

DETERMINACIÓN DE LOS INCREMENTOS DEL NIVEL DEL MAR EN GUANABO POR CAUSAS METEOROLÓGICAS

Reinaldo Casals Taylor, Pedro J. Pérez Osorio, Osvaldo E. Pérez López, Rafael Pérez Parrado.

Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca y Carretera del Asilo s/n Apdo. 11032, Regla, La Habana, Cuba.
e-mail: reinaldo.casals@insmet.cu , pedro.jorge@insmet.cu , osvaldo.perez@insmet.cu, rafael.perez@insmet.cu,
Telf: 7868-6452

Resumen. En este trabajo se presentan resultados de la sobreelevación total del nivel del mar en la localidad de Guanabo, al este de La Habana y limítrofe con la provincia de Mayabeque. Se cuenta con información inicial de oleajes y vientos máximos, que se emplean para obtener los valores de wave setup, mediante modelación con SWAN 41.20. Otras componentes tenidas en cuenta fueron los valores de la surgencia por ciclones tropicales fueron resultados de corridas del modelo hidrodinámico MONSAC3.1, la pleamar máxima posible de la estación mareográfica de Siboney, La Habana, y el resultado del cálculo del wave runup. Estas componentes del ascenso del nivel del mar por causas meteorológicas son empleadas para conformar diversas curvas hidráulicas, que en un próximo estudio serán utilizadas para modelar inundaciones. Se ha experimentado con tres condiciones de oleaje extremo provenientes de las direcciones Noroeste, Norte y Nordeste para analizar la sensibilidad de esta región a diferentes magnitudes de incrementos del nivel del mar. Los resultados de los cálculos son válidos para establecer medidas de mitigación por la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos.

Palabras clave: Nivel del mar, modelación, wave setup, wave runup, inundación costera

Abstract. In this paper are presented results about maximal sea level super elevation on Guanabo locality, eastward from Havana and bordering Mayabeque province. Initial information for waves and maximum winds is available, which is used to obtain wave setup values by means of SWAN 41.20 wave model; storm surge values are run outputs from hydrodynamic model MONSAC3.1, maximum possible high tide of Siboney tidal gauge, in Havana, is taken into account, and wave runup is calculated. These sea level rise components are used to build several hydraulic curves, which will be introduced as input data on flood models. Three extreme wave conditions from the Northwest, North and Northeast directions are tested to analyze the sensitivity of this region to different magnitudes of sea level increases. The calculation results are valid for taking mitigation measures due to the occurrence of extreme weather events.

Keywords: Sea level, modeling, wave setup, wave runup, coastal flood

INTRODUCCIÓN.

Una inundación es una acumulación progresiva del agua sobre una zona deprimida. En el caso de las zonas costeras, eventos de oleajes fuertes o vientos intensos, en dependencia de la morfología y tipo de costa pueden hacer que el agua de mar rebase el límite normal e ingrese a tierras emergidas.

Este tipo de fenómeno ha afectado instalaciones productivas, recreativas, núcleos poblacionales y áreas de conservación de la biodiversidad. En determinados momentos ha sido necesario ejecutar estudios sobre la posibilidad de que un área costera resulte inundada por el avance del mar, los cuales involucran el análisis de condiciones extremas de vientos, olas y comportamiento de ciclones tropicales, que permitan definir los límites seguros de ubicación y protección de nuevos objetos.

Es conocido que las causas de origen meteorológico capaces de generar eventos de inundación en la zona de Guanabo son los flujos de vientos fuertes y persistentes que siguen a los frentes fríos, y los ciclones tropicales con intensidad de huracán (vientos superiores a 33 m/s).

Se ha considerado que vientos superiores a 15 metros por segundo, influyendo sobre la zona costera durante más de 12 horas son capaces de provocar un incremento del nivel del mar por efecto de la ruptura del oleaje. En la zona de ubicación de playa Guanabo es frecuente la afectación por frentes fríos con esta intensidad de vientos de direcciones Noroeste y Norte, consideradas las más peligrosas en el período noviembre – abril o etapa invernal.

Los vientos pueden ser superiores durante el paso de ciclones tropicales cerca de la zona, con diferentes trayectorias, siendo los casos más peligrosos los que llevan trayectorias de Este a Oeste sobre el Estrecho de La Florida y los de trayectorias de recurvas sobre la región occidental de Cuba. La afectación por ciclones tropicales es la situación más compleja que ha enfrentado la zona, pues se suman las influencias de la ruptura de oleaje, la surgencia del ciclón tropical y la marea astronómica.

La surgencia asociada a los ciclones tropicales combina el efecto del arrastre de los fuertes vientos en superficie y el descenso brusco de la presión atmosférica.

La marea astronómica está presente en régimen periódico, y presenta variaciones mensuales que se manejan como anomalías de las oscilaciones. Las oscilaciones de mareas que ocurren en esta región son del tipo semidiurno, o sea, que en 24 horas se alternan dos pleamares y dos bajamares, ocurriendo en cada caso un valor absoluto y un valor relativo.

