor extremo, mientras que en las series particionadas SW3, SW5 el parámetro de forma  $\kappa$  es positivo, es decir que no tiene un límite superior. En este ejemplo se muestra que tres de las series presentan un

comportamiento estadístico similar a la serie total (SW1, SW2 y SW4), mientras que las otras dos (SW3 y SW5) por su condición estadística podrían superar a la total, en la proyección de extremos.

En el panel a) de la Figura 5, se muestra el ajuste estadístico del punto A ubicado en: Lon: 268° y Lat: -2°, los valores extremos de la serie total se componen en su mayoría por los extremos de la partición WS1 (con color negro), pero existe una cantidad de eventos combinados WS1+ WS3 (color azul). Lo que contrasta en el panel b) se observa que la serie total presenta el valor más alto de periodo de retorno (3.8 m) y se comporta de una manera similar a la partición SW1, que se puede considerar como la dominante de la serie. Ambas con parámetro de forma  $\kappa$  negativo. La partición SW3 es la siguiente y de menor valor las demás particiones (SW2, SW4, SW5).

En el panel c) de la Figura 5, en cambio se muestra el ajuste estadístico del punto B ubicado en Lon: 268° y Lat: -1°, en este caso los valores extremos de la serie total se componen en su mayoría de la partición WS1, seguidos de la combinación de WS1 + WS3. Existen pocos datos trimodales (WS1+WS2+WS3). Al comparar con el panel d) se observa que los periodos de retorno de la serie total tienen un comportamiento diferente al de la partición SW1, ya que la primera presenta un parámetro de forma  $\kappa$  positivo y la segunda un parámetro de forma  $\kappa$  negativo. A pesar de que sus extremos los domina la serie SW1, su comportamiento estadístico es diferente.

En el panel e) de la Figura 5, se muestra el ajuste estadístico del punto C ubicado en Lon: 271° y Lat: -1°, en este caso al igual que en los anteriores, en los extremos domina una partición la SW1, pero a diferencia de los otros dos, la segunda es la combinación bimodal de SW1 +SW2. Al observar el panel f) se nota que al igual que el punto A el comportamiento estadístico de la serie total es similar al de la partición dominante con un parámetro de forma  $\kappa$  negativo.

El valor de proyección para 100 años de periodo de retorno es de 3.8 m de altura significativa de ola. En base al análisis de EVA se ha determinado que los eventos extremos a ser analizados por su condición física serán: 19 de junio del 2006, 04 de julio del 2014 y 02 de mayo del 2015.

