

Modelamiento de la sobre-elevación puntual del nivel del mar para “Isla de Aves” y sus consecuencias como amenaza potencial de un área marino costera

Rafael Bécemberg¹

rbecembe@ucab.edu.ve

¹ Profesor Asociado a tiempo convencional en la Escuela de Ing. Industrial, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela
Historia del Artículo

Recibido: 23 de Octubre de 2018

Aceptado: 21 de Enero de 2019

Disponible online: 22 de Febrero de 2019

Resumen: Es innegable que la República Bolivariana de Venezuela está expuesta a riesgos relevantes, presentando una alta vulnerabilidad asociada a la gran concentración de población asentada en zonas sin planificación urbana y expuesta a un conjunto de amenazas tanto naturales como antrópicas entre las cuales están las del tipo oceanográficas y climáticas cuyo estudio está poco desarrollado en el país, teniéndose que entre las “amenazas” más relevantes está el aumento del nivel del mar en una determinada área.

En este trabajo se estudió la variación puntual del nivel medio del mar debido al paso por un determinado sector de fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes (“Marea de Tormenta”). El sector estudiado es el que incluye a la Isla de Aves, debido a su valor geopolítico que incrementa la extensión de las áreas marinas y submarinas explotables por parte de Venezuela en unos 75.000 km² a la luz del moderno Derecho del Mar.

Con la data recolectada, procesada y analizada se realizaron simulaciones numéricas que permitieron visualizar la condición general de la isla cuando ésta es afectada por algún fenómeno meteorológico, determinándose cuales partes de la isla quedan sumergidas y cuales permanecen sobre el nivel que alcanza la superficie del mar en los momentos de afectación, obteniéndose que el relieve de la isla queda totalmente sumergido cuando es afectado por huracanes de grado 3 o superior cuya acción está asociada a sobre-elevaciones del nivel medio del mar superiores a los 3 m, hecho que tiene una probabilidad de ocurrencia asociada del orden de 0,5%, y que a su vez permite afirmar que la estabilidad estructural actual de la morfología de la isla no corre ningún tipo de peligro, dado que la misma tiene una buena capacidad de autorecuperación luego de que ha sido afectada por los fenómenos estudiados.

Palabras Clave: Marea de tormenta, amenaza, huracanes.

Modeling of the Abnormal Rise in the Mean Seawater for "Isla de Aves" and its Consequences as a Potential Threat to a Coastal Marine.

Abstract: It is undeniable that the Bolivarian Republic of Venezuela is exposed to significant risks presenting a high vulnerability associated with the large concentration of population settled in areas without urban planning and exposed to a set of threats, both natural and anthropic, among which are the oceanographic and climatic type whose study is little developed in the country, being the sea level rise in certain area, one of the most

relevant “threats”.

In this work was studied the sea level temporal variation due to the passage, through a certain sector, of meteorological phenomena such as tropical storms and hurricanes (“Storm Surge”). The sector studied includes the “Isla de Aves”, due to its geopolitical value that increases the extension of the marine and submarine areas exploitable by Venezuela in about 75,000 km² accordance with the modern Law of the Sea.

With the data collected, processed and analyzed, numerical simulations were carried out to visualize the general condition of the island when it is affected by some meteorological phenomenon, determining which parts of the island are submerged and which remains above the level reached by the sea surface in the moments of affectation, obtaining as a result that the relief of the island was totally submerged when it was affected by hurricanes of degree 3 or superior whose action is entailed with over-elevations of the mean sea level over 3 m, fact that has associated a probability of occurrence of the order of 0.5%, and which in turn allows us to affirm that the current structural stability of the morphology of the island does not run any type of danger, given that it has a good capacity of self-retrieval after it has been affected by the phenomena studied.

Keywords: Storm Surge, threat, hurricanes.

I. INTRODUCCIÓN

Al hablarse de amenazas, su posible incidencia sobre un área particular, y las diferentes actividades que se pueden realizar para minimizar los impactos de dichas amenazas, indefectiblemente se debe hacer referencia a conceptos como: riesgo, peligro y vulnerabilidad.

Antes de enumerar las distintas amenazas naturales que han sido identificadas y que pueden afectar las áreas marinas en general y las costas venezolanas en particular, en la Figura 1 se presenta un esquema de las áreas marinas asociadas con nuestro país, y que permite entender la importancia, no sólo de estudiar las áreas costeras del litoral norte de Venezuela, sino valorar la importancia de mantener a toda costa la integridad de la Isla de Aves debido a su valor geopolítico y a como incrementa la extensión de las áreas marinas y submarinas explotables por parte de Venezuela en unos 75.000 km² a la luz del moderno Derecho del Mar. Entre las diferentes amenazas naturales que potencialmente pueden afectar el área marino costera de Venezuela destacan: las meteorológicas, las oceanográficas, las geológicas y las biológicas. En la Tabla I se enumeran con mayor detalle cada una de las diferentes amenazas que componen los grupos nombrados previamente, dentro de las cuales está el aumento del nivel del mar, cuya variación puntual será estudiada al relacionarla con el paso de fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes que afectan de una manera notoria el equilibrio dinámico que tiene Isla de Aves.

Con la data recolectada, procesada y analizada se realizaron una serie de simulaciones que permitieron visualizar la condición general de la isla cuando ésta es afectada por alguno de los fenómenos meteorológicos de diferente intensidad que pasan cerca de ella, determinándose que partes de la isla quedaban sumergidas y cuales permanecían sobre el nivel que alcanza la superficie del mar en los momentos de afectación, pudiendo apreciarse que el relieve de la isla quedaba totalmente sumergido cuando era afectada por huracanes de grado 3 o superior, cuya acción está asociada a sobre-elevaciones del nivel medio del mar superiores a los 3 m.

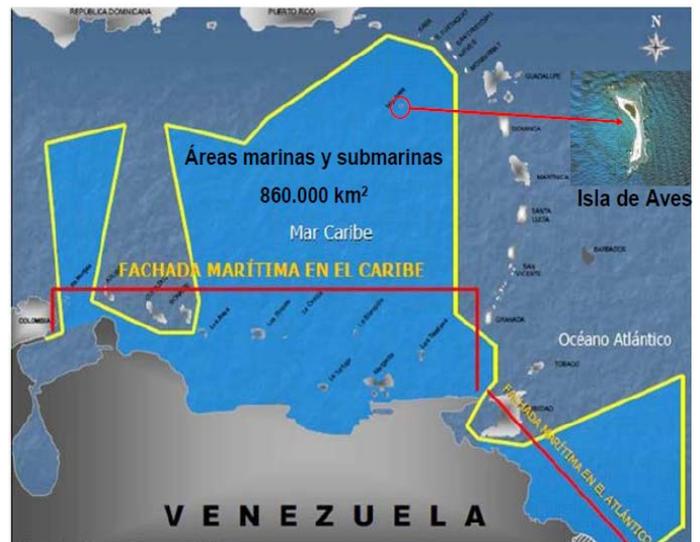


Figura 1: Esquema de las Áreas Marinas y Submarinas de la República Bolivariana de Venezuela en el Mar Caribe y el Océano Atlántico. **Fuente:** [1] y Modificado por el Autor.

Tabla I: Amenazas Naturales con Potencial de Afectación de las Áreas Marino-Costeras de Venezuela [2]

Meteorológicas	Oceanográficas	Geológicas	Biológicas
- Precipitaciones extremas. - Ciclones tropicales. - Trombas marinas. - Sequías. - Rayos y relámpagos.	- Tsunamis. - Aumento del nivel del mar. - Corrientes circulares (Eddies). - Mar de fondo (Swell). - Resacas (Rip Currents). - Erosión de costas. - Olas internas. - Seiches.	- Sismos. - Licuefacción. - Deslaves submarinos. - Corrientes de turbidez. - Desplazamiento en fallas submarinas. - Desprendimientos de tierra.	- Marea Roja. - Emanaciones tóxicas. - Insectos.

II. SELECCIÓN DE LA AMENAZA A SER ESTUDIADA

De las diferentes amenazas que potencialmente pueden afectar a las áreas marino-costeras de la República Bolivariana de Venezuela mostradas en la Tabla I, se seleccionó para su estudio, el aumento puntual del nivel del mar asociado al paso de fenómenos meteorológicos tales como huracanes, por una determinada área.

Este hecho cobra particular importancia en momentos en que la exploración de yacimientos de gas costa afuera asociada a proyectos como el “*Proyecto Mariscal Sucre (PMS)*” y el “*Proyecto Corocoro*” en el litoral oriental al Norte de la Península de Paria, y los proyectos en los campos “*Perla*” y “*Barracuda*” en el Golfo de Venezuela han comenzado a desarrollarse, lo que implica la posibilidad futura de que se construyan instalaciones asociadas a este tipo de actividad, tales como plataformas de producción, tuberías submarinas de conducción, instalaciones costeras de almacenamiento, etc., las cuales en su diseño y construcción necesariamente deben considerar la influencia extrema que fenómenos como tormentas tropicales o huracanes pueden ocasionar sobre variables como: altura de oleaje, velocidad del viento, velocidades de flujo, cotas de inundación de las áreas costeras, etc. y que eventualmente pueden afectar a las mencionadas instalaciones.

El estudio de la amenaza seleccionada se realizó en dos (2) niveles de análisis:

- Un análisis “general” que persiguió generar información climatológica general tanto en las

costas venezolanas como en buena parte del mar Caribe.

- Un análisis “particular” que se concentró en la Isla de Aves, la cual conforma la porción de terreno más septentrional de Venezuela, expuesta fuerte y continuamente a la acción de los huracanes. Dicho análisis permitió obtener y evaluar la respuesta de la isla ante la sobre-elevación del mar generada (“marea de tormenta”) debido al paso de dichos fenómenos meteorológicos por el área estudiada.

En [2] se hizo un exhaustivo análisis sobre un amplio dominio de estudio que cubrió el Mar Caribe y parte del Océano Atlántico, así como parte de las áreas terrestres, en especial las zonas costeras de buena parte de los países que se sitúan en el área (ver Figura 2) cubriendo un espacio que varía aproximadamente entre los 45° y 105° de longitud oeste, y entre 7° y 35° de latitud norte.

En el caso particular de la República Bolivariana de Venezuela, cubrió el litoral costero del norte del país, así como a la Isla de Aves (ubicada a casi 600 km. al norte de las costas venezolanas), sobre la cual se hizo un estudio específico asociado a la “marea de tormenta” que se genera por el accionar de los huracanes que inciden y afectan a esta pequeña pero importantísima área terrestre del territorio venezolano.

Los análisis y resultados presentados en este trabajo son los relacionados con el análisis particular realizado en las inmediaciones de la isla de Aves.

