

Malecón Tradicional de La Habana. Parte I: Análisis de las causas de la inundación costera

Dr.C Luis Córdova López

email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se presentan una descripción del muro de defensa para el denominado malecón Tradicional, sus cotas de coronación, las condiciones de clima marítimo y batimetría. Se explica el mecanismo que genera las inundaciones costeras en la zona. Los resultados de las modelaciones numéricas aplicando el modelo SWAN lo que permite definir las características del oleaje y la sobreelevación del mar por rotura del mismo, se presentan alturas de olas significativas máximas de 4,00 m y sobreelevaciones por rotura del oleaje de 0,81 m. Se definen los escenarios período de retorno 50 años y huracán Wilma (2005) como los más críticos. Las zonas de mayor peligro se identifican como el segmento entre las calles Marina y Perseverancia, “Subtramo Oeste” y el definido entre las calles Blanco y Colón “Subtramo Este”.

Palabras clave: inundaciones costeras, modelación matemática, muros, obras de defensa costera.

Malecón Traditional of Havana. Part I: Analysis of the causes of coastal flooding

ABSTRACT

A description of the seawall defense so-called Malecón Tradicional, its crest levels, the maritime climate conditions and bathymetry are presented. The mechanism that generates coastal floods in the area is explained. The results of the numerical modeling applying the SWAN model, which allows defining the characteristics of the waves and the elevation of the sea due to wave breaking, show significant maximum wave heights of 4,00 m and elevations due to breakage of the waves of 0,81 m. The 50-year returns period and hurricane Wilma (2005) scenarios are defined as the most critical. The most dangerous areas are identified as the segment between Marina and Perseverancia streets, “West Sub-section” and the one defined between Blanco and Colón streets “East Sub-section”.

Keywords: coastal flooding, mathematical modeling, seawall, coastal protection works.

INTRODUCCIÓN

La Habana, capital de la República de Cuba, ocupa un área de 740 km², con una población superior a los 2 millones de habitantes. La dominación colonial española por más de 400 años, y su prosperidad como Ciudad portuaria siendo la llave del Golfo, le confirió un estilo arquitectónico que se ha conservado y que ha provocado que sea declarada Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO.

El conocido internacionalmente como balcón de La Habana presenta una magnífica vista al Caribe, lo que junto a sus construcciones, donde se mezcla lo moderno de lujosos hoteles y lo histórico de viejas fortalezas, lo hace un lugar ideal para el desarrollo de múltiples actividades de carácter social, económico y político. De ahí la gran importancia que reviste para la capital del país el mejorar la eficacia del malecón, en relación con su función protectora, y de esa forma permitir un desarrollo urbanístico que amplíe y mejore las posibilidades de explotación para esta zona, desde todos los puntos de vista anteriormente mencionados.

El Centro de Investigaciones Hidráulicas de Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE desde 1990 ha desarrollado investigaciones hasta la fecha, destacándose los estudios de modelación física de las soluciones propuestas a nivel de gabinete en los laboratorios del Centro de Investigaciones Hidráulicas CIH, de la CUJAE, Córdova (1999, 2010), en el Centro de Estudios de Puertos y Costas, CEPYC de España en 1995, y los llevados a cabo en laboratorio de ingeniería costera de la Universidad Federico II de Nápoles, Italia, estos últimos desarrollados en 2014 para el denominado Malecón Tradicional, Córdova et al. (2016).

Para obtener una solución integral que mitigue las inundaciones costeras en la zona del malecón habanero se han definido por las autoridades un conjunto de restricciones de carácter urbanístico, estético, histórico y medio ambiental, que hacen que las obras se diseñen bajo la idea de “diseñar con restricciones”, lo cual hace más complejo e interesante el proceso de obtención de la solución deseada. Las restricciones más significativas son: las obras, tanto en tierra como en el mar, deben ser adecuadamente diseñadas para que contribuyan a no afectar la imagen urbanística actual; la altura máxima admisible del muro con respecto al nivel de acera: + 1,25 m, respondiendo a criterios de mantener las visuales de los transeúntes hacia el mar; en los casos en que la altura de la corona del muro sea superior a la referida, permanecerá la cota actual; el caudal de rebase permisible para que no exista daño estructural: ≤ 50 L/sm y la vida útil de la obra considerada en 50 años, y el periodo de retorno 50 años.

Como resultado de estos estudios se han definido tres tipologías de obras de defensa de costas teniendo en cuenta las restricciones antes expuestas, así como las condiciones de fronteras y demandas técnicas las cuales consisten en muro costero de sección transversal curva, colocación de berma de elementos rugosos adosado al muro, y colocación de rompeolas paralelos a la costa y combinando éstas tipologías, todo ello para lograr la demanda técnica de reducir el rebase del oleaje promedio específico a 50 L/sm, Córdova (1999).