Las variaciones mensuales de la marcha anual del nivel medio del mar muestran una oscilación que alcanza sus valores máximos en los meses de septiembre y octubre, y los mínimos en enero y febrero.

En condiciones reales de la afectación de un evento de incremento extremo del nivel del mar, las causas meteorológicas y astronómicas pueden coincidir en tiempo, por lo que el objetivo del estudio es modelar las afectaciones máximas de ascensos del nivel del mar de diferentes magnitudes, teniendo en cuenta la combinación de todas las componentes, así como modelar los alcances en terreno firme.

ANTECEDENTES

Varios estudios han sido realizados con este objetivo. En 2010 el Centro de Meteorología Marina (CMM) presentó un Informe Técnico sobre los incrementos del nivel del mar por causas meteorológicas para el emplazamiento de la planta termoeléctrica de Santa Cruz del Norte, en el cual se planteó que no existía peligro de inundación en el área, sin embargo, no era posible evaluar los efectos de la sobreelevación del nivel del mar en la obra hidráulica asociada para enfriamiento, al no conocerse de mediciones previas.

En el mismo año fue presentado un estudio de incrementos del nivel del mar por causas meteorológicas e inundaciones costeras para apoyar el proyecto de construcción de un hotel en Cayo Largo del Sur.

En 2016 se acometió por el CMM un estudio de las transformaciones del oleaje en la parte exterior del muro del Malecón habanero, aledaño al Monte de las Banderas y la Oficina de Intereses de Estados Unidos, para valorar las características del emplazamiento de un difusor submarino en forma de punta de flecha.

Pérez et al (2018) ejecutaron un estudio de inundaciones costeras por penetración del mar en la zona de emplazamiento de aerogeneradores Herradura 2, provincia Las Tunas, a partir de valores de surgencias generadas por ciclones tropicales de las categorías 2 y 3 de la escala de Saffir – Simpson considerando

valores de incremento permanente del nivel medio del mar por cambios climáticos, con el propósito de definir qué equipos serían afectados por un anegamiento permanente a largo plazo y decidir su posible reubicación.

También en 2018 se retomó el emplazamiento de la planta termoeléctrica de Santa Cruz del Norte, ahora Central Termoeléctrica (CTE) Este de La Habana, para realizar un estudio de transformaciones del oleaje en el que se consideró por primera vez la existencia de más de un escalón de ruptura de oleaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplean los resultados del modelo de olas SWAN versión 41.20 (The SWAN Team, 2019a, 2019b), el cual ofrece salidas de la altura de la ola transformada por efectos de la reducción de la profundidad, los cambios de dirección de procedencia del oleaje y la interacción del oleaje con las corrientes generadas luego de la ruptura de la ola.

Se contó con el fichero de texto en formato de columnas, con las coordenadas longitud, latitud y profundidad (X,Y,Z) de cada punto del área de estudio, a resolución de 10 metros. El fichero de coordenadas fue cargado en Mapinfo versión 10.5, y la tabla creada fue cargada desde Vertical Mapper versión 3.11 para realizar una interpolación a malla regular de 50 metros.

Se utiliza el ambiente de programación MATLAB para generar la malla de cómputo y convertir las unidades de las coordenadas de los puntos de interés. El programa *batxyz.m* genera la matriz de profundidades con las dimensiones en metros de las coordenadas en longitud, latitud y tamaño de las celdas, mientras que el programa *distancias.m* requiere leer un fichero de texto con las coordenadas de los puntos de interés y el fichero original de las coordenadas en grados, para convertirlas a coordenadas en metros.

Las características de esta matriz y el fichero con la ubicación de los puntos de interés fueron suministradas al modelo de olas, el cual fue corrido 9 veces, pues fueron simulados los procesos de incrementos del nivel del mar para 3 conjuntos de parámetros de oleaje provenientes desde 3 direcciones diferentes.

La operación del modelo SWAN ofreció salidas numéricas y tabuladas. Las salidas numéricas fueron procesadas mediante el programa *olastat.m*, creado también en MATLAB, para graficar los campos de altura de ola significativa y dirección de desplazamiento, y las salidas tabuladas permiten obtener los valores de sobreelevación del nivel del mar por ruptura de oleaje (wave setup) en puntos de cálculo donde las profundidades son alrededor de 1.0 metro, cerca de la línea de costa.

A este resultado se incorpora el valor del wave runup o barrido de la ola, que se define como la elevación máxima que puede alcanzar el nivel del mar desde contribuye a marcar el alcance máximo de la inundación pendiente arriba de la playa (CEM, 2003). La obtención del wave runup parte de calcular el índice de similitud del surf o índice de Iribarren (ξ_0) por la ecuación:

$$\xi_0 = \tan\beta \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (3)$$

donde H_0 y L_0 son las condiciones de altura de ola significativa y la longitud de onda en aguas profundas, y $\tan\beta$ es la pendiente del fondo.

Este parámetro define en qué forma romperá la cresta de la ola cerca de la playa según CEM (2003).