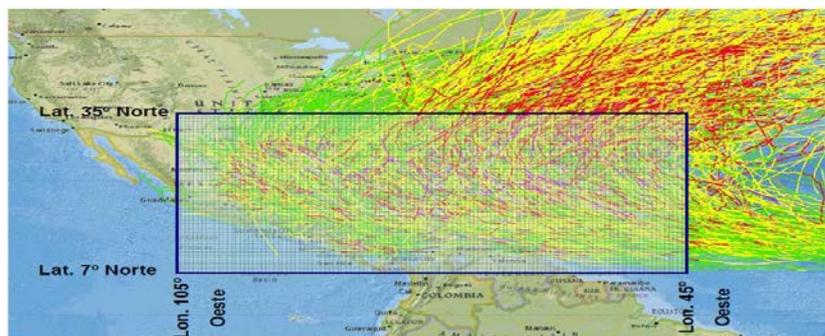


Figura 2: Ubicación Relativa del Dominio de Estudio con Respecto al Espacio Total por el que han Transitado los Fenómenos Meteorológicos en el Océano Atlántico [2]

III. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL PELIGRO Y RIESGO ASOCIADO AL TRÁNSITO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN UN DOMINIO DE CÁLCULO ESPECÍFICO

Los ciclones tropicales se caracterizan por presentar una circulación cerrada de sus vientos, pudiendo dividirse y caracterizarse en función a su viento máximo sostenido en superficie (VMS) según la categorización propuesta en la escala de Saffir-Simpson

Los registros de ocurrencia de los diferentes fenómenos naturales que se han presentado en el Océano Atlántico y el Mar Caribe fueron obtenidos de la base de datos de huracanes del Atlántico (conocida como HURDAT) de la "National Oceanographic and Atmospheric Administration", analizándose las características de cada una de sus trayectorias dentro del dominio de estudio definido y mostrado en la Figura 2.

En cada elemento o "nodo o celda de cálculo" consistente en un área cuadrada de 0,5° (aproximadamente 55 km medida sobre el paralelo de 0° o ecuador), se procedió a contabilizar el número de trayectorias que pasaron dentro de cada "nodo o celda de cálculo" como el mostrado en la Figura 3.

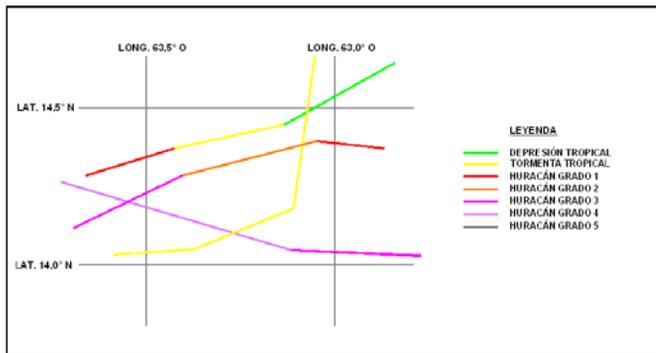


Figura 3: Elemento o "Nodo de Cálculo" Típico Utilizado para Discretizar el Dominio de Estudio [2]

En caso de que dentro del "nodo o celda de cálculo" la trayectoria del fenómeno natural estudiado presentase diferentes intensidades, tal como se ejemplifica en la Figura 3, a efectos de cualquier cálculo se tomó la mayor de las intensidades, contabilizándose además como un solo evento.

En [2] puede verse en forma detallada la metodología seguida en cada "nodo de cálculo" mediante el desarrollo de un ejemplo hipotético, en el cual se calcularon la tasa de excedencia, el período de retorno y el peligro asociado al paso de los diferentes fenómenos estudiados a través del dominio de estudio.

La base de datos del índice seleccionado para hacer los diferentes análisis que se desarrollaron en este trabajo, corresponden a la base de datos de la NOAA para el índice ONI (*Oceanic Niño Index* por sus siglas en inglés), en la cual se presentan las anomalías de la

temperatura superficial del mar desde el año 1950 hasta el presente.

IV. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA TASA DE EXCEDENCIA, FUNCIÓN DE PELIGRO Y PERÍODO DE RETORNO ASOCIADO AL PASO DE CICLONES TROPICALES EN LAS CERCANÍAS DE ISLA DE AVES

De acuerdo con la metodología descrita en [2], en la Tabla II se presentan los resultados obtenidos para la "celda de cálculo" dentro de la cual se ubica la Isla de Aves, incluyéndose en el análisis todos aquellos fenómenos meteorológicos cuya trayectoria hubiese pasado a menos de 65 millas náuticas (unos 120 km) de la posición de la isla, en el lapso comprendido entre 1851 y 2017.

Tabla II: Caracterización y Contabilización de los Distintos Fenómenos Meteorológicos que han Pasado a Menos de 65 Millas Náuticas de Isla de Aves (Lapso: 1851-2017)

Intensidad (i)	Categoría	M _i (eventos de intensidad i)
1	DT	7
2	TT	38
3	H1	9
4	H2	9
5	H3	5
6	H4	2
7	H5	2
	Total	72

Por otra parte, la tasa anualizada de excedencia, la función de peligro $P(i)$, entendiéndose el peligro como la probabilidad anual de que se presente un evento que exceda la intensidad i sin avanzar al siguiente nivel, y el período de retorno (promedio temporal en que vuelve a ocurrir la excedencia de cierta intensidad i) se muestran en la Tabla III.

A partir de dicha tabla se puede inferir que en promedio, cada 2,5 años la isla es afectada en mayor o menor grado por un fenómeno meteorológico cuya intensidad es como mínimo el de una tormenta tropical, mientras que en promedio cada 19 y 84 años es afectada por un fenómeno meteorológico cuya intensidad es como mínimo el de un huracán grado 3 (H3) o un huracán grado 5 (H5), respectivamente.

Aunque muy pocos de estos fenómenos meteorológicos pasaron directamente sobre Isla de Aves, todos en mayor o menor grado, dependiendo de cuán cerca pasaron y de cuál era su intensidad para ese momento, generaron sobre-elevación del nivel de mar y tuvieron efectos sobre la morfología de la isla, impactando su frágil y llano relieve, a la vez que dejaban sumergida buena parte del área terrestre de la misma con los consecuentes efectos asociados a la pérdida de parte del material arenoso que conforma la isla, pudiendo en casos en que el impacto de estos fenómenos se

repetiera con cierta frecuencia, disminuir la capacidad de recuperación natural de la morfología original de la isla, producto del arrastre de sedimentos por parte de oleaje y del viento.

Tabla III: Tasas de Excedencia, Función de Peligro y Período de Retorno Asociados al Paso de Ciclones en Áreas Cercanas a Isla de Aves

Intensidad (i)	Categoría	M _i (Eventos de intensidad i)	Tasa de excedencia v(i)	Tasa de excedencia anualizada	Peligro P(i)	Período de retorno (Tr) (años)
1	DT	7	72	0.431	0.097	2.32
2	TT	38	65	0.389	0.528	2.57
3	H1	9	27	0.162	0.125	6.19
4	H2	9	18	0.108	0.125	9.28
5	H3	5	9	0.054	0.069	18.56
6	H4	2	4	0.024	0.028	41.75
7	H5	2	2	0.012	0.028	83.50
Total		72				

En el siguiente aparte se describen y detallan cada una de las componentes asociadas al aumento puntual del nivel del mar por efecto del paso de fenómenos meteorológicos, a la vez que se calculan mediante las metodologías descritas, los valores de sobre-elevación asociados al paso de cada uno de los fenómenos mostrados en la Tabla III donde se tenga información del valor de la presión central del mismo, para a partir de los resultados obtenidos, evaluar y modelar la acción de los casos más críticos.

V. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LAS DIFERENTES COMPONENTES ASOCIADAS A LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

Dentro de la ingeniería de costas, el estudio de la cota de inundación es de suma importancia, no sólo por ser un aspecto más que caracteriza a una determinada zona litoral, sino también desde el punto de vista urbanístico, ya que permite establecer límites en la ordenación territorial y en el planeamiento y progresión del crecimiento urbano y humano.

En otras palabras, el cálculo de la variación del nivel del mar es un paso inevitable para poder estimar la cota de inundación de cualquier punto de la costa.

En este trabajo, se hará el cálculo de la sobre-elevación del mar para una localidad específica: Isla de Aves, no solamente porque su importancia geopolítica para Venezuela es muy alta, sino porque es la porción de tierra perteneciente a Venezuela que está por mucho, más sometida a la acción de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes y tormentas tropicales, cuya acción y contribución es una componente importante dentro del aumento de la sobre-elevación del mar por encima de su nivel normal (nivel medio del mar).

La sobre-elevación del nivel de mar puede expresarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta_{total} = \eta_{astronómica} + \eta_{meteorológica} + \eta_{oleaje} + \eta_{fluvial} + \dots \quad (1)$$

En cuyo cálculo normalmente se asume una superposición lineal de las distintas contribuciones, aunque esto no sea totalmente cierto desde el punto de vista matemático, ya que con frecuencia existen interacciones no lineales de la marea meteorológica con la marea astronómica, con descargas fluviales, etc.

A continuación se describirán cada una de las componentes que integran la ecuación (1) y se expondrá la metodología general de cálculo utilizada para la determinación de cada componente, para luego aplicar específicamente esa metodología al sector donde se ubica "Isla de Aves" bajo situaciones críticas asociadas al paso de fenómenos meteorológicos extremos, lo que redundará en mayores sobre-elevaciones puntuales del nivel medio del mar, con el consecuente peligro y riesgo asociado a la "amenaza" estudiada (sobre-elevación del nivel del mar vinculada al paso de huracanes por un determinado sector).

Para el caso estudiado en este trabajo se conoce la marea astronómica a través de predicciones de marea disponibles en sitios cercanos, la marea meteorológica será calculada para diferentes condiciones, mientras que la contribución fluvial es nula dado que no hay ningún río que aporte caudal a las áreas estudiadas, por lo que la sobre-elevación total del nivel de mar se calculará tomando en cuenta la contribución de las componentes astronómicas, meteorológicas y de oleaje.

Con los cálculos realizados se podrá evaluar y caracterizar la respuesta de la isla ante esos eventos extremos, permitiendo entre otros aspectos, establecer que porciones de la isla quedan bajo el agua y que porciones no quedan sumergidas.

A. Componente astronómica del nivel del mar (marea)

En términos muy sencillos, la marea es la variación periódica del nivel de un cuerpo de agua que asciende y desciende en respuesta a las interacciones gravitacionales entre el Sol, la Tierra y la Luna.

Es la componente que puede predecirse con mayor exactitud debido a que su origen está ligado al movimiento y acción de los astros sobre la Tierra, esencialmente el Sol y la Luna, y al ser el movimiento de estos astros totalmente predecibles también lo es su influencia sobre las masas de agua (océanos de la Tierra).

Una de las formulaciones matemáticas a través de la cual se representa la variación espacial y temporal de los niveles de marea y de las velocidades de corriente es el llamado "Análisis Armónico", el cual se basa en la hipótesis de que las variaciones del nivel del mar pueden ser descritas en función de un número finito de contribuciones armónicas de la forma:

$$A_{i,j} \cos(w_i t - g_{i,j}) \quad (2)$$

Donde $A_{i,j}$ es la amplitud de cada componente (i) en el punto geográfico considerado (j), $g_{i,j}$ es el desfase con respecto al máximo de la marea de equilibrio en Greenwich, y w_i es la frecuencia angular del armónico. Estas frecuencias no tienen valores aleatorios, por el contrario, dichos valores son determinados por los ciclos de las fuerzas astronómicas que dan origen a las mareas.