Otro aspecto importante que se ha desarrollado en la fase de estudio a nivel de laboratorio de modelación física en el CIH de la CUJAE es la obtención de la solución para la protección de la descarga de los drenes pluviales que desembocan al litoral en la zona del malecón, la solución evita que penetre el agua del mar debido al oleaje, al mismo tiempo permite que se evacúe el agua captada debido a las precipitaciones, a continuación se presenta la figura 1, la cual muestra ya la obra construida en la descarga del dren pluvial de calle Belascoaín, uno de los de mayor sección transversal (2,00 m por 2,50 m).



Figura 1. Obra de protección del dren pluvial calle Belascoaín, denominada punto de lanza CIH. Tomada de Córdova et al. (2016)

El malecón habanero fue dividido en 6 tramos teniendo en cuenta para ello las diferentes características físicas de los tramos, lo que hace que las afectaciones no sean iguales, fundamentalmente debido a la orientación de la línea de costa, así como las diferencias existentes en la topografía y la batimetría de toda la zona del malecón. Figura 2.

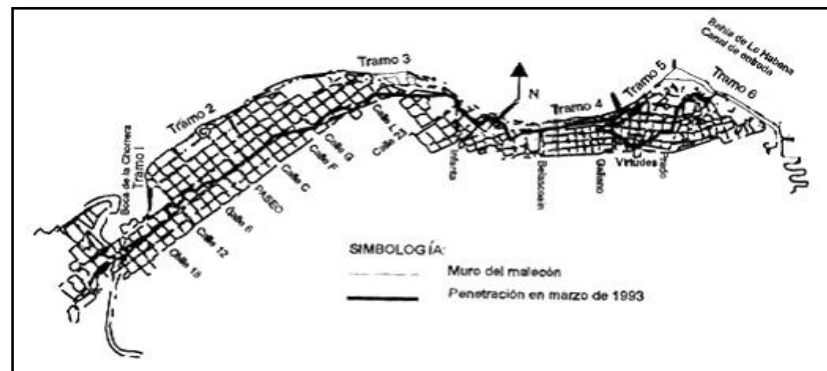


Figura 2. Tramos en los que fue dividido el malecón habanero para su estudio

El área de estudio corresponde a los tramos 4 y 5, los mismos se encuentran ubicados en la parte más septentrional del municipio Centro Habana, el cual es el más pequeño de todos los que componen La Capital y a la vez uno de los más densamente poblados. Ocupa un área de 3,42 km² y su superficie se encuentra totalmente urbanizada con pocos espacios libres. Presenta una población aproximada de 160 000 habitantes para una densidad de 47 174 hab/km², y constituye uno de los más antiguos centros urbanos que se desarrolló desde la época colonial.

DESCRIPCIÓN DEL MURO DE PROTECCIÓN COSTERA

El malecón habanero es un sistema complejo con diversas funciones, las cuales pueden definirse como: defensa del sobrepaso del oleaje, vía de tránsito y socio turístico. La primera de las antes mencionadas es su función principal. En la figura 3 se observa una foto del malecón y su sección transversal respectivamente.



Figura 3. Foto de la sección transversal del muro actual

El tramo de estudio es el correspondiente al malecón tradicional, el cual tiene una extensión aproximada de 1815,43 m. Las cotas de coronación del muro varían en toda su longitud. En las siguientes figuras (figuras 4 - 6) se puede observar lo antes expuesto.



Figuras 4,5 y 6 Cotas de coronación promedio de los diferentes tramos de la zona de estudio

A partir de las figuras antes expuestas se puede observar que el tramo de estudio se puede dividir en tres subtramos a partir de su cota de coronación: Subtramo 1: desde calle Marina hasta la parte más Oeste del parque Maceo; subtramo 2: desde la parte Oeste del parque Maceo hasta calle Lealtad; y el Subtramo 3: desde calle Lealtad hasta La Punta. En la tabla 1 se muestran las características de cada subtramo.

Tabla 1. Datos de los subtramos en los cuales se ha dividido el tramo de estudio

Subtramos	Cota promedio del muro (m)	Altura promedio del muro con respecto a la acera (m)	Cota mínima del muro (m)	Cota máxima del muro (m)	Longitud del subtramo (m)
1	3,978	0,898	3,85	4,14	245,56
2	4,332	1,182	4,24	4,39	516,03
3	3,956	0,717	3,85	4,13	1053,84

CAUSAS DE LAS INUNDACIONES

Las inundaciones en el área de estudio son causadas fundamentalmente por el paso de huracanes, frentes fríos o bajas extratropicales cerca de las costas cubanas. Estos fenómenos meteorológicos causan oleaje de gran altura que combinado con la sobreelevación del nivel medio del mar ocasionan grandes rebases o sobrepasos del oleaje, siendo ésta la causa principal de la inundación. Al mismo tiempo, el sistema de drenaje es colapsado por la acción de las olas

que hacen que penetre un flujo importante de agua a través de los mismos, evitando que el agua producto del rebase pueda ser evacuada al mar. Un efecto secundario es la no posibilidad de descarga de las aguas debido a las lluvias que pudieran acompañar a la tormenta, debido al efecto “tapón”, que produce el oleaje y la sobreelevación del mar. El mecanismo que genera las inundaciones se presenta en la figura 7.