### 3.2 Análisis físico de los valores extremos

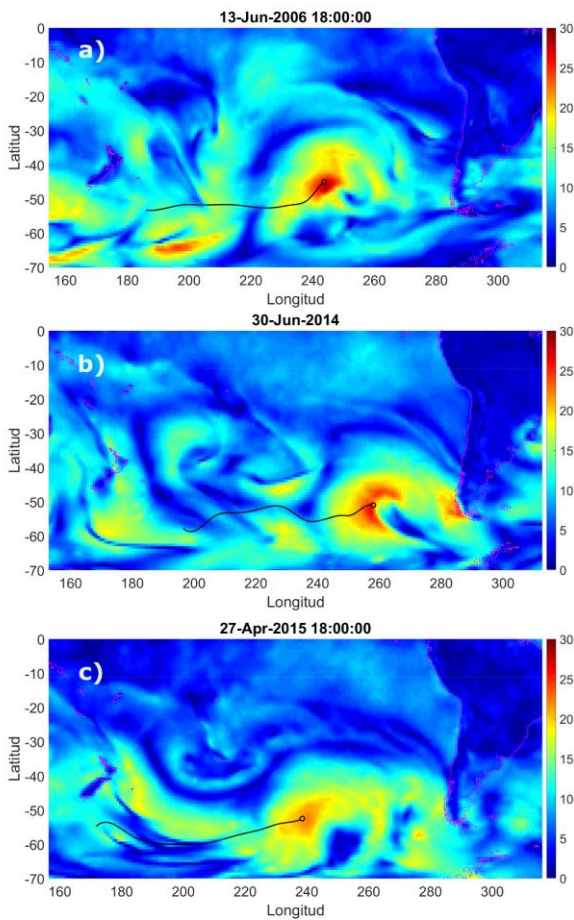


Figura 6. Tormentas y trayectorias en su punto de máxima intensidad

Para realizar el análisis físico de los valores extremos se tomará los tres máximos valores del análisis EVA, que se repiten en los tres puntos A, B, y C. Se procede a estimar las trayectorias de las tormentas al sur este del archipiélago que provocaron este oleaje, para caracterizarlos por su condición física. Para esto se utiliza datos de viento del REANALISIS ERA-INTERIM del Centro Europeo de Predicción del Tiempo a Mediano Plazo (Dee et al. 2011). Al analizar las condiciones físicas de los extremos, se determina que el oleaje de fondo que provocó los eventos extremos se produjo días antes el pacífico sur. Ahí se generaron grades tormentas, que en su trayectoria superaron la zona de la Isla de Pascua, provocando grande oleaje en las Islas Galápagos. En la Figura 6, se muestra las tormentas en el panel a) la tormenta que generó el oleaje de fondo para el evento del 18 de junio del 2006, tuvo su pico el 13 de junio del 2006 a las 18:00:00, entre una latitud de  $-25^\circ$  y  $-40^\circ$ , con una intensidad máxima de viento de 28 m/s. Lo que provocó un evento extremo en las costas del Archipiélago de Galápagos.

En cambio, en el panel b) de la Figura 6, se puede observar la tormenta que generó el oleaje de fondo del evento del 04 de julio del 2014, tuvo su pico máximo el 30 de junio del 2014, con un valor de 30 m/s, entre una latitud de  $-30^\circ$  a  $-50^\circ$ . Esta tormenta se produjo más al sur que la anterior, pero debido a su trayectoria ascendente y su gran magnitud generó grandes olas en el Archipiélago de Galápagos.

Por último, en el panel c) de la Figura 6, se muestra la tormenta que contribuyó para generar el evento extremo del 02 de mayo del 2015. Esta tormenta tuvo su pico más alto el 27 de abril, con una velocidad del viento de 27 m/s. Entre una latitud de  $-35^\circ$  y  $-60^\circ$ , esta tormenta generó oleaje de fondo.

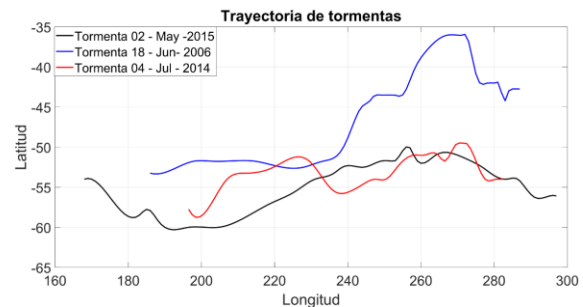


Figura 7. Trayectoria de las tormentas

En la Figura 7, se puede observar la trayectoria de las tormentas, las cuales se generan en longitudes cercanas a los  $170^\circ$  y latitudes de  $-60^\circ$ , pero tiene un comportamiento ascendente, en ciertos casos como en el de la tormenta de junio del 2006 (línea azul), llega hasta  $-37^\circ$  de latitud el centro de la tormenta.

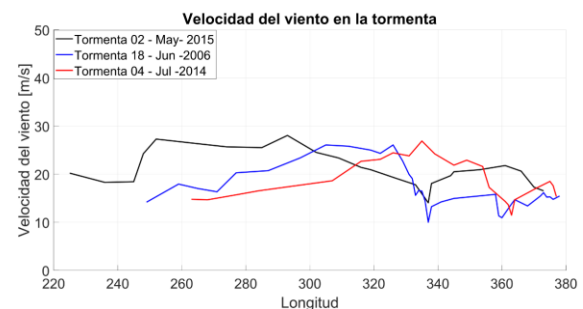


Figura 8. Trayectoria de las tormentas

En la Figura 8, en cambio se puede observar las intensidades de las tormentas, las cuales en su mayoría llegan hasta los 30 m/s de velocidad de viento, lo que se puede ver es que su intensidad no es relevante pero su trayectoria si lo es, ya que al llegar a latitudes cercanas al Ecuador generan oleaje de fondo que provoca daños en las Islas Galápagos.

### 3. CONCLUSIONES

Al realizar el análisis de valores de extremos (EVA) para el Archipiélago de Galápagos, utilizando métodos estadísticos robustos se logró determinar una altura significativa de ola de 3,8 m para un periodo de retorno de 100 años.

Se analizó físicamente tres tormentas: el 19 de junio del 2006, 04 de julio del 2014 y 02 de mayo del 2015. En las cuales se determinó que sus trayectorias ascendentes (de sur a norte) y su gran intensidad, generan el oleaje de fondo (swell) que contribuye con la producción de valores extremos en las Islas Galápagos. Además, esas tormentas se producen días antes de que el oleaje llegue a la costa del Archipiélago.