Un análisis completo de los datos de un mareógrafo tomados durante un año puede incluir unos cien (100) constituyentes, pudiendo luego de realizarse ese estudio, definirse la elevación de la superficie η en un punto j y en un determinado instante de tiempo t de acuerdo a la expresión:

$$\eta_{i,j} = \sum_{i=1}^n A_{i,j} f_{i,t} \cos(w_i t - g_{i,j} + (V_{i,t} + v_{i,t})) \quad (3)$$

En la cual $A_{i,j}$ es la amplitud del armónico i en el punto j , w_i es la frecuencia, $g_{i,j}$ es el desfase con respecto al máximo de la marea de equilibrio en Greenwich (nótese que esta variable no tiene dependencia temporal por lo cual sirve para expresar las diferencias de fase existentes entre puntos geográficos en un determinado instante), $V_{i,t}$ es el desfase con respecto al origen de tiempo (con valores entre 0 y 2π a lo largo de un período de marea) y por último, los denominados factores nodales $f_{i,t}$ y $v_{i,t}$ los cuales son modulaciones, tanto de amplitud como de fase, que se utilizan para incluir los efectos de los armónicos de período largo (hasta 18,6 años), cuya influencia no puede incluirse en el análisis de un año de datos. Un exhaustivo y completo análisis de este método se puede encontrar en [3].

A los efectos de este trabajo, se utilizó la predicción de niveles generada por un software comercial especializado, usándose la estación con datos disponibles que estuviera más cerca del área de estudio (isla de Aves), ubicada en la isla de Dominica, a unos 230 km al este de isla de Aves, específicamente en el sector oeste de Dominica conocido como "Portsmouth", a partir de la cual se pudo establecer que la amplitud promedio de la marea en el área era de 0,30 m, lo que

implica una sobre-elevación periódica por encima del nivel medio del mar del orden de 0,15 m

En la Figura 4 se muestra la ubicación relativa entre ambas localizaciones.

B. Componente meteorológica o marea de tormenta ("Storm Surge"). Estado del arte

Para acometer el estudio de la marea de tormenta asociada a la acción de ciclones tropicales se han desarrollado diferentes metodologías.

En primer término los modelos empíricos de tormenta son relativamente fáciles de desarrollar y de aplicar, ya que se derivan a partir del análisis histórico de datos de campo.



Figura 4: Ubicación Relativa entre la Estación donde se Dispone de Predicciones de Marea e Isla de Aves

En general, este tipo de modelos utilizan funciones empíricas para relacionar la altura pico de la marejada con la disminución de presión de la tormenta, calculado como la diferencia de presión entre el centro de tormenta y su periferia. Tienden a calcular sólo picos de marea en líneas de costa abierta.

En [4] se desarrolló una ecuación empírica obtenida a partir de una regresión lineal para calcular las alturas pico de los huracanes en tierra, utilizando datos históricos de huracanes observados y alturas de oleaje a lo largo de las costas abiertas.

En [5] [6] se encontraron variaciones sistemáticas de la marejada asociadas a dos (2) parámetros: la presión central mínima del fenómeno y la distancia de 50 fathoms (brazas, ó 91,44 m) a partir de la línea de costa, concluyendo que la pendiente de la plataforma continental sólo tiene una incidencia menor sobre la marea de tormenta.

Partiendo de datos empíricos y cálculos teóricos en [7] se desarrollaron tres (3) nomogramas cuyo uso permite una estimación rápida del pico de la marejada. El primer nomograma utiliza el diferencial de presión y el radio al viento máximo asociado al fenómeno para hacer la estimación inicial de la oleada, mientras que los otros nomogramas realizan correcciones que toman en

cuenta los efectos de la disminución de profundidad y la dirección y velocidad con la que se mueve la tormenta.

Por otra parte [8] utilizó estos nomogramas para estimar las alturas máximas de marea asociados al paso de los huracanes Katrina y Rita, obteniendo resultados muy parecidos con los valores observados.

En segundo término, y en contraste con los modelos empíricos, están los sofisticados modelos numéricos de ciclones tropicales a partir de los cuales se trata de reproducir, tanto el clima marítimo de una determinada zona para estimar el nivel de marea de tormenta en el área costera, como el determinar cotas de inundación tierra adentro, entre los cuales se pueden mencionar: el SLOSH (*Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes*) por sus siglas en inglés desarrollado por el *National Weather Service* (NWS).

Según [9] el modelo SLOSH produjo estimaciones razonablemente precisas para alturas máximas de tormenta, sustentadas sobre numerosas validaciones y comparaciones con huracanes históricos, las cuales mostraron que las estimaciones del modelo SLOSH estaban dentro de $\pm 20\%$ de los valores observados.

Otro modelo como el ADCIRC [10] ha sido utilizado para determinar la importancia e influencia, no solamente de la intensidad del huracán sino del tamaño del mismo, en la generación de la marea de tormenta.

En términos generales, la simulación numérica de la hidrodinámica costera es un importante campo con un crecimiento constante en varios frentes, y que por tanto no puede resumirse completamente en pocas páginas.

Los actuales modelos oceánicos pueden ser extremadamente sofisticados como resultado de cientos de años-persona invertidos en los diversos aspectos de su desarrollo [11], habiendo evolucionado hasta un alto grado de sofisticación con una serie de métodos que permiten parametrizar los diversos procesos físicos no resueltos, así como el uso de mallas híbridas a lo largo de la columna de agua. En [12] se presenta un buen resumen del estado actual en lo que se refiere a modelado oceánico.

- *Cálculo del componente meteorológico de la marea*

Los movimientos mareales (relativos a las mareas), con frecuencias bien definidas, son continuamente modificados por la acción de agentes climáticos, teniéndose que el intercambio energético entre la atmósfera y las masas de agua ocurren a diversas escalas espacio-temporales, desde la generación de ondas de viento de período corto, hasta la reducción de gradientes térmicos asociados a la transferencia de energía térmica a los polos.

La importancia relativa de los movimientos mareales y no mareales, es función de la época del año y de la batimetría local, siendo las perturbaciones atmosféricas, por lo general, mayores en invierno y con un mayor efecto cuando actúan sobre aguas someras (poco profundas), teniéndose que la cota total de agua (suma de la marea, oleaje, caída de la presión, acción del

viento y otros factores), puede originar serias inundaciones.

Físicamente, la atmósfera actúa sobre la masa de agua de dos (2) formas distintas:

- ✓ Variaciones de la presión atmosférica generan cambios en las fuerzas verticales actuantes sobre la superficie libre del agua (esfuerzos normales), las cuales se transmiten a toda la columna de agua.
- ✓ Las fuerzas asociadas al esfuerzo tangencial del viento que son generadas en el sector superficial de la columna de agua y que actúan paralelamente a la superficie libre. El grado de influencia que dichas fuerzas tienen sobre la columna de agua va a depender de la longitud del cuerpo de agua disponible (lago, océano o río, conocido como “*fetch*”) y del tiempo sobre el cual actúa el viento, de la viscosidad del fluido y del grado de estratificación de la densidad a lo largo de la columna de agua, responsable de controlar la transferencia de momento hacia los sectores medio y profundo de la columna de agua.

La marea meteorológica (“Storm Surge” como se conoce en el idioma inglés) se puede definir como la respuesta del nivel medio del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento (transmitidas por viscosidad al interior del fluido) y a los esfuerzos cortantes normales cuyo origen está asociado al campo de presión atmosférica que esté presente.

Estas “mareas” pueden generar sobre-elevaciones del nivel medio del mar, siendo usual que durante un evento de tormenta o paso de un ciclón tropical, los efectos del viento y de la presión atmosférica no puedan ser identificados por separado [13], razón por la que se habla en forma conjunta de “marea meteorológica”, debiendo recalarse que cuando se habla de “marea meteorológica” y concretamente de la acción del viento, no se está haciendo referencia al oleaje generado por viento local o remoto.

El esfuerzo del viento sobre la superficie libre genera un gradiente de la cantidad de movimiento, y aunque el esfuerzo tangencial asociado al viento sobre la superficie es pequeño, integrado (sumado) sobre una gran masa de agua, puede llegar a ser catastrófico, a tal punto que en casos extremos de huracanes que han pasado por el golfo de México, han llegado a incrementar el nivel medio del mar hasta en 6 m [14]. Por lo general, en la determinación de la marea meteorológica se toman en cuenta dos (2) fenómenos o situaciones atmosféricas como lo son los huracanes y los ciclones extratropicales, e adicionalmente, aunque con un orden de magnitud e importancia menor a los dos (2) primeros fenómenos, pudiese considerarse la intensificación ocasional de los vientos alisios como un factor a ser tomado en cuenta a la hora de evaluar la elevación de los niveles de la superficie libre del agua.

La amplitud de la marea de tormenta depende de varios factores físicos del lugar donde se desee conocerla, como lo son: el fondo marino ó batimetría, la línea de costa y su ubicación con respecto a la trayectoria del ciclón, y los vientos asociados a éste.

Es por ello que, en aguas profundas, la marea de tormenta es de poca importancia, debido al ascenso del orden de 1 cm por cada milibar (o hectopascal) de descenso de la presión atmosférica, pero en cambio, si los vientos del ciclón tropical se presentan sobre regiones marinas donde la profundidad de las aguas es menor de 200 m, puede adquirir valores superiores a 1 metro.

La estimación h (en metros) más grande que alcanza a ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta (amplitud de la marea de tormenta), se calcula a partir de la velocidad V del viento sostenido (km/h) y del radio máximo del viento (en km).

Con base en el análisis de mediciones de sobre-elevaciones de la marea de tormenta asociada al paso de algunos ciclones tropicales, y de expresiones empíricas propuestas en Estados Unidos y en Japón, se obtuvo la siguiente expresión para estimar la amplitud máxima de la marea de tormenta debida al accionar de un ciclón tropical [15]:

$$h = (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \quad (4)$$

Donde:

h = Elevación (en m) más alta que alcanza la marea de tormenta en el mar, cerca de la costa.

R = Radio de máximo viento (en km).

V = Es la velocidad máxima del viento sostenido (en km/h) a 10 m sobre la superficie media del mar, y a una distancia R del centro del ciclón tropical (se puede obtener a partir de la presión central del ciclón tropical, del radio máximo del viento, de la latitud del centro del ciclón tropical y de la velocidad de traslación de éste).

F = Es un factor correctivo por dirección del viento.

De acuerdo con [15], el valor R del radio de máximo viento (en km), puede calcularse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0} \quad (5)$$

Donde:

P_0 es la presión central en el centro del fenómeno meteorológico (milibares).

Por otra parte, la velocidad V del viento sostenido (km/h), entendiéndose por viento sostenido al viento medio más grande registrado durante un (1) minuto, a una altura aproximada de diez (10) metros sobre la superficie, se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$V = 20.1834(1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{sen}\phi + 0.5V_d \quad (6)$$

Donde:

V_d = Velocidad de desplazamiento del ciclón tropical (km/h).

ϕ = Es la latitud en el centro del ciclón (en grados).

El factor correctivo F , se determina a partir del ángulo α que forma la dirección de desplazamiento del ciclón tropical con respecto a la línea de costa próxima al sitio de interés, pudiendo determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$F = \begin{cases} 0.6(1 + \text{sen}\alpha) & \text{si } 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \\ 0.6 & \text{en otros casos} \end{cases} \quad (7)$$

En la Figura 5 se presenta el ángulo α existente entre la trayectoria del ciclón tropical y la línea de costa para dos (2) casos distintos de dirección del desplazamiento del fenómeno meteorológico, teniéndose que la región cercana al centro del ciclón tropical es donde se presentan los vientos más intensos, específicamente entre las distancias mitad del radio de máximo viento y el doble de dicho radio, en otras palabras, entre $0,5R$ y $2,5R$, siendo R el radio de máximo viento, conformando la región anillada mostrada en la Figura 6.

