



UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS GEOGRÁFICAS

**CLIMA MARINO Y SU RELACIÓN CON LAS PLAYAS DEL CARIBE SUR
DE COSTA RICA**

Por:

Nathalia María Badilla Ramos

Responsable institucional:

Rodney Eduardo Mora Escalante

Académico:

Guillermo Calderón Ramírez

Práctica profesional supervisada como propuesta en el cumplimiento de los requisitos
para el bachillerato en

**CIENCIAS GEOGRÁFICAS CON ÉNFASIS EN ORDENAMIENTO
DEL TERRITORIO**

Heredia, Costa Rica, 2020

Agradecimientos

Antes que nada, quiero agradecer al Módulo de Información Oceanográfica (MIO) del Centro de Investigación de Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica, por darme la oportunidad de realizar mi práctica profesional supervisada en el área de la investigación que más me ha apasionado en el transcurso de mi formación. Este trabajo representa mi esfuerzo y dedicación en el cual, directa o indirectamente, participaron distintas personas enseñándome, corrigiéndome, dándome ánimo, acompañándome en mis periodos de ansiedad y en los momentos de felicidad. Esta experiencia me permitió aprovechar la competencia y destreza de muchas personas, las cuales deseo agradecer en el siguiente apartado.

En primer lugar, a mi tutor institucional, M.Sc. Rodney Eduardo Mora Escalante, mi más amplio agradecimiento por haberme brindado su confianza, su paciencia ante los momentos de incertidumbre e inestabilidad, su valiosa dirección y el apoyo para concluir mi práctica profesional supervisada. En segundo lugar, a mi profesor Dr. Gustavo Barrantes Castillo, un especial agradecimiento por brindarme siempre su apoyo, experiencia y orientación, que ha sido mi fuente de motivación durante estos últimos años. En tercer lugar, a mi profesor Lic. Omar Barrantes Sotela, un cordial agradecimiento por su disponibilidad, su sabiduría y su apoyo, principalmente durante el inicio y conclusión de mi práctica profesional supervisada.

Un especial agradecimiento a mi mamá y a mi papá por acompañarme en las circunstancias más caóticas de mi vida, aconsejándome y sobre todo impulsándome a ser mejor persona cada día. También, quiero agradecer el apoyo incondicional de mi hermana y mis hermanos, ya que sin ustedes esto no hubiese sido posible. A mis amigos y amigas, especialmente Joselyn Calvo y Diana Méndez, por siempre darme ánimo en el camino, y además inspirarme en el proceso de participación como mujer en la ciencia. Aprovecho para disculparme a quienes he olvidado mencionar, de igual manera agradezco de corazón su apoyo y cariño durante estos cuatro años. A todos y todas ustedes, mi más sincera gratitud.

Índice

| | |
|--|----|
| Índice | 3 |
| 1. Acrónimos | 4 |
| 2. Introducción | 5 |
| 3. Planteamiento del problema | 5 |
| 4. Objetivos | 6 |
| 5. Justificación de estudio | 6 |
| 6. Marco teórico | 7 |
| 7. Metodología | 10 |
| 8. Resultados y análisis | 11 |
| 9. Conclusiones | 24 |
| 10. Bibliografía | 25 |

1. Acrónimos

| C | |
|---|--------|
| CC | |
| Corriente Caribe, | 8 |
| CIMAR | |
| Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, | 12 |
| M | |
| MIO | |
| Módulo de Información Oceanográfica, | 2 |
| N | |
| NOAA | |
| National Oceanic Atmospheric Administration, | 13, 20 |
| Numpy | |
| Numerical Python, | 12 |
| S | |
| SIG | |
| Sistema de Información Geográfica, | 9 |
| Spyder | |
| Scientific Python Development Enviornment, | 12 |
| U | |
| UCR | |
| Universidad de Costa Rica, | 12 |
| W | |
| WWIII | |
| WAVEWATCH III, | 20 |
| Z | |
| ZCIT | |
| Zona de Convergencia Intertropical, | 8 |

2. Introducción

El aumento en el nivel de los océanos, la presencia de eventos océano-meteorológicos extremos y las anomalías en las corrientes marinas producto del cambio climático, son las causas que ocasionarían alteraciones significativas en los límites costeros de todo el mundo. Los cambios en los litorales modifican la composición química y biológica de los ecosistemas marinos, y por consiguiente, un impacto en la infraestructura costera, que se refleja en problemáticas de índole social y económica en las poblaciones que se encuentran aledañas a las costas (Fernández, 1991; Maul, 1993).

A partir de las variaciones climáticas percibidas en el presente siglo, se ha logrado identificar los problemas más comunes que enfrentan las zonas oceánicas y marinas - costeras de Costa Rica. La subsidencia de tierras, la erosión costera, las crecientes inundaciones por tormentas, el aumento en el nivel del mar y la disminución de los volúmenes de mantos de agua fresca, son algunas de las causas que justifican la alteración de la morfología costera del país (Lizano y Salas, 2001).

Recientemente se han reportado procesos de erosión en playas que se encuentran tanto en áreas protegidas, como en sitios turísticos de la costa Caribe de Costa Rica, hechos que se pueden relacionar al cambio climático (Quesada y Molina, 2016). En ese sentido, las actividades antropogénicas asociadas al desarrollo turístico, logran ejercer modificaciones en la línea de la costa, mediante el impacto que suponen estos atractivos sobre la economía del país. Además, la construcción de infraestructura en zonas intermareales modifican los procesos de transporte litoral arenoso que naturalmente ocurre en estas zonas (Henao y Posada, 2008).

Sobre el contexto anterior, se pretende llevar a cabo un acercamiento preliminar a la problemática de la erosión costera, con el propósito de analizar el clima marino a través de variables oceanográficas tales como viento, dirección, altura y periodo de las olas frente a las playas de la costa Caribe sur costarricense, esto con el fin de vincular los procesos de erosión costera que requieren de acción inmediata ante la influencia de la estacionalidad del clima marino. Es importante que los actores gubernamentales y sociales, se sensibilicen con los efectos de la erosión costera, a fin de que se generen recursos y estrategias políticas que permitan enfrentar esta problemática en las zonas marino-costeras del país (Lizano, 2013).

3. Planteamiento del problema

Los espacios costeros, al presentar un clima cálido y seco, compuesto por características naturales como lo son las playas, tienden a ejercer un alto interés económico

sobre los recursos naturales que estos conservan. La costa al ser considerada como la zona de interfase entre la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera, muestra sensibilidad en su dinámica ante los efectos del cambio climático (Cendrero, Sánchez y Zazo, 2005). El carácter de interfase confiere a la franja litoral una gran diversidad de ambientes, lo cual la convierte en un área atractiva para los asentamientos humanos y para gran variedad de actividades económicas (Cendrero, Sánchez y Zazo, 2005). Por tanto, las zonas costeras son particularmente vulnerables ante la estacionalidad del clima marino debido a que la mayoría de la actividad económica, infraestructura y servicios se encuentran localizados en la costa o muy cerca de ella, por lo que las economías locales se concentran en sectores como el turismo (Hoozemans, Marchand y Nicholls, 1999).

Bajo ese contexto resulta preciso llevar a cabo un abordaje de la problemática en cuestión, ya que aún existen vacíos en el análisis de la dinámica costera del Caribe sur de Costa Rica. A pesar de que se asocian los efectos del aumento del nivel del mar, con los procesos acelerados de erosión costera en el Caribe (Lizano, 2013), aún no ha sido posible determinar hacia donde se acumula o se dirige el sedimento desprendido. Por lo anterior, el material cartográfico del clima marino en estudio, junto con gráficos de eventos extremos a futuro, mostrará los posibles escenarios del Caribe sur costarricense en relación a los procesos acelerados de erosión costera, ya que a medida que se presente la estacionalidad climática del territorio nacional, las playas se verán obligadas a retroceder, o bien a ganar terreno en el mar, lo cual implica tomar decisiones sobre estos espacios, con el fin de que los habitantes que se encuentran cercanos a la costa tengan conocimiento acerca de la vulnerabilidad que presentan los ecosistemas marino-costeros y cómo estos deben ser manejados ante los efectos del cambio climático.

Dentro de la investigación se plantea un objetivo general con el cual se busca analizar e interpretar el problema en cuestión, y además, dos objetivos específicos que dictan las pautas que conllevará el estudio.

4. Objetivos

Objetivo General

- Analizar la dinámica costera del Caribe sur de Costa Rica a través de las variables oceanográficas en un periodo comprendido de 1979-2009.