Mase (1989) propuso las siguientes ecuaciones a aplicar para ambientes de playas planas impermeables con pendiente entre 1/5 y 1/30:

$$\frac{R_{max}}{H_0} = 2.32 \xi_0^{0.77} \quad \text{runup máximo} \quad (4)$$

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 1.86 \xi_0^{0.71} \quad \text{runup excedido por el 2\% de las crestas máximas} \quad (5)$$

$$\frac{R_{\frac{1}{10}}}{H_0} = 1.7 \xi_0^{0.71} \quad \text{runup promedio de la décima parte de las olas más altas} \quad (6)$$

$$\frac{R_{\frac{1}{3}}}{H_0} = 1.38 \xi_0^{0.7} \quad \text{runup promedio de la tercera parte de las olas más altas} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{R}}{H_0} = 0.88 \xi_0^{0.69} \quad \text{runup medio} \quad (8)$$

Se propone utilizar las ecuaciones 5 y 7 para obtener el rango más probable de valores de elevación del nivel del mar por influencia del oleaje.

Los elementos de oleaje extremo por períodos de retorno prefijados seleccionados para el trabajo se muestran en la tabla 1, obtenidos de trabajos previos de Pérez Osorio et al. (1994). Para realizar los análisis fueron seleccionados los períodos de retorno de una vez en 5, 20 y 50 años (probabilidades de 0,2, 0,05 y 0,02).

Tabla 1. Condiciones iniciales de oleaje máximo en la costa norte de La Habana.

Probabilidad	H _{sig} (m)	T (s)
0,2	4,7	7,9
0,05	5,9	9,8
0,02	7,0	10,6

donde

W es la velocidad del viento en metros por segundo

H_{sig} es la altura de la ola significativa en metros

T es el período de la ola en segundos

Los valores de vientos máximos empleados en las modelaciones fueron obtenidos de Salas et al. (2006), los cuales corresponden a la afectación por ciclones tropicales desde la intensidad de tormenta tropical (velocidades superiores a 18 m/s). Los datos de la velocidad del viento máximo se ajustan a una distribución estadística de Weibull (ver figura 1).

Tabla 2. Condiciones de velocidad máxima del viento en las fronteras del modelo para la costa norte de La Habana.

Probabilidad	W (m/s)
0,2	27,2
0,05	31,9
0,02	40,3

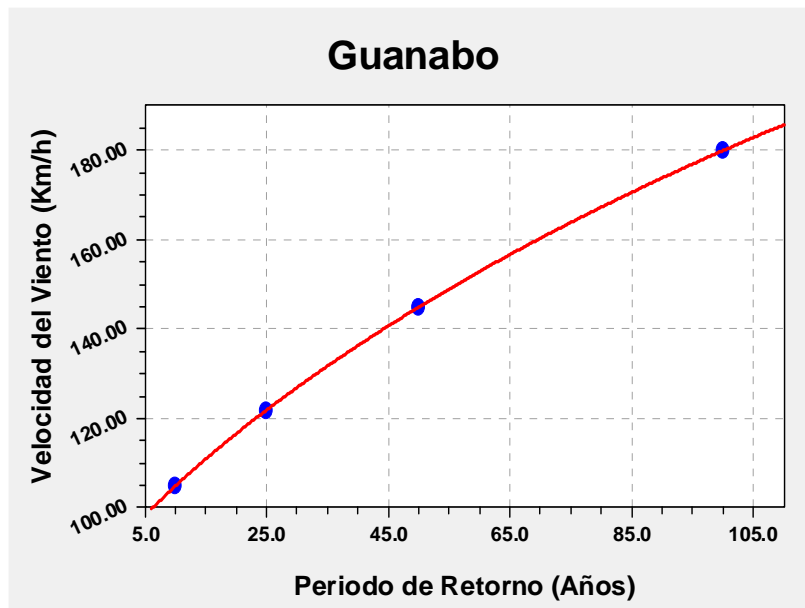


Figura 1. Curva probabilística de la velocidad máxima del viento, según la distribución de Weibull

Se utilizan resultados de surgencias debidas a ciclones tropicales, como caso extremo de la elevación del nivel del mar que refuerza los efectos del wave setup, wave runup y la marea astronómica. Los valores de surgencia fueron obtenidos de la curva probabilística calculada para la localidad de Guanabo (ver figura 2), considerando periodos de retorno de una vez en 5, 20 y 50 años. Esta información aparece en Pérez Parrado et al (2008), y fue resultado de corridas del modelo MONSAC3.1. Se determinó que los datos de surgencia seguían una distribución de Weibull, al igual que los datos de vientos máximos.