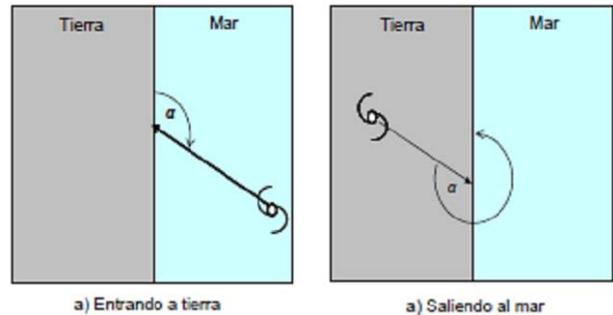


Figura 5: Trayectoria de un Ciclón Tropical con Respecto a la Línea de Costa [15]

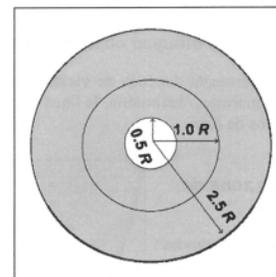


Figura 6: Área de Localización de los Máximos Vientos Circundando al Centro del Ciclón Tropical [15]

Es importante recalcar que la marea meteorológica constituye sólo una parte de los diferentes agentes que contribuyen a aumentar el nivel total de la cota de agua

existente en una determinada localización, teniéndose que el nivel total se calcula de acuerdo con (1).

- *Cálculo de la sobre-elevación del nivel medio del mar por oleaje o set-up*

Para el cálculo de la sobre-elevación del mar ("set-up") se consideró la formulación propuesta en [16]:

$$S_w = 0,15 d_b - \frac{g^{1/2} (H_o)^2 T}{64\pi d_b^{3/2}} \quad (8)$$

Donde:

S_w = Sobre-elevación debida al oleaje.

d_b = Profundidad a la que rompe el oleaje.

g = Aceleración de gravedad.

T = Período de la ola.

H_o = Altura de la ola en aguas profundas.

La profundidad de rompiente puede calcularse de acuerdo con la formulación propuesta en [17], donde:

$$d_b = \frac{H_b}{\frac{1,65}{1 + e^{-1,95m}} - \frac{43,75(1 - e^{-19m})H_b}{gT^2}} \quad (9)$$

Donde m es la pendiente de la playa y H_b es la altura de la ola ya refractada que hay a la profundidad de rompiente, la cual se obtiene a partir de planos de refracción que se deben tener para el área de estudio.

De acuerdo con las diferentes metodologías de cálculo anteriormente descritas, se analizó el caso concreto de Isla de Aves, en base a la data histórica obtenida a partir de la base de datos HURDAT, de la cual se tomaron los diferentes fenómenos meteorológicos que han afectado a la isla desde 1851, y que por tanto, han generado diferentes intensidades de sobre-elevaciones del mar que en mayor o menor grado han afectado a la morfología de la isla.

Con los cálculos obtenidos se evaluó y caracterizó la respuesta de la isla ante esos eventos extremos, permitiendo entre otros aspectos, establecer que porciones de la isla quedan bajo el agua y que porciones no quedan sumergidas.

VI. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE ISLA DE AVES Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Isla de Aves, situada al norte del mar Caribe, es la más septentrional de Venezuela, ubicándose a unos 666 km al noreste del puerto de La Guaira [18], teniendo las siguientes coordenadas geográficas: 15° 40' de latitud norte y 63° 37' de longitud oeste (Figura 7). Es de origen coralino, contando con un área aproximada de 3,6 hectáreas, y unas dimensiones aproximadas en dirección norte-sur de unos 550 m, mientras que en la zona más ancha tiene unos 140 m de longitud y tiene, tal como se mencionó en el aparte 3, una gran importancia geopolítica al generar por su ubicación, unos 75.000 km² de zona económica exclusiva (ZEE)

para Venezuela, siendo desde el punto de vista ecológico una de las zonas de anidación de la tortuga verde más importante del Caribe y de varias especies de aves, por lo que en 1972 fue declarada como refugio de fauna silvestre.

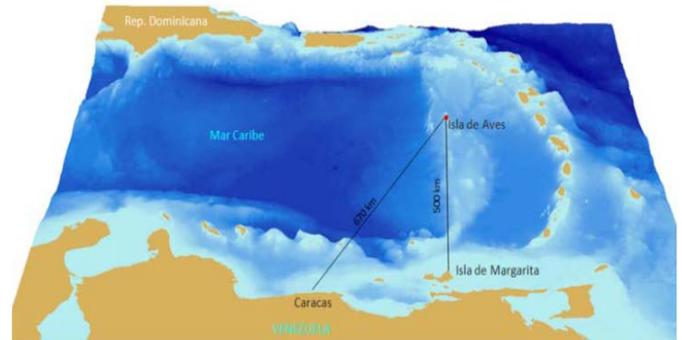


Figura 7: Ubicación Relativa de Isla de Aves en el Mar Caribe [19]

La isla se forma sobre un basamento calcáreo (fondo duro), a sotavento de un arrecife que actúa como una barrera protectora contra el oleaje a la vez que permite la acumulación de arenas y escombros. Este sustrato no consolidado está sujeto a los continuos efectos de procesos sedimentarios y erosivos asociados a la acción continua del oleaje, marea y viento, que provocan cambios constantes en la geometría de la isla, afectando en cierto grado su tamaño y forma [20].

El tamaño del arrecife frangeante que la protege es un factor limitante para el tamaño del cayo. En [21] se plantea que: "para que la isla fuese de mayor tamaño, el arrecife frangeante debería extenderse hacia el norte y sur, debiendo existir remanentes de arrecifes frangeantes del Holoceno, los cuales no existen".

Geomorfológicamente hablando Isla de Aves pertenece a la dorsal de Mariner, conformando la cima de un extinto cono volcánico que se eleva desde los 2000 m de profundidad. La cima del norte de esta formación da origen a una meseta en la cual está localizada la isla (Figura 8).

- *Equilibrio dinámico de la isla*

Son varios los elementos que contribuyen a mantener a la isla en un continuo "equilibrio dinámico". Entre dichos elementos destacan:

- ✓ El arrecife frangeante que bordea las costas norte, este y sur, y que conforma el elemento estructural de mayor importancia de la isla, en cuanto a su función protectora contra el oleaje.
- ✓ La plataforma arrecifal, sobre la cual se asienta la isla y que está conformada por sustratos de caliza dura y compacta.
- ✓ Terraza de tormenta, rocas de playa y gravas y escombros calcáreos.

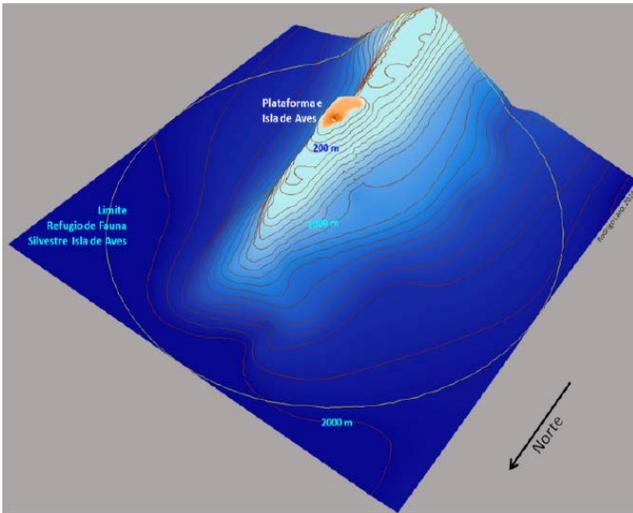


Figura 8: Vista Tridimensional de la Dorsal Mariner y de la Plataforma sobre la que se Ubica Isla de Aves [19]

No obstante, este “equilibrio dinámico” puede cambiar rápidamente ante la acción de tormentas tropicales o huracanes, cuyos fuertes vientos y oleajes asociados generan una sobre-elevación del nivel del mar, que conforman un conjunto de catalizadores de procesos erosivos de los sedimentos no consolidados que subyacen sobre la plataforma arrecifal, siendo la intensidad y magnitud de dicho proceso erosivo, proporcional al de la intensidad y duración de los campos de viento y oleaje vinculados a estos fenómenos meteorológicos, aunque también pueden actuar en sentido inverso al depositar a su paso grandes bloques calcáreos sobre la plataforma arrecifal, hecho que contribuye en el proceso de formación de las terrazas de tormenta y a la estabilidad general de la isla.

VII. CÁLCULO DE LA SOBRE-ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR ASOCIADO AL PASO DE FENÓMENOS METEOROLÓGICOS CERCA DE ISLA DE AVES

A partir de la base de datos HURDAT, se identificaron cada uno de los diferentes fenómenos meteorológicos que han pasado a menos de 65 millas náuticas (unos 120,5 km) de isla de Aves, en el período de tiempo comprendido entre 1851 y 2017 (Figura 9).

En dicha figura el centro del círculo (de radio 65 millas náuticas) representa la ubicación de Isla de Aves, teniéndose que los diferentes colores que tienen cada una de las trayectorias están asociados a la intensidad que tenía el fenómeno meteorológico a su paso por las cercanías de la isla, mientras que en la Tabla IV se presentan las características y fecha de ocurrencia de cada uno de los fenómenos mostrados en la Figura 9

Para cada uno de esos fenómenos se realizó el cálculo de la sobre-elevación del nivel del mar generada a su paso de acuerdo a las metodologías descritas anteriormente, obteniéndose cotas sobre el nivel medio del mar para cada categoría de fenómeno.

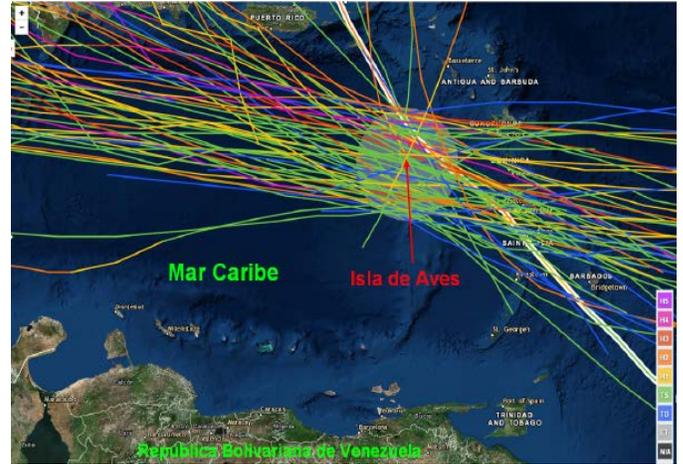


Figura 9: Fenómenos Meteorológicos que han Pasado a Menos de 65 Millas Náuticas de Isla de Aves. Lapso: 1851-2017 [2]

El valor de la sobre-elevación asociada a los cambios y presión del viento se obtuvo a partir del cálculo de cada una de las variables incluidas dentro de las ecuaciones que caracterizan la acción del fenómeno, mientras que para la componente asociada al oleaje, se utilizaron los planos de refracción del oleaje desarrollados por [22], conjuntamente con la batimetría que rodea a la isla y la topografía de la misma, sin los cuales hubiese sido imposible calcular la altura de ola significativa del oleaje ya afectada por los efectos de refracción del oleaje debido a los cambios de profundidad existente en las cercanías de la isla.