Objetivos Específicos

- Elaborar material cartográfico mediante la herramienta Python para las variables de viento, dirección, altura y periodo de las olas con el fin de conocer la dinámica oceanográfica de las playas del Caribe sur costarricense.
- Determinar los periodos de retorno en oleajes severos a través de la herramienta Python para las playas del Caribe sur costarricense en un periodo treinta años.

5. Justificación de estudio

El Caribe sur costarricense al encontrarse principalmente configurado por playas arenosas, provee una variedad de recursos, beneficios y servicios que en su mayoría pueden medirse en términos económicos. Las playas al ser utilizadas como polos de atracción de capital extranjero y nacional, benefician las economías de muchas áreas costeras que se basan principalmente en la belleza natural de las playas, sin embargo, los procesos de erosión costera al no ser manejados de manera cuidadosa, unido a los efectos de la estacionalidad climática, acrecienta el desarrollo de esta problemática de manera incontrolable.

Si bien es cierto, los efectos de las variaciones estacionales del clima no pueden ser interrumpidos, sin embargo, existen estrategias que permiten mejorar la capacidad de resiliencia de las comunidades costeras y de los hábitats marinos (Castro, Chacón, Lizano y Salazar, 2018). Desde esa perspectiva, el estudio de la dinámica costera resulta ser de gran interés debido a que su presencia, además de ser un moderador climático, contribuye al transporte de sedimentos de material arenoso y basáltico, que da lugar a la formación de litorales donde no solo albergan ecosistemas marinos, sino que también concentra una importante cantidad de habitantes. En ese sentido, el conocimiento directo de los efectos de la estacionalidad climática en los ecosistemas marinos, los recursos compartidos y las comunidades costeras, permite implementar técnicas en el ordenamiento del medio litoral, a fin de atender la problemática de la erosión costera que ocasiona pérdidas tanto económicas, como ambientales en el Caribe sur de Costa Rica.

6. Marco teórico

A medida que transcurre el tiempo, los espacios costeros se ven obligados a sufrir diversas transformaciones gracias al desarrollo turístico que estos enfrentan. Tanto el conocimiento, como el saber de la incidencia del clima marino en los procesos de erosión costera del Caribe sur de Costa Rica, son indispensables para replantear la manera en cómo se deben planificar las actividades económicas que se extienden a lo largo de los espacios

costeros. Es por esta razón, que se expondrán las bases teóricas que reúnen un conjunto de teorías, conceptos y procedimientos que facilitará la comprensión de la problemática en estudio.

El clima atmosférico marino del mar Caribe es el resultado integral de los procesos de advección y difusión de masa, calor y momento en el océano, así como la transferencia de masa (evaporación y precipitación), energía (absorción y emisión de radiación) y momento (fuerza del viento) en la interfase océano-atmosférica dentro de un rango amplio de escalas de espacio y tiempo (Gallegos y Czitrom, 1997). La variabilidad océano-atmosférica está determinada por procesos regionales y locales, asociados a las migraciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), como lo son la ubicación de los centros de presión atmosférica, los vientos Alisos y la descarga de los ríos que se dirigen hacia el mar (Poveda, 2004; Poveda et al, 2005).

La interacción entre el océano y la atmósfera determina aspectos oceanográficos fundamentales tales como la circulación y la temperatura superficial del mar (Beier, Bernal y Ruíz, 2010). En ese sentido, la variabilidad a escala estacional es esencial en la interpretación de los procesos océano-atmosféricos, sin embargo, aún hace falta entender aspectos importantes, sobre todo en la respuesta de procesos interanuales del Caribe sur costarricense.

Entre los primeros estudios de circulación oceánica en el Caribe se encuentra el trabajo de Gordon para el año de 1967, en el cual estudió la dinámica superficial de esta zona aplicando el método geostrófico en varios perfiles latitudinales entre el mar Caribe y el estrecho de Yucatán (Beier, Bernal y Ruíz, 2010). En base a los estudios realizados se encontró que las corrientes son principalmente zonales con variaciones estacionales, así la Corriente del Caribe (CC) con velocidad media mayor de 25 cm s⁻¹ (Fratantoni, 2001; Richardson, 2005), es más débil en octubre que en abril, tal como lo demuestran Johns et al. (2002), quienes para describir los patrones de circulación y transporte entre el océano Atlántico y el mar Caribe implementaron datos observados comparados con un modelo numérico (Beier, Bernal y Ruíz, 2010).

Por otro lado, de acuerdo con Sheng y Tang (2003), quienes estudiaron la circulación y la variabilidad estacional del mar Caribe occidental mediante un modelo tridimensional de circulación oceánica, determinaron que durante el mes de febrero un fuerte ciclón se posiciona sobre la plataforma continental de Costa Rica y Panamá, mientras que en agosto se forman varios núcleos ciclónicos de similar tamaño, los cuales están embebidos dentro de una circulación ciclónica de mayor tamaño, pero con menor fuerza (Beier, Bernal y Ruíz, 2010).

En efecto, el mar es capaz de introducir en él, en un intervalo de solo unas décadas, modificaciones significativas (Brenes, 2005). El sector directamente sometido a las acciones marinas o lacustres en el caso de los mares, comprende el espacio barrido por las aguas marinas, denominado estéreo o zona intermareal, donde su extensión depende de la amplitud vertical de la marea (Brenes, 2005). Por otra parte, la integración entre las interfaces tierra-agua, agua-aire y aire-tierra, genera en ocasiones periodos de oleaje severo y erosión en la infraestructura costera, principalmente en zonas donde el oleaje presenta alta energía (Brenes, 2005).

La interacción tierra-agua se demuestra por el desgaste del material que conforma la costa. “Los fenómenos de abrasión se muestran claramente en la acción de sierra y pulido del agua cargada con fragmentos de roca” (Brenes, 2005, p.17). En ese sentido, la costa retrocede a medida que la erosión del agua provoca socavamiento, ya que al producirse este fenómeno de retroceso, se deja atrás una superficie relativamente plana en forma de banco denominada plataforma de abrasión (Brenes, 2005).

Entre los estudios realizados acerca de las playas críticas por erosión costera en el Caribe sur de Costa Rica se encuentra el trabajo realizado por Arozarena, Barrantes, Sandoval y Valverde para el año 2019, en donde se obtienen las tasas de erosión costera empleando el método de cálculo de superficies (m²/año) en base a la elaboración de polígonos entre dos líneas de costa levantadas en diferentes fechas del año. Para esto, fue necesario seleccionar secuencias fotográficas de imágenes aéreas y satelitales del área de estudio en cuestión con el fin de llevar a cabo el proceso de ortorectificación de las mismas (Arozarena, Barrantes, Sandoval y Valverde, 2019). Seguidamente, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se procedió a digitalizar las líneas de costa para los años 2005, 2010 y 2016 con el propósito de clasificar los cambios en la línea de la costa como avance, retroceso y estabilidad (Arozarena, Barrantes, Sandoval y Valverde, 2019).