Al tener datos de largos periodos de tiempo, se puede realizar estadísticas más robustas y determinar ajustes estadísticos más confiables.

## REFERENCIAS

- Castillo, E. (2012). *Extreme value theory in engineering*. Elsevier.
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values* (Vol. 208). Springer.
- Coles, S. G., & Walshaw, D. (1994). Directional modelling of extreme wind speeds. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 43(1), 139–157. <https://doi.org/10.2307/2986118>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- El Comercio. (2015). Oleaje hunde una lancha y afecta el Malecón de San Cristóbal. Retrieved from <https://www.elcomercio.com/actualidad/oleajes-galapagos-sancristobal-danos-mar.html>
- El Universo. (2014). Fuerte oleaje motiva a aumentar la seguridad en Galápagos. Retrieved from <https://www.eluniverso.com/noticias/2014/07/04/nota/3187606/fuerte-oleaje-motiva-aumentar-seguridad-galapagos/>
- González, F. (2013). *Modelización estadística de eventos extremos de oleaje y nivel del mar*. [Tesis doctoral]. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Hamann, O. (1979). On climatic conditions, vegetation types, and leaf size in the Galápagos Islands. *Biotropica*, 11(2), 101–122. <https://doi.org/10.2307/2387785>
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Delft University of Technology and UNESCO-IHE (Vol. 20). <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.42>
- Itow, S. (2003). *Zonation pattern, succession process and invasion by aliens in species-poor insular vegetation of the Galapagos Islands*.
- Jácome, E. (2017). Identificación y Separación de Eventos Medioambientales en el Análisis de Valores Extremos para la Proyección de Periodos de Retorno, 110. [Tesis Maestría] Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/18777/1/CD-8166.pdf>
- Portilla-Yandún, J., & Jácome, E. (2020). Covariate extreme value analysis using wave spectral partitioning. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(5), 873–888. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0198.1>
- Portilla, J. (2016). *The Global Signature of Ocean Wave Spectra | Global Spectral Wave Climate (GLOSWAC)*. Retrieved September 7, 2017, from <http://improlife.xyz/>
- Portilla, J. (2018). *Open Access Atlas of Global Spectral Wave*, (8), 1–9.
- Portilla, J., Ocampo-Torres, F. J., & Monbaliu, J. (2009). Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(1), 107–122. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO609.1>
- Sachs, L. (2011). *Climate and Oceanography of the Galapagos in the 21st Century*. I. Larrea and G. Di Carlo.
- Simiu, E., & Heckert, N. A. (1996). Extreme wind distribution tails: a “peaks over threshold” approach. *Journal of Structural Engineering*, 122(5), 539–547. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:5\(539\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(539))
- Snell, H., & Rea, S. (1999). The 1997-98 El Niño in Galápagos: can 34 years of data estimate 120 years of pattern? *Noticias de Galápagos*, 60, 111–120.
- Sosa Moreno, Jeison Ebert; Portilla, J. (2014). *Wave modelling in the Ecuadorian Pacific using WAVEWATCH III and SWAN*. [Tesis ingeniería] Quito: USFQ.
- Trueman, M., & d'Ozouville, N. (2010). Characterizing the Galapagos terrestrial climate in the face of global climate change. *Galapagos Research*, 67, 26–37. Retrieved from [http://datazone.darwinfoundation.org/darwin\\_weather/pdf/trueman\\_dozouville2010\\_vol67pp26-37.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/EC3E489C-7997-4635-B74D-3A68BA180A77](http://datazone.darwinfoundation.org/darwin_weather/pdf/trueman_dozouville2010_vol67pp26-37.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/EC3E489C-7997-4635-B74D-3A68BA180A77)
- Walton, T. L. (2000). Distributions for storm surge extremes. *Ocean Engineering*, 27(12), 1279–1293. DOI: 10.1016/S0029-8018(99)00052-9

## BIOGRAFÍA



**Edwin Jácome**, Ingeniero Mecánico (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2013), maestría en Eficiencia Energética (Escuela Politécnica Nacional, 2017) y doctorado en Ciencias de la Mecánica (Escuela Politécnica Nacional, en curso). Profesional con experiencia en el área de eficiencia energética,

termodinámica, turbo maquinaria y energías alternativas. Docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la EPN, impartiendo más de 10 cátedras en pregrado. Miembro de un proyecto de investigación en la ESPOCH, y dos proyectos en desarrollo en la EPN. Autor y co-autor de varias publicaciones en las áreas de energía y análisis estadístico de fenómenos estocásticos.