En la Figura 10 y en la Figura 11 se presentan respectivamente, una vista en planta y una vista tridimensional de la topobatemetría de la isla, referidas altiméricamente al nivel medio el mar.

Por otra parte, en la Tabla V se presentan los cálculos de sobre-elevación asociados tanto a la acción del campo de vientos y variación de la presión, como los vinculados a la acción del oleaje, así como la sobre-elevación total del nivel del mar para cada uno de los setenta y dos (72) fenómenos meteorológicos que pasaron a menos de 65 millas náuticas de isla de Aves en el lapso de tiempo comprendido entre los años 1851 y 2017, mientras que en la Tabla VI se presenta un resumen de estos registros, agrupándolos de acuerdo con la categoría que tenía el fenómeno meteorológico para el momento en que pasó más cerca de Isla de Aves.

Con la data recolectada, procesada y analizada se procedió a realizar una serie de simulaciones a los fines de visualizar la condición general de la isla cuando ésta es afectada por algún fenómeno meteorológico, viendo que partes de la isla quedan sumergidas y cuales permanecen sobre el nivel que alcanza la superficie del mar en los momentos de afectación.

Los valores de sobre-elevación obtenidos no pueden superar la cota de la primera cubierta de la estación

científica naval que desde 1978 se instaló en la isla, ya que en caso de que eso hubiera ocurrido, se tendrían reportes que hubieran documentado el hecho, sobre todo por los daños que esto hubiera causado a la estación.

Dicha estación se muestra en la Figura 12 y a partir de la misma puede estimarse, tomando como referencia la información contenida en [23] acerca de que el faro y el racon de la estación se encuentran a 19 m de altura sobre el nivel medio del mar, que la losa de piso que está conectada con las columnas de hormigón, tiene

una cota del orden de 7 m, mientras que la cota de la losa de la primera cubierta es del orden de 8 m sobre el nivel medio del mar, por lo que los mayores valores de sobre-elevación calculados, no deberían sobrepasar la cota del puente que da acceso a la estación.

Tabla IV: Características y Fecha de Ocurrencia de los Fenómenos que han Pasado a Menos de 65 Millas Náuticas de Isla de Aves. Lapso: 1851-2017

Nombre del Evento	Fecha de ocurrencia (día/mes/año)	Intensidad a su paso por Isla de Aves	Nombre del Evento	Fecha de ocurrencia (día/mes/año)	Intensidad a su paso por Isla de Aves
Sin nombre	24/08 a 27/08/1855	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	14 al 27/07/1933	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	24 al 30/09/1857	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	20 al 23/08/1934	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	26/08 al 01/09/1864	Huracán grado 1 (H1)	Sin nombre	24 al 27/07/1944	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 14/09/1865	Huracán grado 2 (H2)	Sin nombre	02 al 04/08/1945	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	13 al 18/08/1866	Huracán grado 2 (H2)	Sin nombre	20 a 22/09/1949	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	26/09 al 10/10/1873	Tormenta tropical (TS)	Sin nombre	30/08 a 03/09/1949	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	09 al 16/10/1879	Tormenta tropical (TS)	Charlie	12 al 23/08/1951	Huracán grado 1 (H1)
Sin nombre	04 al 14/08/1880	Tormenta tropical (TS)	Betsy	09 al 21/08/1956	Huracán grado 1 (H1)
Sin nombre	04 al 13/09/1883	Huracán grado 3 (H3)	Ella	30/08 a 07/09/1958	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	12 al 26/09/1889	Tormenta tropical (TS)	Edith	18 a 19/08/1959	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	18 al 25/08/1891	Huracán grado 3 (H3)	Frances	30/09 a 10/10/1961	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	12 al 20/10/1891	Tormenta tropical (TS)	Edith	23 a 29/09/1963	Huracán grado 2 (H2)
Sin nombre	18/09 al 01/10/1894	Huracán grado 3 (H3)	Cleo	20/08 a 05/09/1964	Huracán grado 4 (H4)
Sin nombre	11 al 20/10/1894	Huracán grado 2 (H2)	Inez	21/09 a 11/10/1966	Huracán grado 4 (H4)
Sin nombre	22 al 30/08/1895	Tormenta tropical (TS)	Beulah	05 al 22/09/1967	Huracán grado 2 (H2)
Sin nombre	30/08 al 11/09/1896	Huracán grado 2 (H2)	Holly	14 a 21/09/1969	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	22 al 30/09/1896	Tormenta tropical (TS)	Dorothy	17 al 23/08/1970	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	05 al 20/09/1898	Huracán grado 2 (H2)	Carmen	29/08 a 10/09/1974	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	29/08 al 08/09/1899	Huracán grado 1 (H1)	David	25/08 a 08/09/1979	Huracán grado 5 (H5)
Sin nombre	04 al 13/07/1901	Tormenta tropical (TS)	Gert	07 al 15/09/1981	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 16/08/1903	Huracán grado 3 (H3)	Dennis	07 al 22/08/1981	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	21/09 al 07/10/1908	Huracán grado 1 (H1)	Gilbert	08 al 20/09/1988	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 09/03/1908	Huracán grado 1 (H1)	Cindy	14 al 17/08/1993	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	23 al 29/08/1910	Tormenta tropical (TS)	Debby	09 al 11/09/1994	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	05 al 23/08/1915	Huracán grado 2 (H2)	Hortense	03 al 16/09/1996	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	10 al 22/07/1916	Tormenta tropical (TS)	Helene	15 al 25/09/2000	Depresión tropical (TD)
Sin nombre	27/08 al 02/09/1916	Huracán grado 1 (H1)	Jeanne	13 al 29/09/2004	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	06 al 15/10/1916	Huracán grado 1 (H1)	Dean	13 al 23/08/2007	Huracán grado 3 (H3)
Sin nombre	20 al 30/09/1917	Tormenta tropical (TS)	Erika	01 al 04/09/2009	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	09 al 14/09/1918	Tormenta tropical (TS)	Emily	02 al 07/08/2011	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	02 al 16/09/1919	Depresión tropical (TD)	Isaac	20/08 a 01/09/2012	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	16 al 28/08/1924	Depresión tropical (TD)	Rafael	12 al 26/10/2012	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	22/07 al 02/08/1926	Huracán grado 1 (H1)	Chantal	07 al 10/07/2013	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	29/08 al 17/09/1930	Huracán grado 2 (H2)	Bertha	29/07 a 09/08/2014	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	10 al 19/08/1931	Tormenta tropical (TS)	Erika	24 a 28/08/2015	Tormenta tropical (TS)
Sin nombre	30/10 al 14/11/1932	Tormenta tropical (TS)	Maria	16 al 26/09/2017	Huracán grado 5 (H5)

Tabla V: Sobre-elevaciones Totales Asociadas a Cada Fenómeno Meteorológico que han Pasado a Menos de 65 Millas Náuticas de Isla de Aves. Lapsos: 1851-2017

Nombre del Fenómeno	Fecha de ocurrencia (día/mes/año)	Intensidad a su paso por Isla de Aves	Sobre-elevación por acción del viento y la presión (m)	Sobre-elevación debida al oleaje (m)	Sobre-elevación total por acción del viento presión y oleaje (m)	Posición más cercana con respecto a Isla de Aves
Sin nombre	24/08 a 27/08/1855	Tormenta tropical (TS)	0.76	0.99	1.75	88 km al sur
Sin nombre	24 al 30/09/1857	Tormenta tropical (TS)	0.79	1.19	1.97	38 km al norte
Sin nombre	26/08 al 01/09/1864	Huracán grado 1 (H1)	1.01	1.09	2.10	73 km al sur
Sin nombre	06 al 14/09/1865	Huracán grado 2 (H2)	1.44	1.14	2.58	85 km al noreste
Sin nombre	13 al 18/08/1866	Huracán grado 2 (H2)	1.46	1.23	2.69	105 km al sur
Sin nombre	26/09 al 10/10/1873	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.94	1.69	72 km al sur
Sin nombre	09 al 16/10/1879	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.11	1.92	88 km al sur
Sin nombre	04 al 14/08/1880	Tormenta tropical (TS)	0.83	1.10	1.93	35 km al noreste
Sin nombre	04 al 13/09/1883	Huracán grado 3 (H3)	3.43	1.26	4.69	8 km al sur
Sin nombre	12 al 26/09/1889	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.81	1.53	28 km al sur
Sin nombre	18 al 25/08/1891	Huracán grado 3 (H3)	1.88	1.22	3.10	13 km al noreste
Sin nombre	12 al 20/10/1891	Tormenta tropical (TS)	0.73	0.84	1.57	28 km al noreste
Sin nombre	18/09 al 01/10/1894	Huracán grado 3 (H3)	3.38	1.29	4.67	5 km al sur
Sin nombre	11 al 20/10/1894	Huracán grado 2 (H2)	1.37	1.06	2.43	35 km al noreste
Sin nombre	22 al 30/08/1895	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.13	1.90	120 km al suroeste
Sin nombre	30/08 al 11/09/1896	Huracán grado 2 (H2)	1.37	1.07	2.44	25 km al noreste
Sin nombre	22 al 30/09/1896	Tormenta tropical (TS)	0.75	1.05	1.79	115 km al norte
Sin nombre	05 al 20/09/1898	Huracán grado 2 (H2)	1.44	1.14	2.58	77 km al noreste
Sin nombre	29/08 al 08/09/1899	Huracán grado 1 (H1)	0.96	1.14	2.10	107 km al norte
Sin nombre	04 al 13/07/1901	Tormenta tropical (TS)	1.39	1.09	2.48	7 km al norte
Sin nombre	06 al 16/08/1903	Huracán grado 3 (H3)	1.89	1.32	3.21	100 km al sur
Sin nombre	21/09 al 07/10/1908	Huracán grado 1 (H1)	0.89	0.99	1.88	75 km al norte
Sin nombre	06 al 09/03/1908	Huracán grado 1 (H1)	0.87	0.61	1.48	20 km al este
Sin nombre	23 al 29/08/1910	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.10	1.90	18 km al sur
Sin nombre	05 al 23/08/1915	Huracán grado 2 (H2)	1.50	1.19	2.68	20 km al noreste
Sin nombre	10 al 22/07/1916	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.78	1.50	45 km al noreste
Sin nombre	27/08 al 02/09/1916	Huracán grado 1 (H1)	1.29	1.28	2.57	30 km al sur
Sin nombre	06 al 15/10/1916	Huracán grado 1 (H1)	1.38	0.87	2.25	5 km al noreste
Sin nombre	20 al 30/09/1917	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.03	1.80	43 km al sur
Sin nombre	09 al 14/09/1918	Tormenta tropical (TS)	0.74	0.92	1.67	15 km al sur
Sin nombre	02 al 16/09/1919	Depresión tropical (TD)	0.69	0.90	1.59	85 km al norte
Sin nombre	16 al 28/08/1924	Depresión tropical (TD)	0.72	0.89	1.61	32 km al noreste
Sin nombre	22/07 al 02/08/1926	Huracán grado 1 (H1)	1.12	1.27	2.38	30 km al norte
Sin nombre	29/08 al 17/09/1930	Huracán grado 2 (H2)	1.40	1.09	2.49	72 km al noreste
Sin nombre	10 al 19/08/1931	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.24	2.05	83 km al suroeste
Sin nombre	30/10 al 14/11/1932	Tormenta tropical (TS)	0.79	1.05	1.84	109 km al sur
Sin nombre	14 al 27/07/1933	Depresión tropical (TD)	0.75	1.18	1.93	50 km al norte
Sin nombre	20 al 23/08/1934	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.90	1.62	97 km al suroeste
Sin nombre	24 al 27/07/1944	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.10	1.90	111 km al sur
Sin nombre	02 al 04/08/1945	Tormenta tropical (TS)	0.78	0.98	1.76	56 km al noreste
Sin nombre	20 a 22/09/1949	Tormenta tropical (TS)	0.77	1.03	1.80	10 km al sur
Sin nombre	30/08 a 03/09/1949	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.89	1.61	94 km al suroeste
Charlie	12 al 23/08/1951	Huracán grado 1 (H1)	1.12	1.25	2.36	12 km al sur
Betsy	09 al 21/08/1956	Huracán grado 1 (H1)	1.08	1.21	2.29	103 km al norte
Ella	30/08 a 07/09/1958	Tormenta tropical (TS)	0.72	0.97	1.69	35 km al norte
Edith	18 a 19/08/1959	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.85	1.59	143 km al noreste
Frances	30/09 a 10/10/1961	Tormenta tropical (TS)	0.69	0.85	1.54	42 km al norte
Edith	23 a 29/09/1963	Huracán grado 2 (H2)	0.98	1.03	2.01	84 km al suroeste
Cleo	20/08 a 05/09/1964	Huracán grado 4 (H4)	1.88	1.42	3.30	63 km al norte
Inez	21/09 a 11/10/1966	Huracán grado 4 (H4)	2.07	1.18	3.25	80 km al noreste
Beulah	05 al 22/09/1967	Huracán grado 2 (H2)	1.28	1.18	2.47	73 km al suroeste
Holly	14 a 21/09/1969	Depresión tropical (TD)	0.72	0.93	1.65	32 km al sureste
Dorothy	17 al 23/08/1970	Tormenta tropical (TS)	0.81	1.02	1.83	95 km al sur
Carmen	29/08 a 10/09/1974	Depresión tropical (TD)	0.81	1.11	1.93	85 km al noreste
David	25/08 a 08/09/1979	Huracán grado 5 (H5)	2.50	1.40	3.90	23 km al norte
Gert	07 al 15/09/1981	Tormenta tropical (TS)	0.90	1.24	2.14	58 km al norte
Dennis	07 al 22/08/1981	Depresión tropical (TD)	0.75	1.15	1.90	58 km al sur
Gilbert	08 al 20/09/1988	Tormenta tropical (TS)	0.98	1.08	2.06	55 km al sur
Cindy	14 al 17/08/1993	Tormenta tropical (TS)	0.70	1.07	1.77	51 km al sur
Debby	09 al 11/09/1994	Tormenta tropical (TS)	0.80	1.22	2.03	101 km al suroeste
Hortense	03 al 16/09/1996	Tormenta tropical (TS)	0.94	1.11	2.04	71 km al norte
Helene	15 al 25/09/2000	Depresión tropical (TD)	0.78	1.24	2.03	82 km al norte
Jeanne	13 al 29/09/2004	Tormenta tropical (TS)	0.85	0.89	1.74	116 km al noreste
Dean	13 al 23/08/2007	Huracán grado 3 (H3)	1.69	1.37	3.05	94.5 km al suroeste
Erika	01 al 04/09/2009	Tormenta tropical (TS)	0.72	1.00	1.72	130 km al norte
Emily	02 al 07/08/2011	Tormenta tropical (TS)	0.78	0.96	1.74	17 km al sur
Isaac	20/08 a 01/09/2012	Tormenta tropical (TS)	0.82	0.95	1.77	23 km al sureste
Rafael	12 al 26/10/2012	Tormenta tropical (TS)	0.75	0.86	1.62	7 km al sur
Chantal	07 al 10/07/2013	Tormenta tropical (TS)	0.74	0.81	1.55	45 km al sur
Bertha	29/07 a 09/08/2014	Tormenta tropical (TS)	1.44	1.00	2.44	5 km al noreste
Erika	24 a 28/08/2015	Tormenta tropical (TS)	0.76	0.98	1.74	88 km al norte
Maria	16 al 30/09/2017	Huracán grado 5 (H5)	2.66	1.12	3.78	89 km al noreste