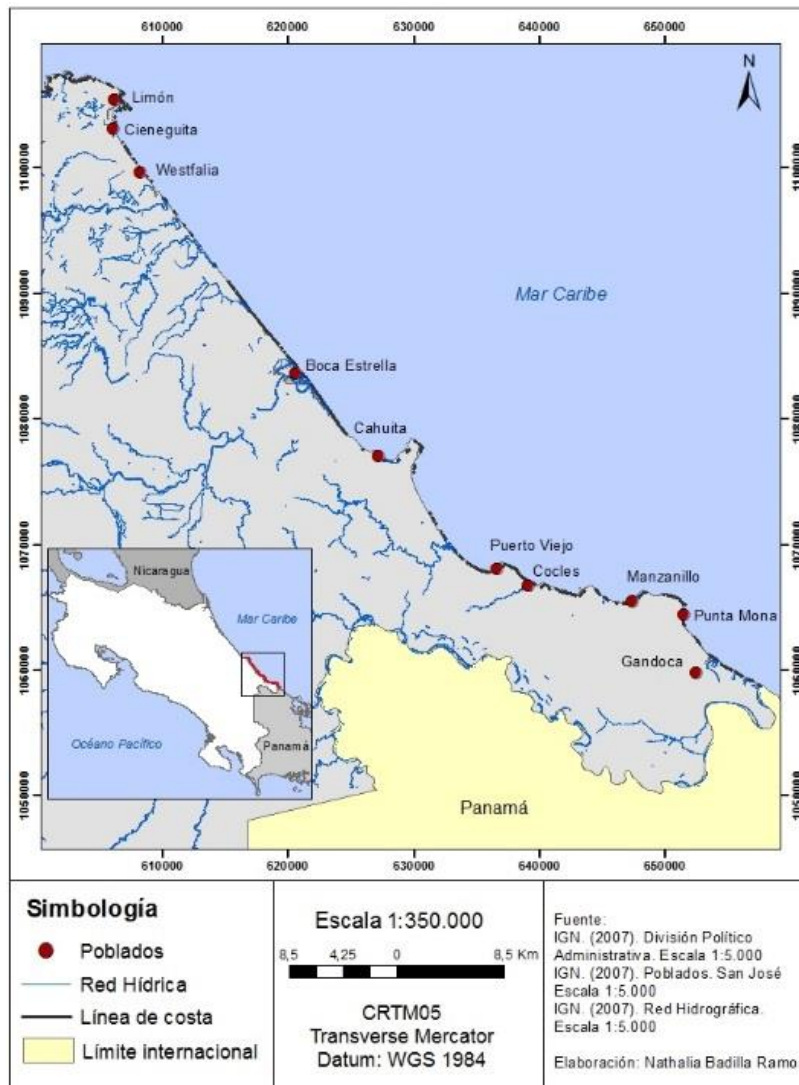
La degradación marina y costera es producto de la creciente presión ejercida sobre los recursos naturales terrestres, marinos y en el aprovechamiento de los océanos como depósito de desechos (Brenes, 2005). Los cambios inducidos por el ser humano en el flujo natural del sedimento han surgido como amenaza importante para los hábitat costeros, sobre todo por el desarrollo urbano e industrial que altera el flujo de sedimentos de las playas (Brenes, 2005). También, se han desarrollado en las áreas costeras del litoral Caribe de Costa Rica un uso diversificado de sus aguas marinas que involucran la recreación, el saneamiento básico y una creciente actividad industrial y portuaria en la zona, la cual es reconocida por ser uno de los

principales destinos turísticos del país, dados sus paisajes y belleza natural de las playas que la componen (Araya, Barboza, Ramírez y Rodríguez, 2009).

En ese sentido, como instrumentos de ordenamiento territorial, los planes reguladores deben ser reformados para incluir un análisis más detallado de las variables que competen el medio litoral, la fase marina y la complejidad de estas relaciones (Brenes, 2005).

7. Metodología

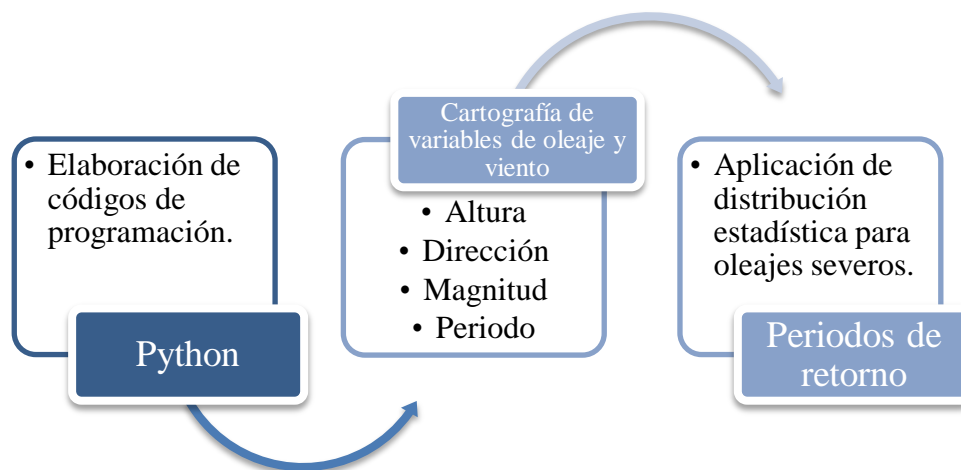
Figura 1. Área de Estudio



Costa Rica se encuentra rodeada por costas tanto en el Océano Pacífico, como en el Mar Caribe. La costa Caribe cuenta con una extensión aproximada de 220 kilómetros, casi cinco veces menor que la costa Pacífica (Vargas, 2006). El clima del Caribe se caracteriza por la ausencia de una estación seca definida, por lo tanto se registran dos periodos en donde

disminuyen las precipitaciones, primero de febrero a marzo y posteriormente de septiembre a octubre (Instituto Meteorológico Nacional, 2017). En cuanto a las mareas, la costa Caribe presenta una condición micromareal donde raramente se superaran los 30 centímetros de altura (Murillo, 2001). Por otro lado, las principales corrientes a lo largo de la costa caribeña discurren de noroeste a sureste, debido a la denominada circulación ciclónica del Giro Panamá-Colombia (Andrade, Barton y Moores, 2003).

Con respecto a las características geológicas y geomorfológicas, la costa Caribe puede dividirse en dos sectores, el norte y el sur. El sector norte cuenta con características de un margen continental pasivo y un régimen tectónico extensivo (fallas normales), mientras que el sector sur presenta un régimen tectónico comprensivo donde la actividad suele ser importante (Alvarado y Cárdenas, 2016). Desde el punto de geomorfológico, el sector norte muestra una configuración relativamente recta, en donde se evidencia la presencia de playas arenosas, barras de arena, lagunas costeras, entre otras (Arozarena, Barrantes, Sandoval y Valverde, 2019). Por otro lado, el sector sur se caracteriza por la proximidad del sistema montañoso a la costa, donde se evidencia la presencia de playas arenosas extensas, así como playas de herradura, las cuales suelen intercalarse con costas rocosas (Arozarena, Barrantes, Sandoval y Valverde, 2019).



Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo de este trabajo se emplea la herramienta de software libre Python en el análisis y visualización de datos científicos mediante un enfoque cuantitativo. La investigación desde un enfoque cuantitativo permite medir, interpretar y analizar datos de forma secuencial y objetiva, por tanto su implementación resulta ser esencial cuando se trata de analizar datos de carácter estadístico. Bajo esa premisa, los datos obtenidos a través del

Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica (UCR), permiten contextualizar la dinámica oceanográfica del Caribe sur de Costa Rica a partir de variables océano-meteorológicas como el viento en superficie y la dirección, altura y periodo del oleaje, esto mediante la elaboración de material cartográfico que permita ubicar el valor de cada variable según el punto georreferenciado en la costa sur caribeña.

La herramienta computacional Python es un lenguaje de programación de tipo general, dentro del cual alberga una serie de paquetes informáticos que pueden ser empleados para el desarrollo de variedad de proyectos científicos, por ejemplo bases de datos o aprendizaje automatizado. Para esta práctica profesional se utiliza la interfaz de Spyder (Python 3.7), ya que cuenta con opciones interactivas, diseños personalizables y secciones intercambiables que resultan ser de gran ayuda en el análisis de datos estadísticos, además es importante mencionar que Python también tiene una interfaz a través de la línea de comandos. Para el desarrollo del material cartográfico se emplean las bibliotecas numpy, matplotlib y pandas, las cuales cumplen una función específica en el código del material cartográfico.

Las bibliotecas de Python se definen como un conjunto de implementaciones funcionales (Pythones, 2020) que facilitan programar las líneas de código de forma sintetizada. En primer lugar, la biblioteca Numerical Python, conocida popularmente como Numpy, cuenta con la característica particular de que puede trabajar con matrices (array) de n dimensiones, además ofrece variedad de funciones básicas de álgebra lineal y herramientas de integración con otros lenguajes; por otro lado, la biblioteca Matplotlib permite generar gráficos, desde histogramas, hasta gráficos de líneas o mapas de calor (Recuero, 2018). Cabe destacar que la biblioteca Matplotlib cuenta con una extensión dentro de la herramienta Python, conocida como Basemap, la cual permite representar información geográfica ya sea de forma vectorial, o bien mediante rásteres (Estévez, 2018). Finalmente, la biblioteca Pandas permite realizar operaciones y manipulaciones de datos estructurados, lo cual facilita la depuración y preparación de los datos a la hora de generar análisis estadísticos (Recuero, 2018).

Por otro lado, la herramienta Python se caracteriza por desempeñar un papel importante en el análisis de variables aleatorias, especialmente en términos de probabilidad y estadística. Para poder calcular los periodos de oleaje severo, es necesario utilizar el método

de máximo anual, el cual consiste en dividir la serie temporal de la altura de las olas en unidades de año, seleccionando los valores máximos de esa variable en el tiempo a fin de obtener una serie continua de valores extremos independientes a lo largo de un periodo (Dagua, Herrera, Marriaga, Orejarena y Otero, 2013). En ese sentido, los datos generados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) WAVEWATCH III, permite analizar la climatología estacional de las olas para un periodo comprendido de treinta años. Para ello, se utilizó la fase dos, la cual se encuentra sujeta al paquete de física Arduin, el cual consiste en quince cuadrículas regulares, compuestas por un conjunto de datos homogéneos de Reanálisis y Predicción del Sistema de Pronóstico Climático.