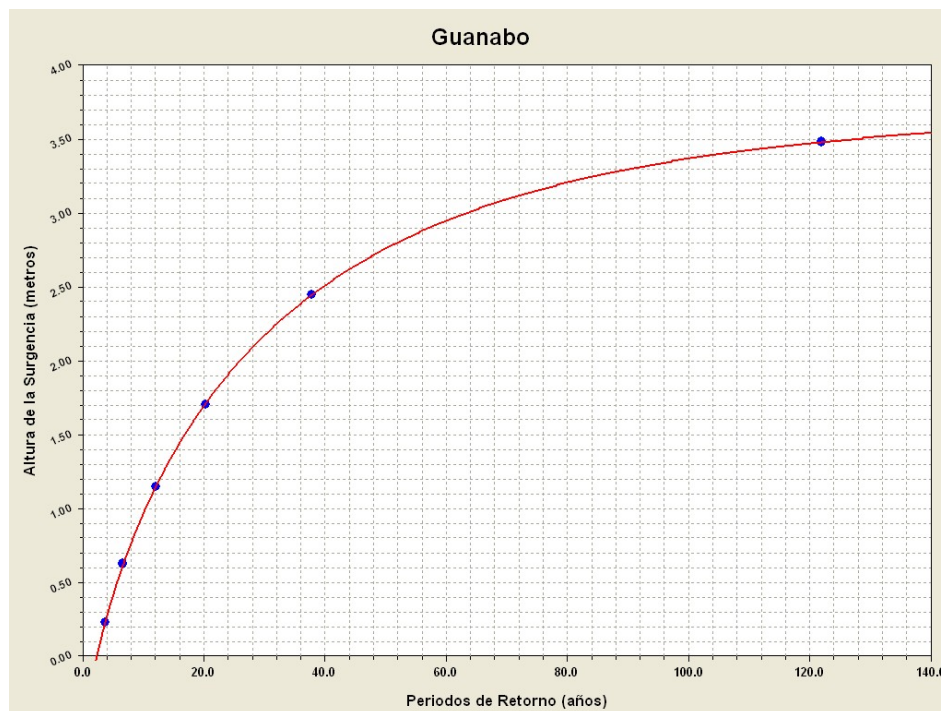


Figura 2. Curva probabilística de los valores de surgencia calculada.

Tabla 2. Valores calculados de la surgencia por ciclones tropicales en Guanabo.

Probabilidad	S _{ct} (m)
0,2	0,62
0,05	1,70
0,02	2,78

MONSAC3.1, desarrollado en el Instituto de Meteorología, es un modelo dinámico que permite calcular el ascenso del nivel del mar al paso de un ciclón tropical. Basado en la solución de las ecuaciones clásicas de la hidrodinámica, se inicializa con un modelo paramétrico de ciclón tropical que utiliza la velocidad máxima del viento, el radio de vientos máximos, la velocidad de traslación y el campo de presión como datos de entrada, y tiene en cuenta las características de los fondos marinos y la zona costera adyacente.

La oscilación periódica del nivel del mar por causas astronómicas será considerada en la variable anomalía del nivel medio del mar, que tiene su valor máximo en octubre, y puede influir en la intensidad del incremento del nivel del mar por causas meteorológicas.

Se aplica el modelo hidrológico LISFLOOD para representar el alcance potencial de la inundación costera, considerando tanto situaciones de oleaje extremo como su combinación con las surgencias por ciclones tropicales.

Batimetría local

El esquema de la figura 3 muestra que el área marina adyacente a la localidad de Guanabo es de bajos fondos, con profundidades que oscilan entre 3 y 7 metros en una franja con amplitud entre 1300 y 2000 metros, lo cual la hace una zona de pendiente bastante débil, calculada en 2 grados aproximadamente (ver figura 3).

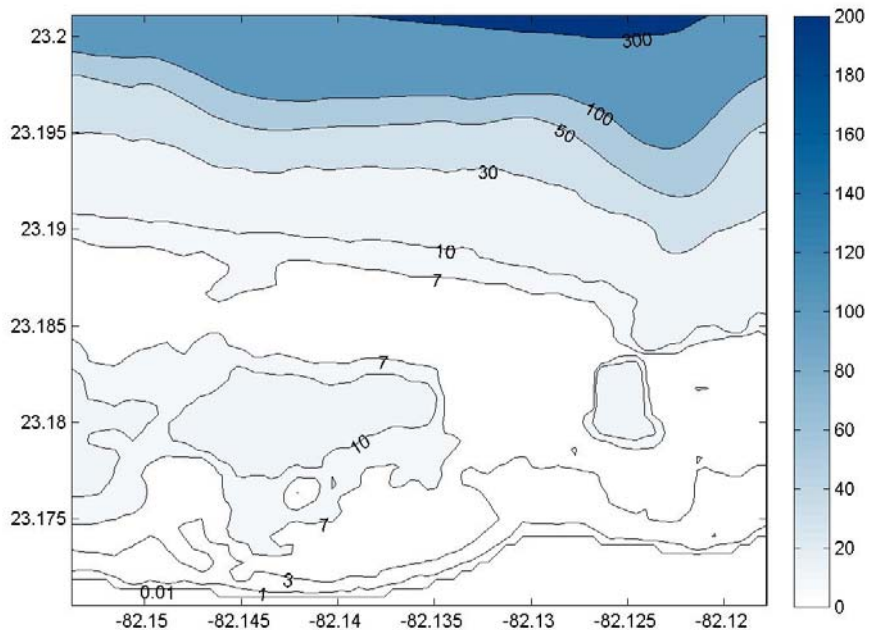


Figura 3. Esquema batimétrico de playa Guanabo.