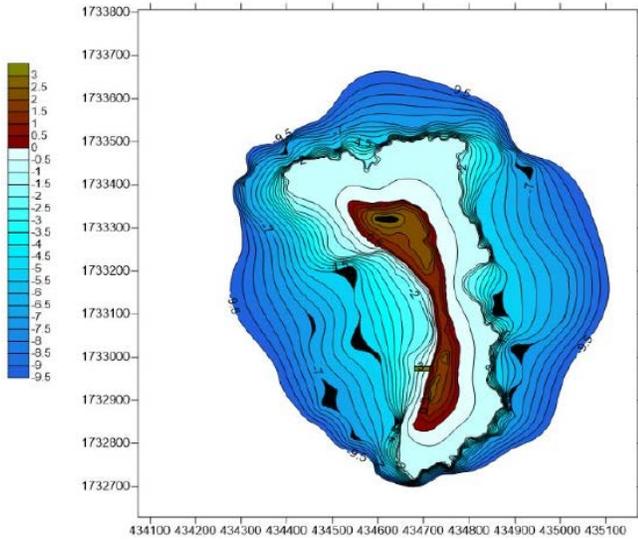


Figura 10: Vista en Planta de la Isla y Áreas Circundantes

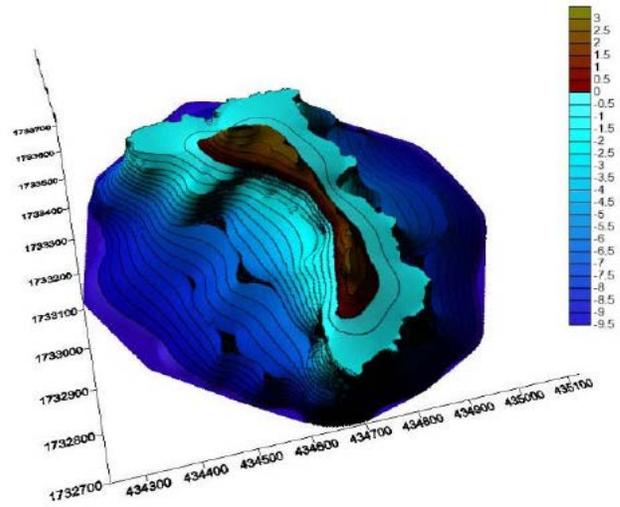


Figura 11: Vista Tridimensional de la Isla y Áreas Circundantes

Tabla VI: Sobre-elevación Total del Nivel del Mar en Isla de Aves Asociada a la Intensidad de los Fenómenos Meteorológicos sin Tomar en Cuenta la Variación de la Marea

Estadísticas de la sobre-elevación total para cada tipo de fenómeno	Número de fenómenos	Promedio (m)	Maximo (m)	Minimo (m)	Distancia a la que pasó el evento que generó mayor sobre-elevación
Depresión tropical	7	1.85	2.03	1.59	82 km al norte.
Tormenta tropical	38	1.86	2.48	1.50	7 km al norte.
Huracan grado 1	9	2.26	2.57	1.48	30 km al sur.
Huracan grado 2	9	2.52	2.69	2.01	105 km al sur.
Huracan grado 3	5	3.74	4.69	3.05	8 km al sur.
Huracan grado 4	2	3.28	3.30	3.25	63 km al norte.
Huracan grado 5	2	3.84	3.90	3.78	23 km al norte.

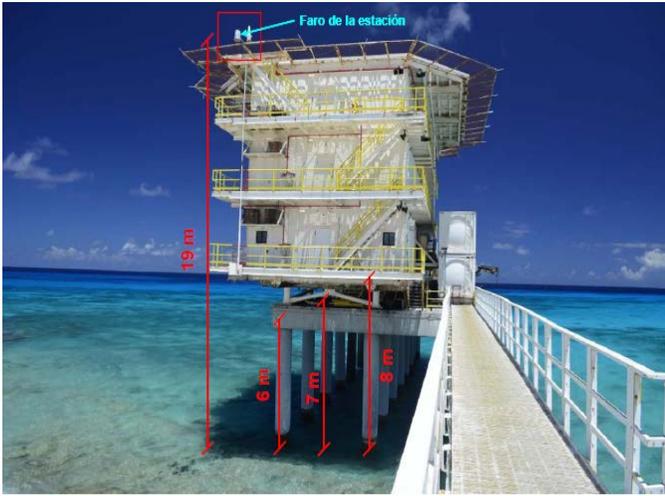


Figura 12: Panorama de la Base Científica Naval Instalada en Isla de Aves

De igual forma, a cada uno de los fenómenos presentados en la Tabla VI se le calculó la tasa de excedencia, función de peligro y período de retorno asociado de acuerdo con la metodología descrita en [2], lo cual permitió vincular las sobre-elevaciones calculadas para cada intensidad del fenómeno con períodos de retorno y tasas de excedencia anualizadas (ver Tabla VII).

Tabla VII: Tasa de Excedencia, Función de Peligro y Período de Retorno Asociados al Paso de Ciclones en Áreas Cercanas a Isla de Aves

Intensidad (i)	Categoría	M _i (Eventos de intensidad i)	Tasa de excedencia v(i)	Tasa de excedencia anualizada	Peligro P(i)	Período de retorno (T _r) (años)
1	DT	7	72	0.431	0.097	2.32
2	TT	38	65	0.389	0.528	2.57
3	H1	9	27	0.162	0.125	6.19
4	H2	9	18	0.108	0.125	9.28
5	H3	5	9	0.054	0.069	18.56
6	H4	2	4	0.024	0.028	41.75
7	H5	2	2	0.012	0.028	83.50
Total		72				

En la Figura 13 a la Figura 15 se presentan, en concordancia con las sobre-elevaciones calculadas con la metodología descrita, las condiciones en que queda Isla de Aves luego de ser afectada por los fenómenos meteorológicos de diferentes intensidades mostrados en la Tabla VI y en la Tabla VII.

VIII. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de la información contenida en la Tabla IV a la Tabla VII se pueden hacer las siguientes acotaciones:

- Tomando en cuenta que entre 1851 y Septiembre 30 de 2017 la base de datos de la NOAA ha documentado 1811 fenómenos meteorológicos (desde depresiones tropicales hasta huracanes grado 5) en la cuenca Atlántica, la probabilidad de que cualquier tipo de fenómeno afecte a la isla (entendiendo por afectación que el fenómeno pase a menos de 65 millas náuticas de distancia de la isla), es de $3,98\% \approx 4,0\%$.
- El 62,5% del total de fenómenos meteorológicos que pasaron a menos de 65 millas náuticas de Isla de Aves, tuvieron una intensidad igual o menor al de una tormenta tropical, generando en promedio una sobre-elevación total de la superficie libre, por encima del nivel medio del mar, del orden de 1,85 m con un máximo puntual de 2,50 m.
- Las simulaciones hechas permitieron determinar que únicamente ante la influencia de huracanes con intensidad de grado 3 o superior, la isla quedaría totalmente bajo el agua, y el hecho de que la probabilidad asociada a esta condición es del orden de 0,5% permite afirmar que la estabilidad estructural actual de la morfología de la isla no corre ningún tipo de peligro, dado que la misma tiene una buena capacidad de autorecuperación luego haber sido afectada por los fenómenos estudiados.