Una vez extraídos los datos, se determinan los valores extremos de oleaje, y se procede al análisis de los periodos de retorno en oleajes severos, mediante la distribución exponencial de Gumbel, con el fin de inferir el impacto en la dinámica oceanográfica del Caribe sur costarricense en el futuro.

8. Resultados y análisis

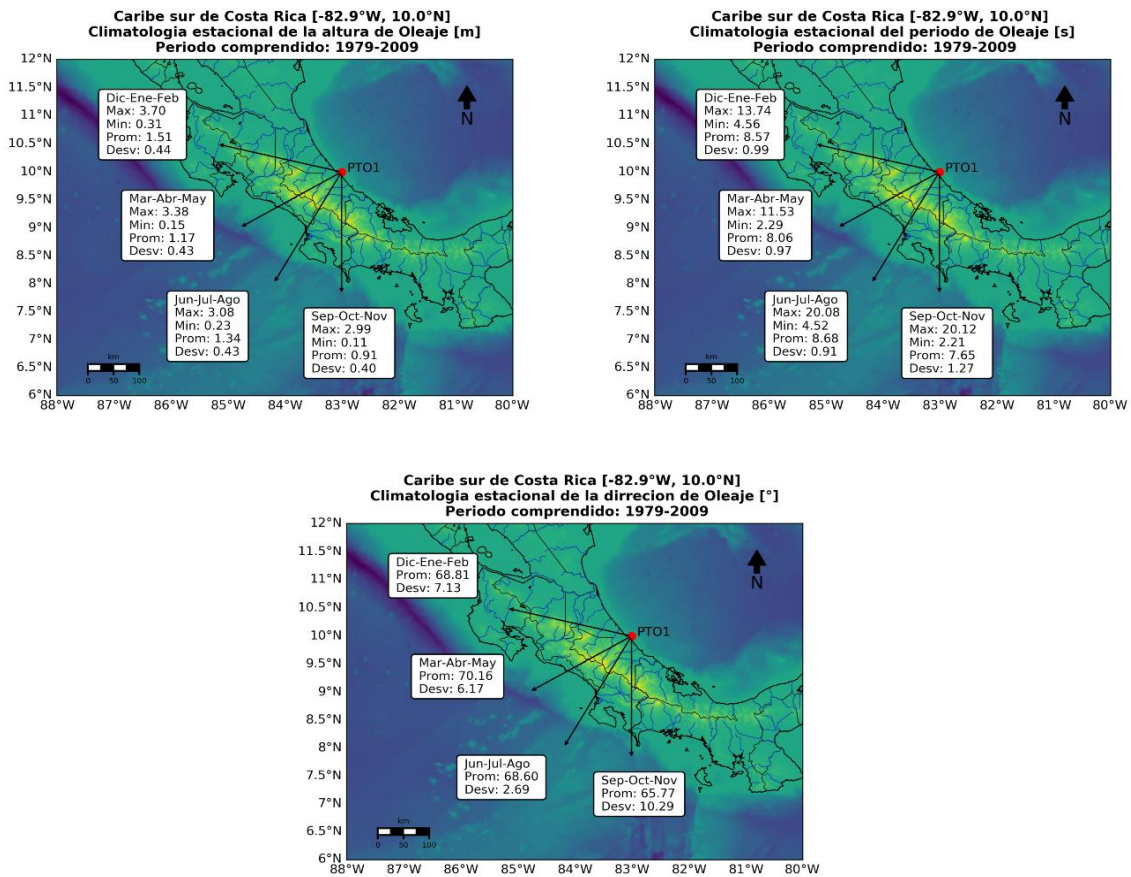
8.1 Cartografía de las variables de oleaje y viento

El oleaje obedece a parámetros atmosféricos, morfológicos e hidrodinámicos que influyen en el modelamiento de las costas y el transporte de sedimentos (Dagua et al, 2013). El oleaje que adquiere las costas Centroamericanas puede ser concebido por varios fenómenos que pueden ser locales o remotos. Algunos mecanismos remotos que se pueden mencionar son las tormentas intensas que ocurren a lo largo de un año durante intervalos cortos, así como el desplazamiento de aire frío procedente de los polos y el aire caliente que fluye desde latitudes medias, lo cual ocasiona la formación de frentes con vientos de gran intensidad cuyos centros de tormenta son influenciados por la rotación de la tierra (Lizano, 2007).

Frecuentemente, el oleaje de gran altura suele conformarse por el viento que se posiciona sobre la superficie del océano, por lo tanto, este oleaje remoto conocido como “marejada de fondo”, puede alcanzar suficiente energía y ocasionar impactos considerables en la estructura geomorfológica de las costas, especialmente si se presenta en tiempos de mareas altas o extraordinarias (Lizano, 2007). Ante la necesidad de comprender mejor la dinámica oceanográfica y los procesos costeros del Caribe sur de Costa Rica, se llevará a

continuación un análisis de las variables de oleaje y viento que inciden en la climatología estacional de esta zona.

Figura 2. Variables de Oleaje para la Estación 01



Fuente: Elaboración propia

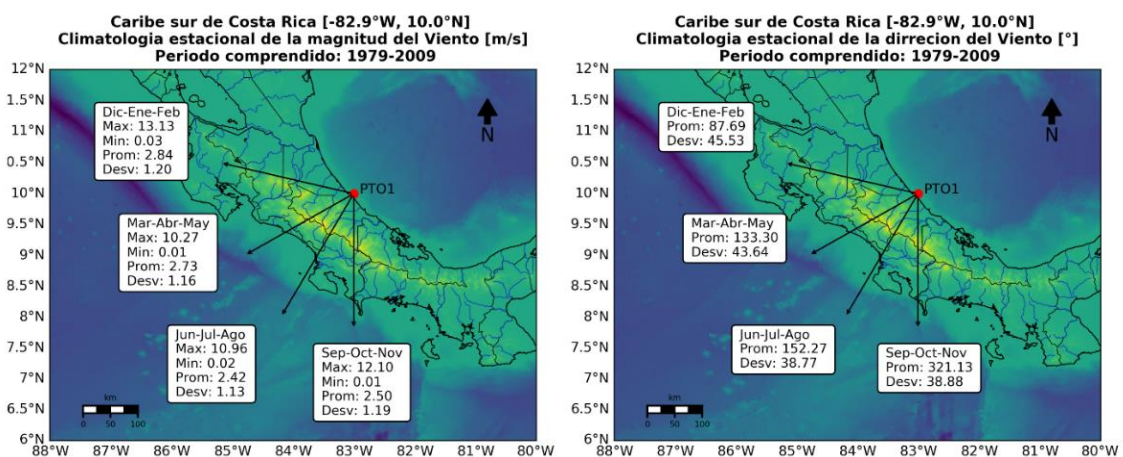
De acuerdo con los datos proporcionados por el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica, se muestran las variables de oleaje y viento que inciden en la estacionalidad climática del Caribe sur de Costa Rica para un periodo comprendido de treinta años. En la figura 2 se observa el comportamiento estacional de las variables que inciden en el oleaje de la estación 01 ubicada en la coordenada -82.9° W, 10.0° N, en donde sobresale para los meses de diciembre, enero y febrero, una altura máxima de ola de 4 metros y un promedio de 1.5 metros. Estos resultados se deben a que en la costa Caribe de Costa Rica, predomina durante todo el año un oleaje con componente noreste, por ende, durante los últimos y primeros meses del año el oleaje

conserva la mayor parte de energía debido a la intensificación de los vientos alisios durante esta época (Lizano, 2007).

Con respecto a la altura mínima de ola, se obtiene un valor de 1.5 metros para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto como consecuencia de la disminución de los vientos alisios durante esta época en la región (Lizano, 2007). Por otro lado, los datos registrados para el periodo del oleaje en la estación 01, muestran un alcance máximo de 20 segundos y un promedio de 9 segundos entre los meses de junio, julio y agosto. Estos resultados se deben al aumento significativo del viento alisio en la región caribeña, especialmente para el mes de julio en donde se percibe la incidencia del “veranillo de San Juan” (Lizano, 2007).