De ello resultará que para oleajes extremos superiores a 5 metros de altura puede ser observada una amplia zona de transformación de oleaje, definida entre las profundidades de 7 y 4 metros en que se produce la ruptura de oleaje.

Los valores de wave setup en estas condiciones son bajos, sin embargo, la débil pendiente del terreno emergido favorece que el barrido de la ola o wave runup cubra áreas de varias decenas de metros sobre la playa y el área urbanizada.

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DEL MAR

Para determinar los incrementos del nivel del mar, serán analizados el **wave setup**, el **wave runup** y las **surgencias por ciclones tropicales** como elementos inducidos por causas meteorológicas, así como la componente astronómica que considera el valor máximo de la anomalía mensual.

Wave setup, wave runup y anomalía de marea

El cálculo del wave setup considerará que el oleaje que se propaga sobre aguas poco profundas reduce su altura y período debido a los efectos de la reducción de la profundidad y de la refracción. Son estas condiciones las que serán utilizadas como datos de entrada.

Además, para tener una valoración integral de la influencia del oleaje, se considera el wave runup o barrido de la ola sobre la costa, el cual es muy sensible a la pendiente de la playa.

A cada condición inicial de oleaje de aguas profundas se le ha variado la dirección de procedencia, considerando que la dirección perpendicular al sector costero es del Norte y se analizan direcciones alternativas como el Nordeste y el Noroeste.

Las tablas 3, 4 y 5 ofrecen los resultados de las transformaciones de las tres condiciones iniciales de oleaje presentadas y los valores totales de sobrelevación, a base de la suma de resultados de wave setup (η_s) y wave runup (R).

Tabla 3. Transformación de oleaje. Condiciones iniciales $H_s = 4,7$ m, $T_p = 7,9$ s, probabilidad de 0,2.

DirOla (°)	H_t (m)	T_b (s)	η_s (m)	$R_{1/2}$ (m)	$R_{2\%}$ (m)	E_w (m)
NW	0,86	6,47	0,14	0,79	1,08	0,93 – 1,22
N	0,94	5,95	0,18			0,97 – 1,26
NE	0,99	7,25	0,20			0,99 – 1,28

Tabla 4. Transformación de oleaje. Condiciones iniciales $H_s = 5,9$ m, $T_p = 9,8$ s, probabilidad de 0,05.

DirOla (°)	H_t (m)	T_b (s)	η_s (m)	$R_{1/2}$ (m)	$R_{2\%}$ (m)	E_w (m)
NW	1,22	7,77	0,22	1,07	1,42	1,29 – 1,64
N	0,99	6,71	0,28			1,35 – 1,70
NE	1,07	9,01	0,31			1,38 – 1,73

Tabla 5. Transformación de oleaje. Condiciones iniciales $H_s = 7,0$ m, $T_p = 10,6$ s, probabilidad de 0,02.

DirOla (°)	H_t (m)	T_b (s)	η_s (m)	$R_{1/2}$ (m)	$R_{2\%}$ (m)	E_w (m)
NW	1,32	8,75	0,30	1,26	1,68	1,56 – 1,98
N	1,49	7,26	0,37			1,63 – 2,05
NE	1,10	9,22	0,40			1,66 – 2,08

donde:

DirOla es la dirección de procedencia del oleaje dada en grados.

H_t es la altura de la ola transformada en la franja de aguas poco profundas.

η_s es el wave setup calculado sobre la costa.

$R_{1/2}$ es el wave runup promedio de la tercera parte de las olas más altas.

$R_{2\%}$ es el wave runup excedido por el 2% de las crestas máximas.

E_w es la elevación del nivel del mar debido a la acción del oleaje.

En los resultados se observa que los mayores valores del incremento del nivel del mar por influencia de la ruptura de oleaje, según el modelo SWAN, se obtienen desde la dirección Nordeste, seguida de la dirección Norte.

Estos valores de E_T van a verse incrementados por los valores positivos de la anomalía del nivel medio del mar, que comienzan a ascender desde marzo hasta alcanzar el máximo en octubre. Se ha calculado que la anomalía positiva del nivel medio del mar aporta un valor positivo de 0,2 metro, según procesamiento de datos de la estación mareográfica Siboney, La Habana (GEOCUBA, 2018). Este valor se obtiene luego de aplicar a las lecturas extremales de febrero y octubre (0,48 m y 0,73 m, respectivamente) la corrección del cero de la estación, fijado en 0,53 m (ver figura 4).