En otras palabras, si se asume que en este caso la “amenaza” es el fenómeno conocido como “marea de tormenta” asociada al paso de fenómenos meteorológicos extremos y que la función de peligro es $P(i)$, entendiéndose el peligro como la probabilidad anual de que se presente un evento que exceda la intensidad i sin avanzar al siguiente nivel, las simulaciones mostradas en la Figura 12 a la Figura 14, permiten la caracterización de dicho peligro, teniéndose que la sobre-elevación de 1,75 m corresponde a la caracterización del peligro estudiado para un período de retorno asociado del orden de 3 años, la sobre-elevación de 2,25 m corresponde aproximadamente a la caracterización del peligro asociado a un período de retorno de 6 años, mientras que la sobre-elevación de 2,75 m corresponde aproximadamente a la caracterización del peligro asociado a un período de retorno del orden de 12 años.

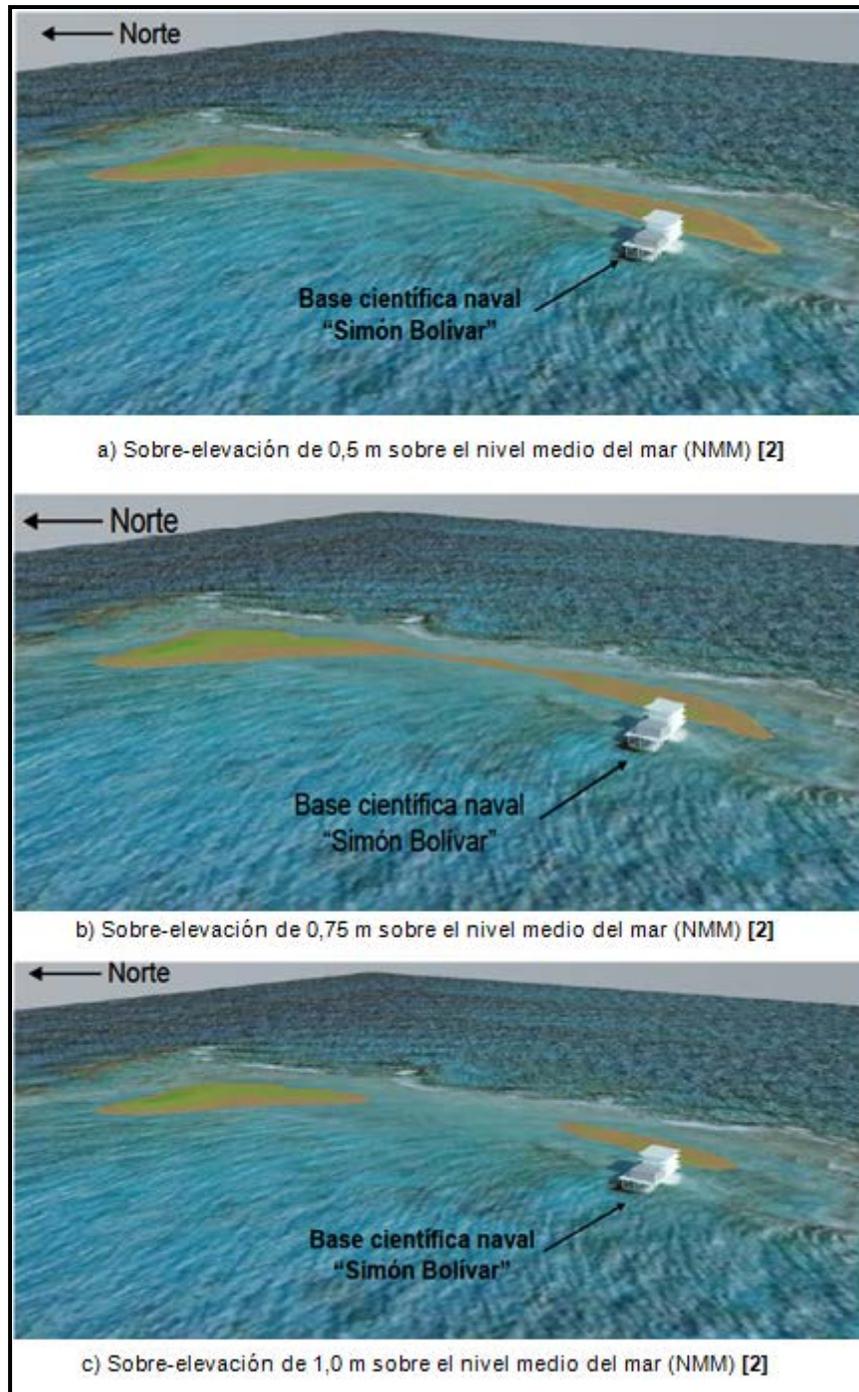


Figura 13: Relieve de Isla de Aves que Permanece Emergido luego de ser Afectado por Eventos que Generan una Sobre-elevación del Nivel Medio del Mar de: a) 0,5 m, b) 0,75 m, c) 1,0 m

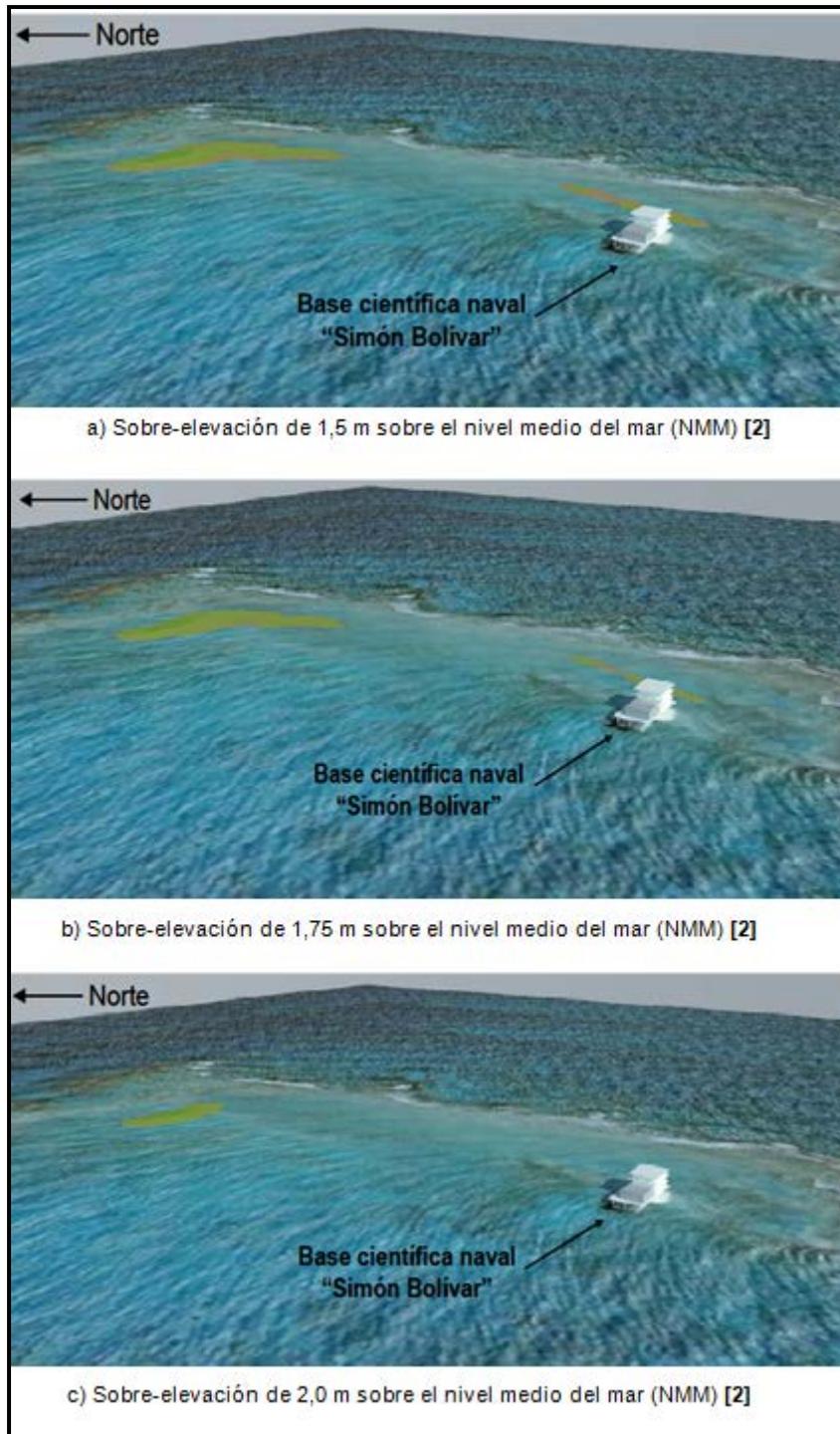


Figura 14: Relieve de Isla de Aves que Permanece Emergido luego de ser Afectado por Eventos que Generan una Sobre-elevación del Nivel Medio del Mar de: a) 1,5 m, b) 1,75 m, c) 2,0 m