Con respecto al periodo mínimo de ola, se obtiene un valor de 2 segundos para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto relacionado con lo anteriormente mencionado acerca de la disminución de los vientos alisios durante estos meses en la región caribeña. Por otra parte, la dirección del oleaje alcanza un promedio máximo de 70.19° para los meses de marzo, abril y mayo, debido a la influencia del componente noreste que refuerza el carácter local del mismo (Lizano, 2007).

Figura 3. Variables de Viento para la Estación 01



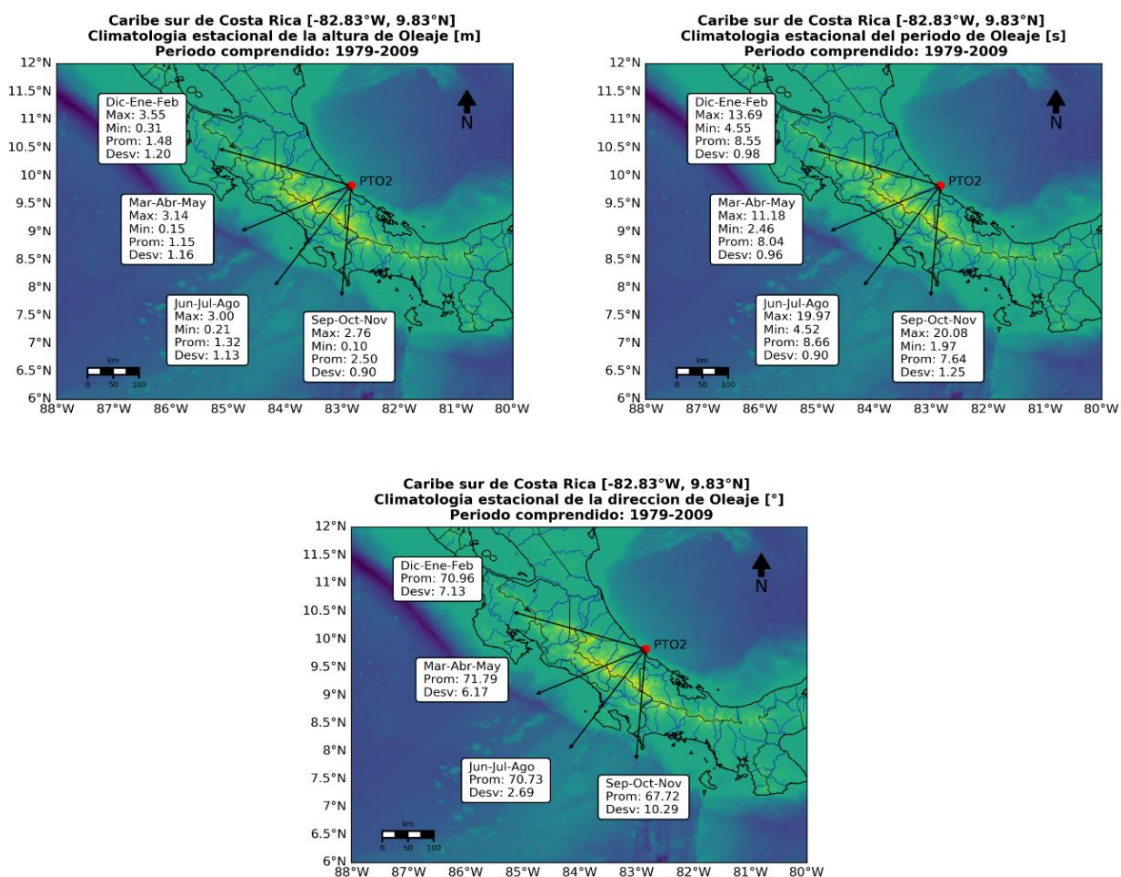
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se observa el comportamiento estacional del viento en la estación 01 ubicada en la coordenada -82.9° W, 10.0° N, en donde sobresale para los meses de diciembre, enero y febrero, una magnitud máxima de 13 m/s y un promedio de 3 m/s. Estos resultados se

encuentran estrechamente relacionados con la incidencia de los vientos alisios en los últimos y primeros meses del año (Lizano, 2007). Con respecto a la magnitud mínima del viento, se obtiene un valor de 0.1 m/s tanto para los meses de marzo, abril y mayo, como para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto como consecuencia de la mínima presencia del viento alisio en la región (Lizano, 2007).

Por otro lado, la dirección del viento alcanza un promedio máximo de 321.13° para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto debido a la influencia del componente noroeste durante la disminución del viento alisio en la región caribeña (Lizano, 2007).

Figura 4. Variables de Oleaje para la Estación 02



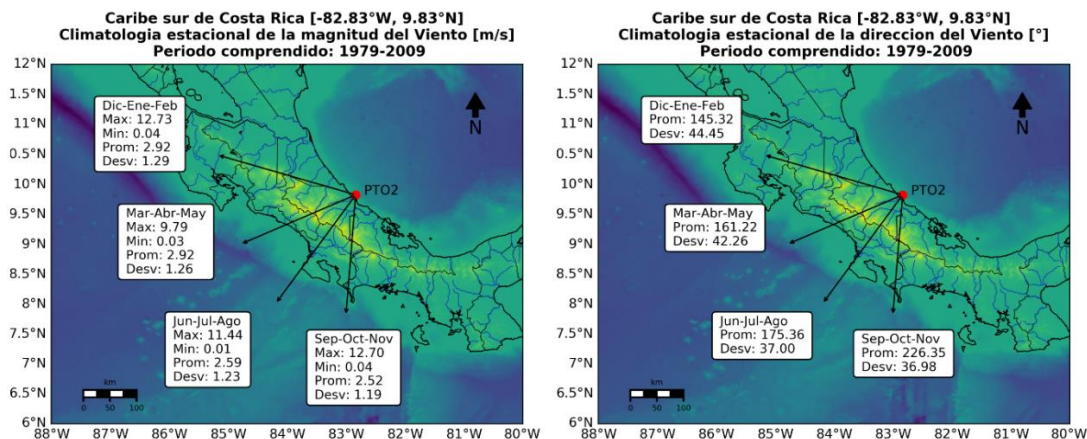
Fuente: Elaboración propia

En la figura 4 se observa el comportamiento estacional de las variables que inciden en el oleaje de la estación 02 ubicada en la coordenada -82.83° W, 9.83° N, en donde sobresale para los meses de septiembre, octubre y noviembre, una altura máxima de ola de 3 metros y un promedio de 2.50 metros. Estos resultados se deben a que durante estos meses,

específicamente en septiembre, las condiciones marítimas y atmosféricas son más propicias para la formación de ciclones tropicales en el Caribe costarricense (Fernández y Lizano, 1996). Con respecto a la altura mínima de ola, se obtiene un valor de 0.2 metros para los meses de junio, julio y agosto, esto como efecto de la presencia del “veranillo de San Juan”, el cual propicia la disminución de lluvias y el aumento la intensidad de los vientos alisios en el área de estudio (Fernández y Lizano, 1996).

Por otro lado, los datos registrados para el periodo del oleaje de la estación 02, muestran un alcance máximo de 20 segundos y un promedio de 9 segundos entre los meses de junio, julio y agosto. Estos resultados presentan un comportamiento estacional similar al de la estación 01, por lo tanto sus valores reflejan el aumento significativo del viento alisio en la región caribeña y la incidencia del “veranillo de San Juan” (Lizano, 2007). Con respecto al periodo mínimo de ola, se obtiene un valor de 2 segundos para los meses de marzo, abril y mayo, como consecuencia de la disminución de los vientos alisios durante esta época (Lizano, 2007). Por otra parte, la dirección del oleaje alcanza un promedio máximo de 70.96° para los meses de diciembre, enero y febrero, como resultado de la influencia de las aguas profundas del componente noreste (Lizano, 2007).