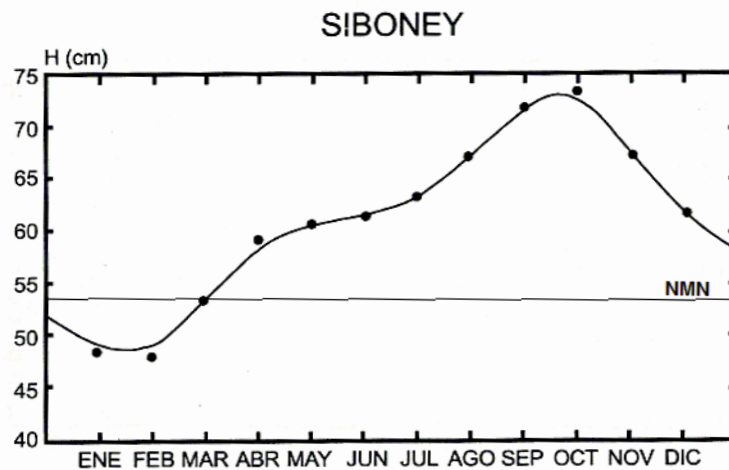


Figura 4. Distribución de las anomalías del nivel del mar alrededor del nivel medio en la estación mareográfica Siboney, La Habana (GEOCUBA, 2018)

De este modo, para las condiciones de oleaje extremo analizadas, se pueden esperar los incrementos totales que se muestran en las tablas 6, 7 y 8, que combinan las influencias de los factores meteorológicos y los astronómicos.

Tabla 6. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y marea astronómica. Probabilidad de 0,2.

DirOla (°)	E _w (m)	Anom (m)	ANM (m)
NW	0,93 – 1,22	0,20	1,13 – 1,42
N	0,97 – 1,26		1,17 – 1,46
NE	0,99 – 1,28		1,19 – 1,48

Tabla 7. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y marea astronómica. Probabilidad de 0,05.

DirOla (°)	E _w (m)	Anom (m)	ANM (m)
NW	1,29 – 1,64	0,20	1,49 – 1,84
N	1,35 – 1,70		1,55 – 1,90
NE	1,38 – 1,73		1,58 – 1,93

Tabla 8. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y marea astronómica. Probabilidad de 0,02.

DirOla (°)	E _w (m)	Anom (m)	ANM (m)
NW	1,56 – 1,98	0,20	1,76 – 2,18
N	1,63 – 2,05		1,83 – 2,25
NE	1,66 – 2,08		1,86 – 2,28

donde:

Anom es el valor de la anomalía del nivel medio del mar.

ANM es el valor total de ascenso del nivel del mar combinando causas meteorológicas y astronómicas.

Surgencias por ciclones tropicales

El caso de condiciones del estado del mar más extremas se puede presentar ante la amenaza de ciclones tropicales.

Los ciclones tropicales tienen asociados el fenómeno hidrodinámico de la surgencia, que no es más que la sobre elevación del nivel del mar que se produce por la combinación de los intensos vientos sobre el mismo rumbo de desplazamiento y el descenso brusco de la presión atmosférica en superficie.

En el océano abierto la masa de agua que se eleva, recircula por niveles profundos en sentido contrario al movimiento del ciclón y la altura de la onda de surgencia es principalmente función de la diferencia de presión entre la zona externa del ciclón y su centro, pero a medida que este se acerca a tierra, la masa de agua encuentra como obstáculo el fondo marino que disminuye su profundidad haciendo que el retorno se minimice y todo el movimiento de la masa de agua comience a ser hacia adelante a la vez que se incrementa bruscamente la altura de la onda de surgencia, a lo que también contribuye el arrastre del viento sobre la superficie marina.

Al estar localizada Guanabo en un sector costero al norte de La Habana que se extiende de Este a Oeste, las trayectorias de ciclones tropicales que ofrecen el peligro de mayor sobre elevación por surgencia son las que llevan rumbo al Oeste y rumbo al Este, según las simulaciones del Atlas Digital de Surgencias en Cuba (Pérez Parrado, 2010).

De este modo, tenemos los siguientes resultados, combinando las influencias del oleaje en rompiente y las surgencias de ciclones tropicales para los periodos de retorno señalados.

Tabla 9. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y surgencia. Probabilidad de 0,2.

DirOla (°)	ANM (m)	S _{ct} (m)	IncrTot (m)
NW	1,13 – 1,42	0,62	1,75 – 2,04
N	1,17 – 1,46		1,79 – 2,08
NE	1,19 – 1,48		1,81 – 2,10

Tabla 10. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y surgencia. Probabilidad de 0,05.

DirOla (°)	ANM (m)	S _{ct} (m)	IncrTot (m)
NW	1,49 – 1,84	1,70	3,19 – 3,54
N	1,55 – 1,90		3,25 – 3,60
NE	1,58 – 1,93		3,28 – 3,63

Tabla 11. Ascenso total del nivel del mar combinando oleaje y marea astronómica. Probabilidad de 0,02.

DirOla (°)	ANM (m)	S _{ct} (m)	IncrTot (m)
NW	1,76 – 2,18	2,78	4,54 – 4,96
N	1,83 – 2,25		4,61 – 5,03
NE	1,86 – 2,28		4,64 – 5,06

donde:

ANM es el valor total de ascenso del nivel del mar combinando causas meteorológicas y astronómicas.

S_{ct} es el valor calculado de la surgencia por ciclón tropical.

IncrTot es el incremento total del nivel del mar considerando oleaje, marea y surgencia.

Variación del nivel del agua dependiente de la duración en un evento típico

La evolución del nivel del mar durante la afectación de fenómenos hidrometeorológicos peligrosos, se puede representar como una curva hidráulica dependiente del tiempo, con el momento estimado en que ocurrirá la máxima elevación del nivel del mar.