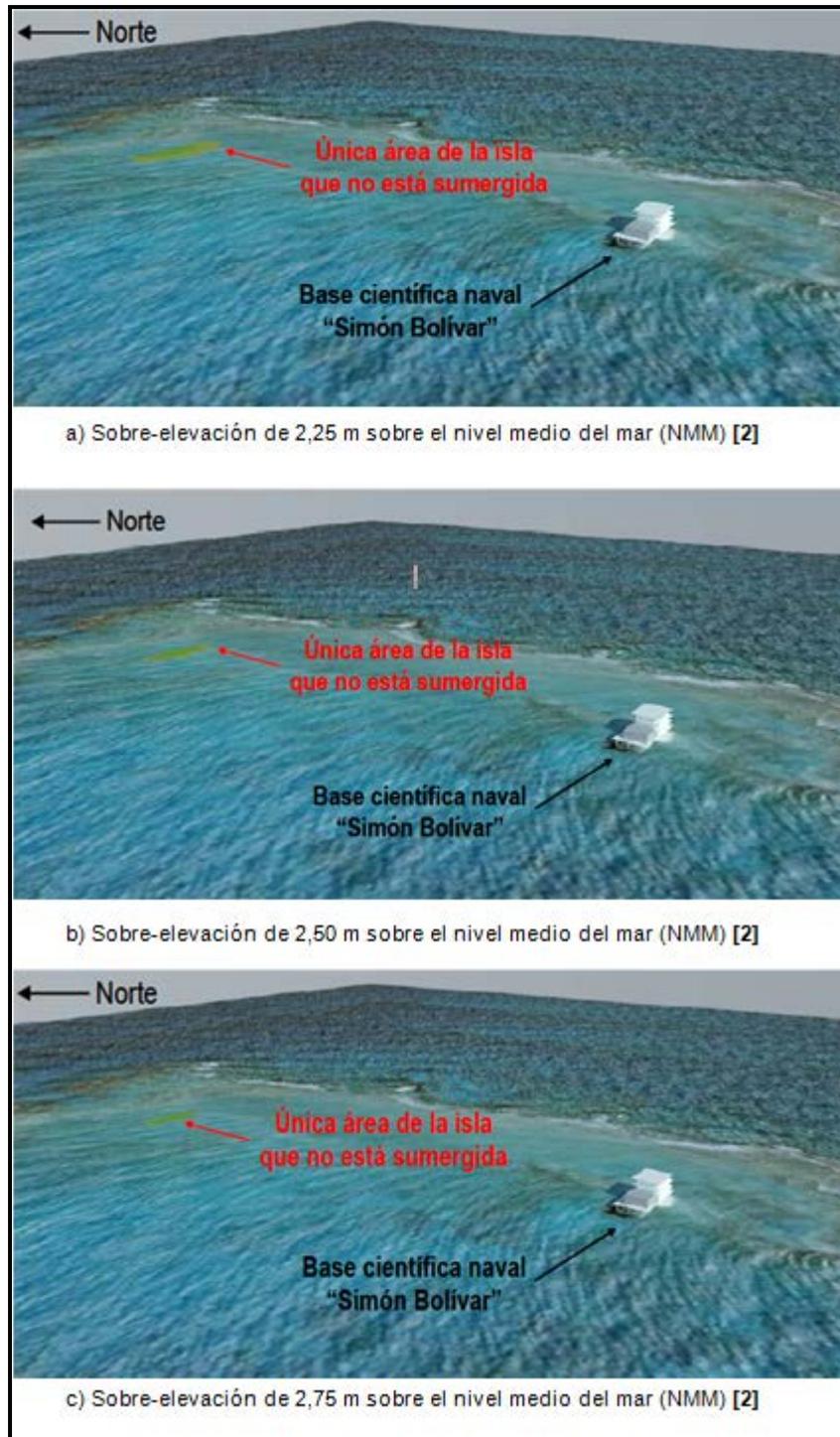


Figura 15: Relieve de Isla de Aves que Permanece Emergido luego de ser Afectado por Eventos que Generan una Sobre-elevación del Nivel Medio del Mar de: a) 2,25 m, b) 2,50 m, c) 2,75 m

- La sobre-elevación asociada al paso de “huracanes mayores”, es decir, huracanes grado 3, 4 o 5 en la escala de Saffir-Simpson, generaron a su paso sobre-elevaciones promedio superiores a 3,3 m con un máximo puntual de 4,70 m.
- El análisis de los datos, también mostró que la probabilidad de afectación de la isla por efectos de estos fenómenos es independiente de si el año en que ocurrieron puede ser caracterizado como año “El Niño” o “La Niña”. El análisis de los fenómenos ocurridos desde 1951 hasta el presente evidenció que en años “El Niño” la isla fue afectada por 8 fenómenos, en años “La Niña” fue afectada por 10 fenómenos, mientras que en años “neutros” fue afectada por 12 eventos [2].

IX. CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados en el presente trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- La probabilidad de que un fenómeno meteorológico (desde depresiones tropicales hasta huracanes grado 5) en la cuenca Atlántica afecte a Isla de Aves (entendiendo por afectación que el fenómeno pase a menos de 65 millas náuticas de distancia de la isla), ha sido históricamente inferior a 4% hasta los momentos, existiendo la posibilidad de que se incremente debido al progresivo calentamiento de las aguas de los océanos que se ha observado en las últimas décadas.
- En el caso específicamente estudiado de Isla de Aves, se aplicó y validó una metodología asociada al cálculo de la sobre-elevación puntual del mar en áreas costeras, por efectos del paso de un fenómeno meteorológico determinado, a la vez que se evaluó la respuesta de esta estratégica isla ante el paso de los fenómenos meteorológicos estudiados. Se pudieron estimar entre otros aspectos que la incidencia de huracanes de grado 2 sobre la isla, tienen un período de retorno del orden de 10 años y sobre-elevaciones promedio del nivel del mar del orden de 2,5 m, los cuales prácticamente dejan a la isla totalmente sumergida.
- La estabilidad estructural de la isla no parece estar en peligro, tal como lo demuestra el hecho de que si bien cada 10 años en promedio, la isla ha quedado casi en más de un 90% sumergida, luego de la afectación por estos fenómenos donde entre otros aspectos se “lava” buena parte de la cubierta arenosa de la isla, el continuo accionar del oleaje y del viento en conjunción con la función protectora y potenciadora de retención de arena que tiene el arrecife frangeante que bordea a buena parte

del perímetro de la isla, permiten que el material lavado sea restituido con nuevos aportes de arena.

- La metodología aplicada expresamente a Isla de Aves, puede ser igualmente aplicada a cualquier área costera continental de la República Bolivariana de Venezuela, y a partir de los resultados obtenidos, pueden fácilmente generarse “mapas de peligro” y estimaciones de riesgos ante la amenaza estudiada.

X. RECOMENDACIONES

Aunque históricamente hablando el litoral costero de la República Bolivariana de Venezuela no ha sido afectado recurrentemente por fenómenos meteorológicos extremos (donde se incluyen desde depresiones tropicales hasta huracanes), en [24] se encontró que si bien el número y porcentaje de eventos meteorológicos que han pasado “cerca” o han “tocado” territorio venezolano entre los años 1851 y 2016 son históricamente bajos: 44 y 2,9% respectivamente, a partir de 1966 ha habido un incremento nada despreciable, habiéndose pasado de un porcentaje menor a 2% antes de 1965, a casi 5% a partir de 1966, lo cual puede tener otras implicaciones como por ejemplo, el incremento en intensidad y frecuencia de eventos hidrológicos asociados al cambio en las características de los regímenes pluviométricos locales.

Si a esta condición se le añade el hecho de que las nuevas exploraciones de gas y petróleo que se están desarrollando en Venezuela se encuentran cada vez con mayor frecuencia, no en áreas terrestres sino en el mar, se tiene un escenario en el cual el conocimiento de las condiciones oceanográficas y meteorológicas en las zonas de interés, tiene cada vez mayor relevancia debido a los riesgos y peligros asociados a estas “amenazas” y su influencia sobre los proyectos gasíferos o petroleros que se desarrollen.

El mayor conocimiento de estas variables y su influencia se traduce en menores incertidumbres, lo que a su vez redundará en reducciones en los costos estimados por las empresas que participen en estos proyectos operativos, dado el mayor conocimiento y caracterización estadística de los “peligros y amenazas” a los que pueden enfrentarse durante las fases de estudio, construcción y operación de las estructuras involucradas (plataformas “offshore”, tuberías submarinas, etc).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Nieves-Croes, A y Francisco Javier: “Límites marítimos venezolanos en el mar Caribe y el Océano Atlántico” MPPD, ARBV, Mapoteca digital CJA, Caracas, 2010.

[2] Bécemberg, R: “Vulnerabilidad oceanográfica de las costas venezolanas a las mareas de tormenta y sobre-elevación del mar debido a la acción de los huracanes”. Trabajo de ascenso presentado ante la Universidad Católica Andrés Bello, UCAB para ascender al grado de profesor asociado, 2017.

- [3] Foreman M.G.G: "*Manual for tidal heights analysis and prediction*". Pacific Marine science report 77-10, 1977. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C.
- [4] Conner, W.C, Kraft, R.H, and Harris, D.L: "*Empirical methods for forecasting the maximum storm tide due hurricanes and other tropical storms*". Monthly Weather Review, Vol. 85. N° 4, Abril 1957, pp. 113-116.
- [5] Harris, L.D: "*An interim hurricane storm surge forecasting guide*". National Hurricane Research Project 32, U.S Weather Bureau, Washington D.C, 1959, 23 pp.
- [6] Harris, L.D: "*Characteristics of the hurricane storm surge*". Technical Paper N° 48. U.S Dept. of Commerce, Weather Bureau Review 109, 1963, pp. 813-829.
- [7] Jelesnianski, C.P.: "*SPLASH (Special Program to list Amplitudes of Surges From Hurricanes)*". I. Landfall Storms" 1972. U.S Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NWS TDL-46. Washington D.C , 52 pp.
- [8] Hsu, S.A, Braud, D and Blanchard B.: "*Rapid estimation of maximum storm surges induced by hurricanes Katrina and Rita in 2005*". NWA, Electronic Journal of Operational Meteorology EJ9. 2006.
- [9] Jelesnianski, C. P., J. Chen, and W. A. Shaffer, "*SLOSH: Sea, lake and overland surges from hurricanes*", NOAA Technical Report NWS 48, National Oceanic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce, 71 pp, 1992.
- [10] Luettich, R.A., Jr., S. Hu, J.J. Westerink, and N.W. Scheffner: "*Modeling 3-D Circulation Using Computations for the Western North Atlantic and Gulf of Mexico*", Estuarine and Coastal Modelling II, M. Spaulding [ed.], ASCE, pp.632-643, 1992.
- [11] Haidvogel, D.B., and Beckmann, A., (1999): "*Numerical Ocean Circulation Modeling*". World Scientific Publishing Company, 300 pp, 1999.
- [12] Pain, C.C. et al, C.R.E: "*Three-dimensional unstructured mesh ocean modelling*". Ocean modelling 10, 5-33, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.07.005, 2005.
- [13] Pugh, D.T: "*Tides surges and mean sea level. A handbook for engineers and scientists*", Wiley, 1987, Chichester, 472 pp.
- [14] Dean R.G, and Dalrymple R.A: "*Water wave mechanics for engineers and scientists*". Prentice-Hall, Inc., Englewood Clifts, New Jersey 07632, 157 pp, 1991.
- [15] Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres): "*Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*". Fenómenos hidrometeorológicos. Capítulo II, 2006.
- [16] Longuett-Higgins, M.S., y Steward, R.W: "*A note on Set-up*". Journal of Marine Research, 1963, vol. 21, 4-10.
- [17] Weggel, J.R. (1972): "*Maximum Breaker Height*". Proceeding of ASCE-Journal of the Waterways. Harbors and Coastal Engineering Division, vol. 98-ww4, 1972.
- [18] Dirección de Geografía y Cartografía de las Fuerzas Armadas (DIGECAFA) y la Oficina Coordinadora de Hidrografía y Navegación (OCHINA). "*Isla de Aves Bastión Venezolano en el mar Caribe*". Caracas, 2002. Pág. 3.
- [19] Lazo, Rodrigo: "*Historia cartográfica de isla de Aves*". Revista Tiempo y Espacio del Centro de Investigaciones Históricas Mario Briceno Iragorry. N° 64, Vol. XXXIII, pág. 582-601, 2014.
- [20] Hopley, David: "Encyclopedia of Modern Coral Reefs: Structure, Form and Process". Springer. Holanda, 2011, p. 237.
- [21] Mendez, Baamonde, José: "*Isla de Aves: Equilibrio entre la subsidencia, aumento del nivel del mar, acreción y programación*". Trabajo de Ascenso. UCV. Caracas. Pág. 44, 2006.
- [22] Incostas S.C: "*Proyecto de obras marítimas de refuerzo, destinados a la conservación, defensa y mejoras del ambiente, isla de Aves*", para la División General de Infraestructura del Ministerio del Ambiente, 1997.
- [23] <http://www.isladeaves.org.ve>.
- [24] Bécemberg, R: "*El Niño oscilación sur (ENOS) y su relación con los huracanes en el Atlántico y con la conformación de éstos como potenciales amenazas para las costas venezolanas*". Trabajo de ascenso presentado ante la Universidad Católica Andrés Bello, UCAB para ascender al grado de profesor agregado, 2013.