Figura 5. Variables de Viento para la Estación 02



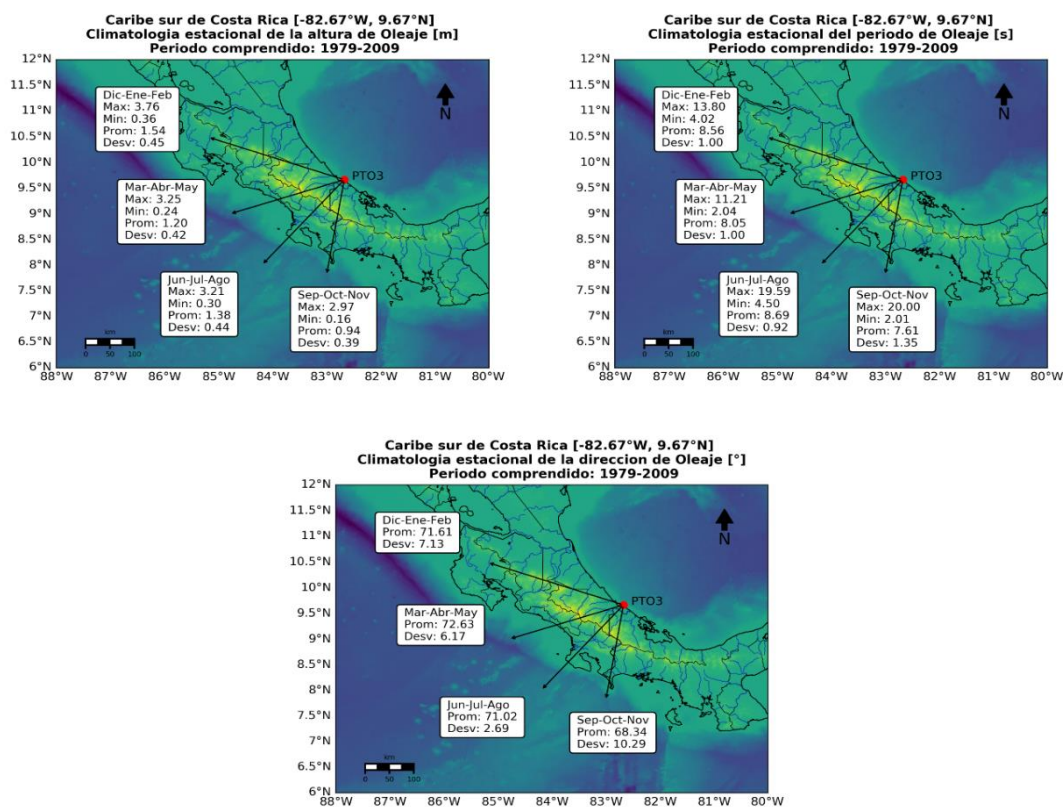
Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se observa el comportamiento estacional del viento en la estación 02 ubicada en la coordenada -82.83° W, 9.83° N, en donde sobresale para los meses de diciembre, enero y febrero, una magnitud máxima de 13 m/s y un promedio de 3 m/s. Estos resultados comprenden según la escala Beaufort, una brisa débil que acrecienta la presencia

de olas pequeñas que no alcanzan a romper, además de que se percibe la incidencia del viento alisio en los últimos y primeros meses del año (Lizano, 2007). Con respecto a la magnitud mínima del viento, se obtiene un valor de 0.04 m/s para los meses de septiembre, octubre y noviembre, como consecuencia de la ausencia del viento alisio en la región (Lizano, 2007).

Por otro lado, la dirección del viento alcanza un promedio máximo de 226.35° para los meses de septiembre, octubre y noviembre, en función de los efectos de los sistemas sinópticos que afectan a la región principalmente durante el mes de noviembre, lo cual influye a la formación de frentes fríos con componente suroeste (Fernández y Lizano, 1996).

Figura 6. Variables de Oleaje para la Estación 03



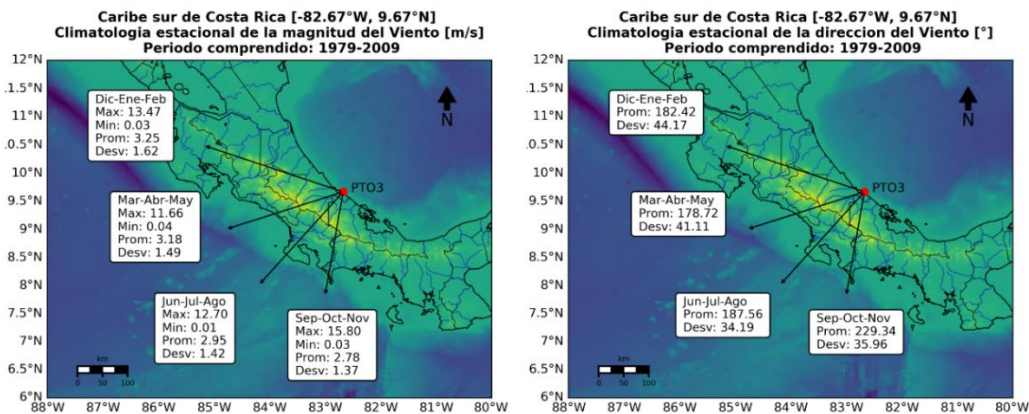
Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se observa el comportamiento estacional de las variables que inciden en el oleaje de la estación 03 ubicada en la coordenada -82.67° W, 9.67° N, en donde sobresale para los meses de diciembre, enero y febrero, una altura máxima de ola de 4 metros y un promedio de 1.5 metros. Estos resultados reflejan un comportamiento estacional similar al presentado en la estación 01, ya que como anteriormente fue mencionado, durante los últimos

y primeros meses del año, el oleaje intensifica su energía debido a la presencia de los vientos alisios durante esta época (Lizano, 2007). Con respecto a la altura mínima de ola, se obtiene un valor de 0.2 metros para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto como efecto de la ausencia de vientos alisios durante esta época en la región (Lizano, 2007).

Por otro lado, los datos registrados para el periodo del oleaje de la estación 03, muestran un alcance máximo de 20 segundos y un promedio de 9 segundos entre los meses de junio, julio y agosto. Estos resultados presentan un comportamiento estacional similar al de la estación 01 y la estación 02, por lo tanto sus valores expresan un aumento significativo de los vientos alisios como consecuencia de la incidencia del “veranillo de San Juan” (Lizano, 2007). Con respecto al periodo mínimo de ola, se obtiene un valor de 2 segundos para los meses de septiembre, octubre y noviembre, como efecto de la disminución de los vientos alisios durante esta época (Lizano, 2007). Por otra parte, la dirección del oleaje alcanza un promedio máximo de 72.63° para los meses de marzo, abril y mayo. Estos resultados presentan un comportamiento estacional similar al de la estación 01, ya que en ambas estaciones el componente noreste refuerza el carácter local del periodo del oleaje (Lizano, 2007).

Figura 7. Variables de Viento para la Estación 03



Fuente: Elaboración propia

En la figura 7 se observa el comportamiento estacional del viento en la estación 03 ubicada en la coordenada -82.67° W, 9.67° N, en donde sobresale para los meses de marzo, abril y mayo, una magnitud máxima de 12 m/s y un promedio de 3 m/s, esto como consecuencia de la mínima incidencia del viento alisio en la región durante esta época

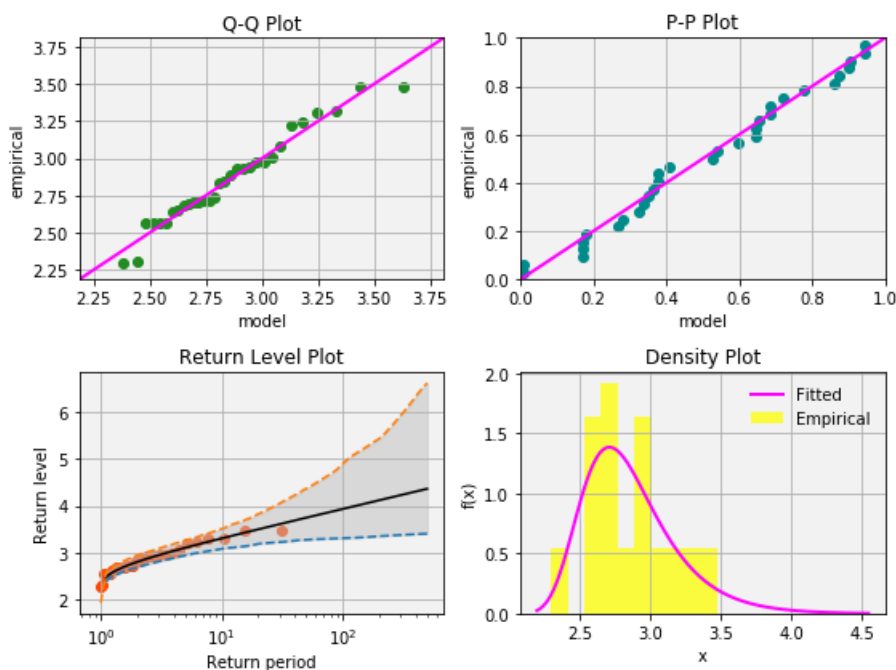
(Lizano, 2007). Con respecto a la magnitud mínima del viento, se obtiene un valor de 0.1 m/s para los meses de junio, julio y agosto. Estos resultados comprenden según la escala Beaufort, vientos en calma que propician un aspecto despejado en el mar.