Habitualmente, un sistema de oleaje generado por el viento que sigue a los frentes fríos, es capaz de generar inundaciones costeras por el incremento del nivel del mar después de 10 a 12 horas de estar fluyendo sobre la costa sin cambios en su dirección.

Por su parte, un ciclón tropical típico puede tener, como promedio, un tiempo de afectación a su paso por una localidad de entre 6 u 8 horas, considerando un desplazamiento estable entre 15 y 18 kilómetros por hora, sin cambio en dirección. En la realidad, esto puede tener una gran variación en dependencia de las condiciones ambientales en las que está inmerso el ciclón tropical y el momento de la trayectoria, que en conjunto modifican su velocidad de traslación, y consecuentemente la evolución del nivel del mar en el tiempo.

En esta sección se presentan dos gráficos que representan la evolución del nivel del mar en situación de oleaje puro, y la situación de coexistencia de oleajes extremos con ciclones tropicales que llevan trayectorias de Este a Oeste sobre el Estrecho de La Florida, que son los casos potencialmente más peligrosos.

En la figura 5 se muestran las curvas hidráulicas que representan los incrementos del nivel del mar (topes superiores de los rangos obtenidos) debidos a la ocurrencia de oleajes que se han presentado con probabilidades de 0,2, 0,05 y 0,02, mientras que en la figura 6 se muestra la evolución del nivel del mar cuando coexisten oleaje y surgencias por ciclones tropicales, para las mismas probabilidades de paso. En ambas se ha representado que se alcanzan los máximas elevaciones entre 3 y 4 horas de iniciado el proceso. Esta información será dato de entrada al modelo hidráulico para determinar los alcances de las inundaciones.

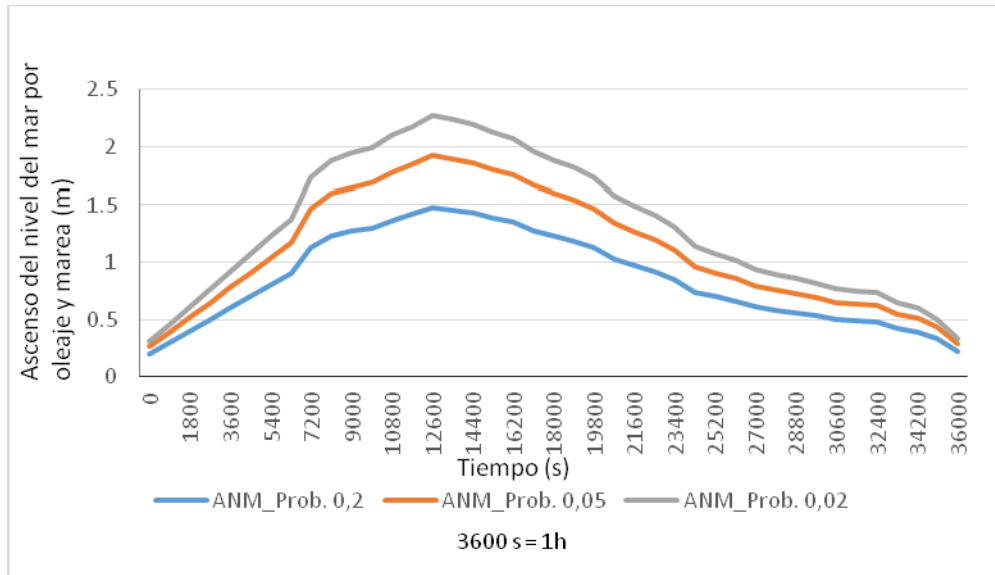


Figura 5. Variación del nivel del mar en dependencia del tiempo, al conjugarse la acción de la ruptura de oleaje y la anomalía de marea.