Por otro lado, la dirección del viento alcanza un promedio máximo de 229.34° para los meses de septiembre, octubre y noviembre, esto como resultado de la presencia de los oestes ecuatoriales que se encuentran bien establecidos en Costa Rica durante estos meses (Lizano, 2007).

8.2 Periodos de retorno en oleajes severos

A partir de los datos extraídos por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), disponibles en WAVEWATCH III (WWIII), se obtiene una serie sintetizada de altura de olas (H_s), en donde se determinaron los valores extremos de las playas del Caribe sur de Costa Rica, en un periodo comprendido entre 01/01/1979 y 31/12/2009. Es importante mencionar que el modelo numérico WWIII es un modelo de oleaje de tercera generación, que se caracteriza por generar parámetros explícitos del crecimiento y decaimiento del oleaje (Dagua et al, 2013). De esta manera, la aplicación de la distribución exponencial de Gumbel, permitirá analizar los valores extremos observados y predecir los valores extremos en el futuro.

Figura 8. Distribución Gumbel para la Estación 01

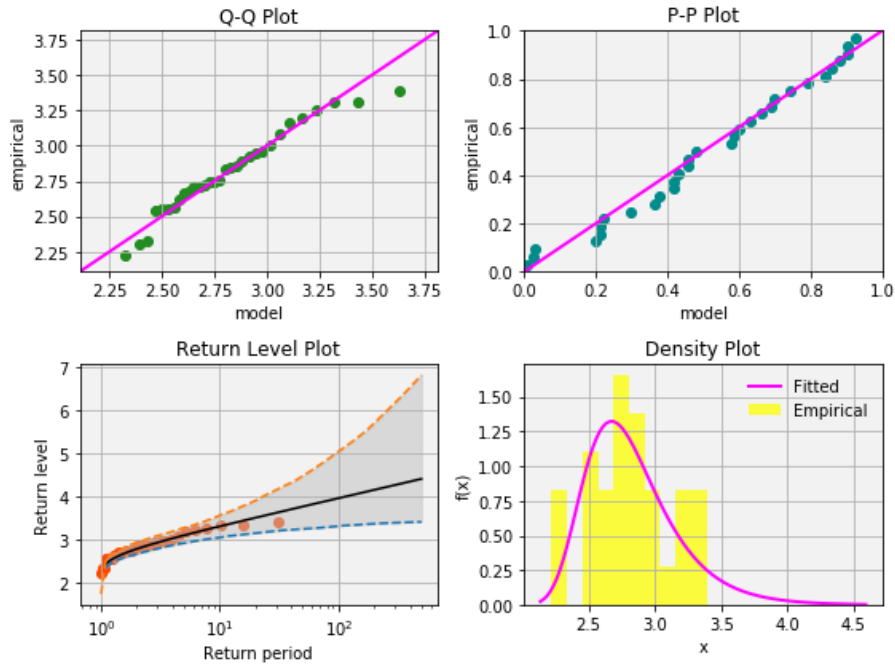


Fuente: Elaboración propia

Para el régimen extremal de la altura de las olas en el Caribe sur de Costa Rica, se presentan los resultados del papel probabilístico de la distribución exponencial Gumbel en un periodo comprendido de treinta años. En primer lugar, la figura 8 muestra el gráfico de cuantiles (Q-Q Plot) para la estación 01 ubicada en la coordenada -82.9° W, 10.0° N, el cual evidencia que para el cuantil 1 (Q1) existe un 25% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.66 metros. Con respecto al cuantil 2 (Q2), se evidencia el punto medio del conjunto de datos, el cual representa una altura de ola de 2.83 metros, por ende la mitad de las observaciones se encuentran por encima del valor y la otra mitad por debajo del valor. En lo que respecta al cuantil 3 (Q3), existe un 75% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.99 metros. También, fue posible identificar datos atípicos, ya que se encuentran muy distantes respecto a otros datos. En este caso, la altura de ola que se encuentre mayor o igual a 3.48 metros, representará esta característica.

Con respecto al gráfico de probabilidad (P-P Plot), se obtiene que la distribución de Gumbel representa de manera adecuada los datos registrados *in situ* de la estación 01, por lo tanto es posible afirmar que los extremos anuales son confiables para el uso de la determinada distribución. En cuanto al periodo de retorno (Return Level Plot), el gráfico indica que la altura significativa en la estación 01 registrará aproximadamente 3.5 metros, para un periodo de retorno de treinta años. Finalmente, el gráfico de densidad (Density Plot) permite visualizar la cantidad de datos observados en un periodo de tiempo continuo. En ese sentido, es posible observar que la distribución normal es simétrica, por lo tanto su ajuste es adecuado.

Figura 9. Distribución Gumbel para la Estación 02

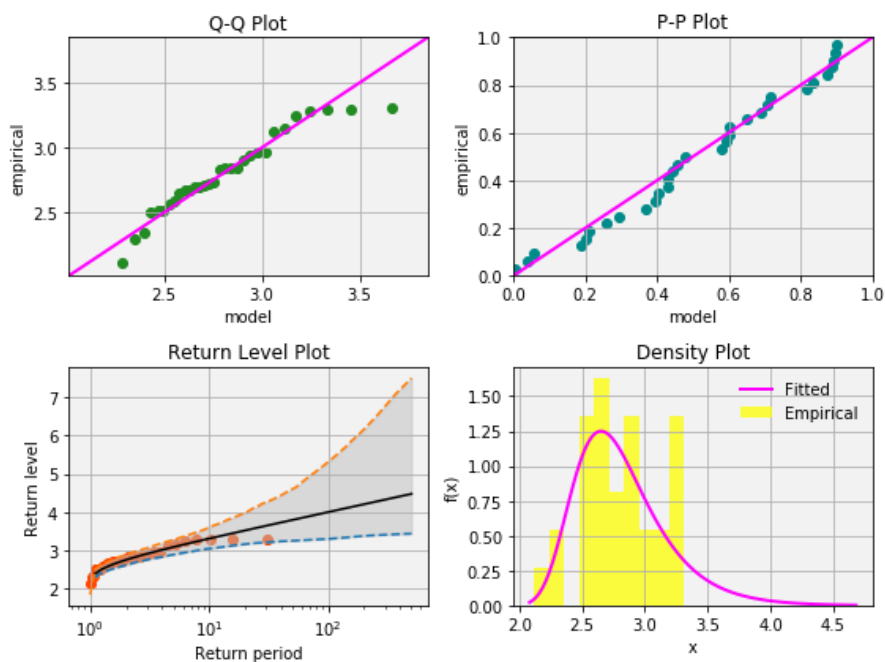


Fuente: Elaboración propia

En la figura 9 es posible observar primeramente el gráfico de cuantiles (Q-Q Plot) para la estación 02 ubicada en la coordenada -82.83° W, 9.83° N, el cual evidencia que para el cuantil 1 (Q1) existe un 25% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.64 metros. Con respecto al cuantil 2 (Q2), se evidencia el punto medio del conjunto de datos, el cual representa una altura de ola de 2.76 metros, por ende la mitad de las observaciones se encuentran por encima del valor y la otra mitad por debajo de este valor. En lo que respecta al cuantil 3 (Q3), existe un 75% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.98 metros. También, fue posible identificar datos atípicos, ya que se encuentran muy distantes respecto a otros datos. En este caso, la altura de ola que se encuentre mayor o igual a 3.39 metros, representará esta característica.

Con respecto al gráfico de probabilidad (P-P Plot), se obtiene que la distribución de Gumbel representa de manera adecuada los datos registrados *in situ* de la estación 02, por lo tanto es posible afirmar que los extremos anuales son confiables para el uso de la determinada distribución. En cuanto al periodo de retorno (Return Level Plot), el gráfico indica que la altura significativa en la estación 02 registrará aproximadamente 3.3 metros, para un periodo de retorno de treinta años. Finalmente, el gráfico de densidad (Density Plot) presenta un ligero desajuste en cuanto a los extremos anuales de la estación 02, principalmente los datos que alcanzan alturas entre los 2.5 metros y los 3.0 metros.

Figura 10. Distribución Gumbel para la Estación 03



Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la figura 10, se observa primeramente el gráfico de cuantiles (Q-Q Plot) para la estación 03 ubicada en la coordenada -82.67° W, 9.67° N, el cual evidencia que para el cuantil 1 (Q1) existe un 25% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.62 metros. Con respecto al cuantil 2 (Q2), se evidencia el punto medio del conjunto de datos, el cual representa una altura de ola de 2.74 metros, por ende la mitad de las observaciones se encuentran por encima del valor y la otra mitad por debajo de este valor. En lo que respecta al cuantil 3 (Q3), existe un 75% de los datos que se encuentran menor o igual a una altura de ola de 2.96 metros. También, fue posible identificar datos atípicos, ya que se encuentran muy distantes respecto a otros datos. En este caso, la altura de ola que se encuentre mayor o igual a 3.31 metros, representará esta característica.

Con respecto al gráfico de probabilidad (P-P Plot), se obtiene que la distribución de Gumbel representa de manera adecuada los datos registrados *in situ* de la estación 03, por lo tanto es posible afirmar que los extremos anuales son confiables para el uso de la determinada distribución. En cuanto al periodo de retorno (Return Level Plot), el gráfico indica que la altura significativa en la estación 03 registrará aproximadamente 3.1 metros, para un periodo de retorno de treinta años. Finalmente, el gráfico de densidad (Density Plot)

presenta un comportamiento similar al de la estación 01, por lo tanto es posible observar una distribución normal simétrica y un ajuste es adecuado.

9. Conclusiones

A partir del análisis de la climatología marina del Caribe sur de Costa Rica, es posible concluir que durante los meses de la estación seca, el viento acelera su magnitud provocando un oleaje de gran energía en esta zona, sin embargo, durante la estación lluviosa, el oleaje presenta una disminución en su energía debido a la ausencia de los vientos alisios en la región. Por otro lado, es importante mencionar que el periodo del oleaje suele ser invariable, por lo tanto su comportamiento estacional alcanza valores similares a lo largo de todo el año para las tres estaciones. Con respecto a la dirección del oleaje, los resultados indican que el componente noreste predomina en las tres estaciones, por lo tanto esto refuerza el carácter local del mismo.

Por otra parte, los resultados obtenidos del viento muestran un comportamiento estacional muy variable en todo el Caribe sur de Costa Rica, sin embargo, es importante señalar que los valores máximos tienden a presentarse durante los últimos y primeros meses del año, como consecuencia de la intensificación de los vientos alisios en la región. Este comportamiento estacional también se logra presenciar durante el mes de julio debido al aumento significativo del viento alisio que coincide con el “veranillo de San Juan”. Con respecto a la dirección del viento, los resultados indican que para los meses de septiembre, octubre y noviembre, los promedios alcanzan los valores máximos en las tres estaciones, esto como consecuencia del aumento de la presencia de las brisas marinas y los oestes ecuatoriales que alcanzan su máxima expresión en el país.

En cuanto al comportamiento observado en el análisis de los extremos anuales, se concluye que existe una estrecha relación de la altura del oleaje, con las estaciones del Caribe sur costarricense (estación seca poco definida y estación lluviosa), ya que las olas de la época seca conducen a la formación de frentes de playa, mientras que las olas de época lluviosa arrastran el material arenoso hacia aguas más profundas. En ese sentido, para los periodos de retorno en oleaje severo, comprendido en treinta años, se obtiene una altura media de 3.3 metros en las tres estaciones. Bajo estas condiciones de oleaje medio y extremal en el Caribe sur de Costa Rica, es importante reconocer la utilidad de estos resultados, ya que permiten analizar las variaciones geomorfológicas de las playas, aunado al transporte de material arenoso, lo que conlleva a tomar decisiones en materia de ordenamiento del medio litoral, con el fin de reducir la problemática de la erosión costera en el Caribe sur costarricense.

10. Bibliografía

- Alvarado, G. & Cárdenas, G. (2016). Chapter 3 Geology, Tectonics, and Geomorphology of Costa Rica: A Natural History Approach. En M. Kappelle, *Costa Rican Ecosystems* (p. 744). London: University of Chicago Press.
- Andrade, C. A., Barton, E. D. & Mooers, C. N. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C6).
- Araya, A., Barboza, R., Ramírez, W. & Rodríguez, A. (2009). Informe Técnico Inspección Tramo Final del Emisario Submarino de Limón. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
- Beier, E., Bernal, G., & Ruíz, M. (2010). Variabilidad estacional e interanual océano-atmósfera en la Cuenca Colombia. Cuadernos del Caribe, Vol. 14, pp. 49-72.
- Brenes, L. (2005). Dinámica costera y ordenamiento territorial. *Revista de Ciencias Ambientales*, Vol. 30(1), pp. 16-20.
- Buzai, G., Cacace, G., Humacata, L., & Lanzelotti, S. (2015). Geografía Cuantitativa, paradigmas y simplicidad. En *Teoría y métodos de la Geografía cuantitativa* (23-37). Buenos Aires, Argentina: MCA libros.
- Castro, M., Chacón, D., Lizano, O., & Salazar, R. (2018). Estudio de caso: adaptación de las comunidades costeras vulnerables ante las amenazas inminentes del cambio climático en el área de Paquera, Puntarenas. Fundación MarViva. San José, Costa Rica. 67 pp.
- Cendrero, A., Sánchez, A., & Zazo, C. (2005). Impactos sobre las zonas costeras. En *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático* (465 - 524). España: Centro de publicaciones: Ministerio de Medio Ambiente.
- Dagua, C., Herrera, E., Marriaga, L., Orejarena, A., & Otero, L. (2013). Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el norte del Golfo de Urabá. Centro de investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). *Bol. Cient. CIOH* (31), pp. 109-124.
- Estévez, R. (2018). Creando mapas con Python, Matplotlib y Basemap. De Geomapik Sitio web: <http://www.geomapik.com/desarrollo-programacion-gis/como-generar-mapas-python-matplotlib-basemap/>

- Fernández, W. (1991). Cambios Climáticos: El Calentamiento Global. Tecnología en Marcha. 11: 11-12.
- Fernández, W., & Lizano, O. (1996). Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que se atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el periodo de 1886-1998. Tópicos meteorológicos y oceanográficos, Vol. 3, pp. 3-10.
- Fratantoni, D. (2001). North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite tracked drifters. J. Geophys. Res., 106(C10): 22,067-22,093.
- Gallegos, A. & S, Czitrom. (1997). Aspectos de la oceanografía física regional del mar Caribe. En: M. Lavín (ed.). Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana. p. 225-242.
- Henao, W & Posada, B. (2008). Diagnóstico de la erosión costera del Caribe Colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés Sitio web:http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/604620080501_BErosionCaribeContinentalColombia.pdf
- Hoozemans, F., Marchand, M., & Nicholls, R. (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. Global Environmental Change 9, Supplem: p.S69-S87 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378099000199>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). Clima de Costa Rica: el clima y las regiones climáticas de Costa Rica. De Instituto Meteorológico Nacional. Sitio web: <https://www.imn.ac.cr>
- Johns, W., T. Townsend, D. Fratantoni y W. Wilson. (2002). On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea. Deep-Sea Res. Pt. I, 49: 211-243
- Lizano, O. (2007). Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica. Ciencia y Tecnología, Vol. 25(1-2), pp. 43-56.
- Lizano, O. & Salas, D. (2001). Variaciones geomorfológicas en los últimos 50 años de la Isla de Damas, Quepos, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 49, 171-177.
- Lizano, O. (2013). Erosión en las costas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco. *INTERSEDES*, 14 (27), 6-27.

- Maul, G. (1993). *Climatic Change in the Intra Americans Sea*. Edward Arnold. Nueva York. 389 p.
- Murrillo, L. M. (2001). Las mareas en Costa Rica. *Inter Sedes*, 2 (2-3), 93-108.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28(107): 201-222.
- Poveda, G., O. Mesa, L. Salazar, P. Arias, H. Moreno, S. Vieira, P. Agudelo, V. Toro y F. Álvarez. (2005). The diurnal cycle of precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Mon. Weather Rev.*, 133: 228-240.
- Pythones. (2020). Módulos y Librerías en Python: Importar, acceder, crear. De Pythones.net
Sitio web: <https://pythones.net/importar-modulos-en-python/>
- Quesada, S. & Molina, L. (20 de Enero de 2016). Calentamiento global dispara erosión en playas de Limón. *Semanario Universidad*.
- Recuero, P. (2018). Python para todos (3): ScyPy, NumPy, Pandas... ¿Qué librerías necesitamos? De Telefónica S.A. Sitio web: <https://empresas.blogthinkbig.com/python-todos-3-librerias/>
- Richardson, P. (2005). Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep-Sea Res. Pt. II*, 52: 429-463.
- Sheng, J. y L. Tang. (2003). A numerical study of circulation in the Western Caribbean Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, 33: 2049-2069.
- Vargas, G. (2006). *Geografía de Costa Rica*. San José: EUNED.