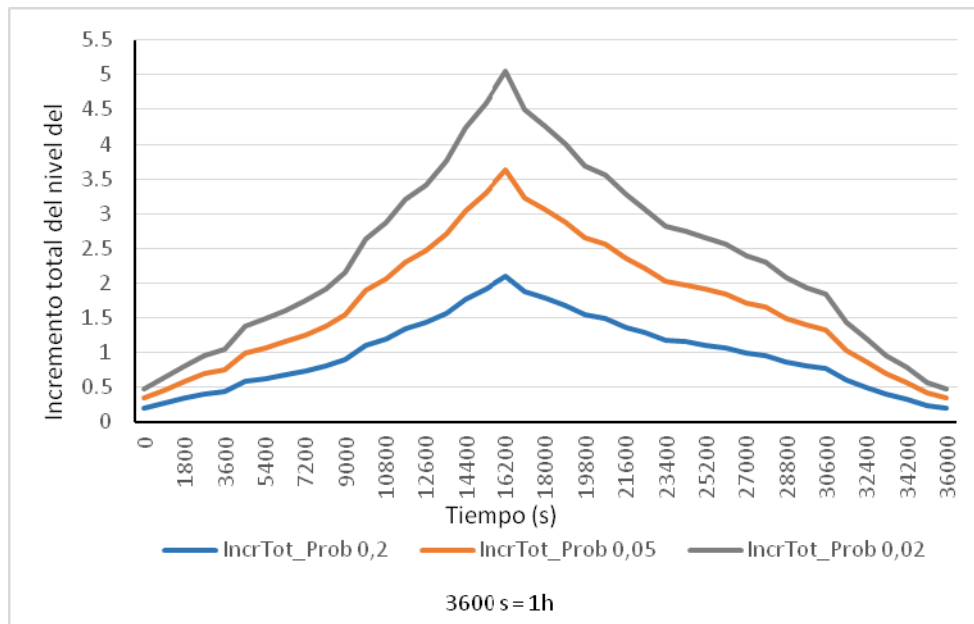


Figura 6. Variación del nivel del mar en dependencia del tiempo, considerando la acción de la ruptura de oleaje, la anomalía de marea y la surgencia debida a huracanes.

Como puede verse, el paso de un huracán sobre la zona incrementa la magnitud de los ascensos del nivel del mar para la zona de estudio, lo que aumenta el riesgo de afectaciones a objetos constructivos.

Una mejor valoración se puede tener con la ejecución de un modelo hidrológico que simule la inundación hacia el interior de la costa, el cual debe considerar las irregularidades del terreno y la urbanización de la localidad con alto detalle. Una salida de este tipo puede ayudar a diversas propuestas de cambios en el uso del suelo, para contribuir a mitigar daños en inversiones y restituir las funciones naturales del ambiente costero.

CONCLUSIONES

1. Los mayores valores de sobreelevación del nivel del mar por influencia de la ruptura del oleaje ocurren desde la dirección Nordeste, según las salidas del modelo de olas SWAN.
2. Los resultados de wave runup complementan los resultados de los valores promedio de wave setup, lo que puede ser empleado como criterios para la modificación de usos del suelo en Guanabo.
3. La adición de la influencia de los huracanes puede incrementar gradualmente los resultados de las sobreelevaciones del nivel del mar por ruptura del oleaje a casi el doble.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la modelación de la inundación en la zona de estudio empleando el modelo LISFLOOD, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Medio Ambiente (2006). Estudio de Riesgo de Inundaciones Costeras para los Municipios Costeros de la Ciudad de La Habana. La Habana, Cuba.

Álvarez, A; R. Casals; O.E. Pérez; A. R. Gutiérrez; P.J. Pérez; J.M. Guzmán; L. Menéndez; A. Torres; O. Marzo; D. Montero; M. Vázquez; J.R. González; I. González (2013). Inundación costera producida por la surgencia y oleaje generado por eventos meteorológicos extremos. Costa noroccidental de Cuba. Macroproyecto de cambio climático, escenarios de peligro y vulnerabilidad de la zona costera cubana ante el ascenso del nivel medio del mar para los años 2050 y 2100. Instituto de Oceanología – Instituto de Meteorología, La Habana, 142 pp.

CEM: Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100, Parte II (2003). Surf zone hydrodynamics (Capítulo 4). Department of the Army, Washington DC.

GEOCUBA (2018). “Tablas de mareas de las costas de Cuba”. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba, 248 pp.

Mase, H (1989) “Random wave runup height on gentle slope”. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 115, No. 5, pp. 649 – 661.

Pérez, P.J.; J.C. Lezcano; I. Mitrani; R. Pérez; L. Díaz (1994). Estudio del régimen de vientos y olas en diferentes zonas marinas de interés socioeconómico para Cuba. Informe Final de Resultado Científico. INSMET. La Habana, 15 pp.

Pérez, P.J.; O. E. Pérez, F. E. Ortega; R. Casals; R. Pérez; W. Ramírez (2018): “Modelación de los alcances de las inundaciones costeras en el parque eólico Herradura 2, teniendo en cuenta la situación actual y el ascenso del nivel medio del mar previsto por los cambios climáticos globales hasta 2050”, Inversiones GAMMA – INSMET, La Habana, 62 pp.

Pérez Parrado, R; I. Salas, S. Samper y J. Dole. (2010). Atlas digital de surgencias provocadas por los ciclones tropicales en el archipiélago cubano Revista Cubana de Meteorología. Vol.10, No.1

Salas García, I., R. Pérez Parrado, S. Samper, J. Dole, A.L. Pérez; C. Rodríguez; B. Pantaleón (2006): Mapas de Peligro por surgencia para el archipiélago cubano. Escenario actual y previsto por Cambio Climático. Informe de resultado del Proyecto de Investigación No. 01309168 (Informe final) “Impacto de la surgencia en el archipiélago cubano, considerando los Cambios Climáticos”, perteneciente al Programa Nacional de Cambio Climático en Cuba. INSMET. La Habana, Cuba. 207 pp.

The SWAN Team (2019a): “SWAN User Manual”. SWAN Cycle III 41.20AB, Delft University of Technology, 141 pp.

The SWAN Team (2019b): “SWAN Scientific and Technical Documentation”. SWAN Cycle III 41.20AB, Delft University of Technology, 147 pp.