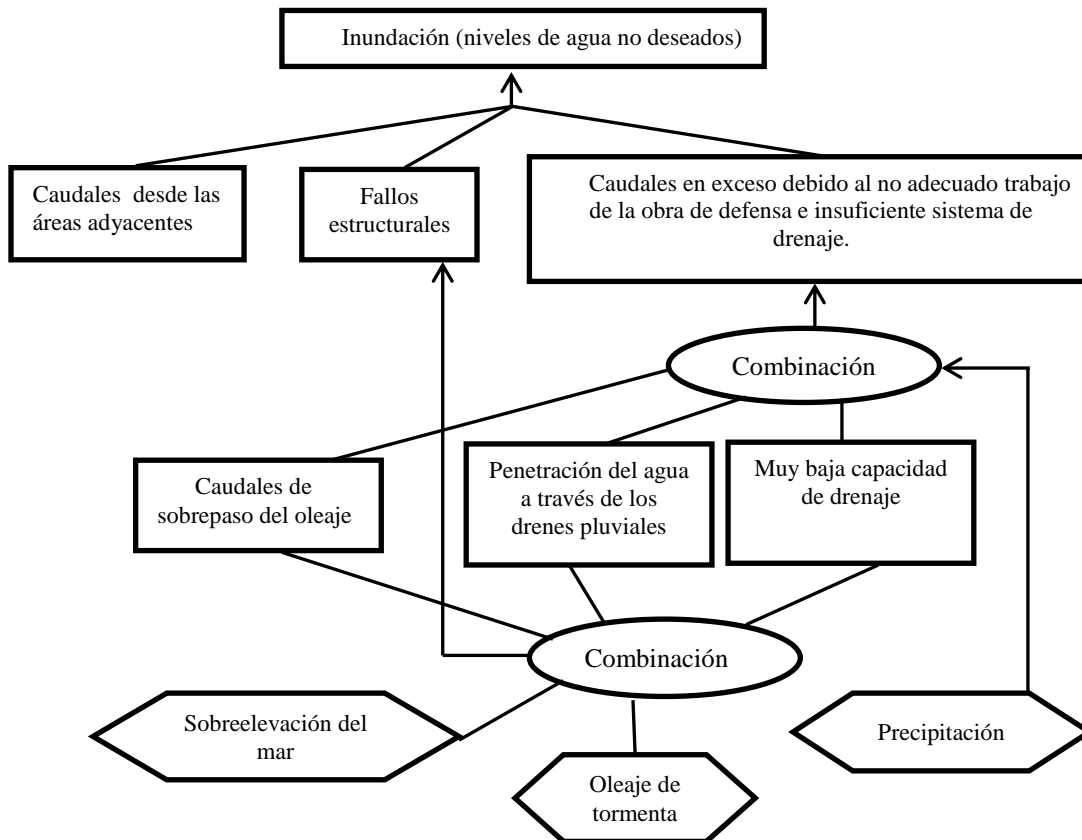


Figura 7. Esquema que representa el proceso de inundación

DEFINICIÓN DE CLIMA MARÍTIMO EN AGUAS PROFUNDAS Y NIVELES DEL MAR

Este aspecto se define de acuerdo con la información brindada por el Instituto de Meteorología de Cuba, INSMET. Se definieron tres escenarios para la realización de los estudios: eventos meteorológicos con un período de retorno de 1 en 50 años, huracán Rita (noviembre 1985) y huracán Wilma (octubre 2005), el cual constituye la condición más desfavorable ocurrida hasta el momento (ver tabla 2).

El valor de sobreelevación para el escenario de Período de Retorno 1/50 años ha sido obtenido de Mitrani et al. (1994).

El valor de la pleamar durante la ocurrencia de la marea astronómica tomado para el caso del Período de Retorno 1/50 años se define a partir de la tabla 3. Se toma el valor de 0,40 m respecto NMM.

Tabla 2 Datos de los escenarios seleccionados

Escenarios	Hs (m)	Tp (s)	Surgencia y/o sobreelevación (m)	Pleamar (m)	Cambio Climático (m)	Nivel del mar total (m)
Período de Retorno 50 años	9,2	10,6	1,06*	0,40*	0,27	1,73
Huracán Rita	3,7	11,09	1,31	0,40*	0,27	1,98
Huracán Wilma	5,8	11,34	1,53	0,48	0,27	2,28

Tabla 3 Comportamiento de la marea astronómica anualmente y durante época de huracanes

Referente a	Año		Temporada de huracanes	
	MLLW	MSL	MLLW	MSL
Máximo HHW (m)	0,58	0,40	0,58	0,40
Máximo LLW (m)	-0,15	-0,33	-0,12	-0,30
Máximo Rango HHW-LLW (m)	0,67		0,64	

TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA

En esta sección se presenta un resumen de los trabajos hidrográficos realizados por el grupo de trabajo de la empresa GEOCUBA Estudios Marinos, para obtener una batimetría más detallada y actualizada en la zona del malecón habanero.

El levantamiento topográfico realizado en la zona del malecón está enmarcado en el tramo comprendido entre las calles Marina y el Paseo del Prado. La característica principal de la batimetría en el denominado malecón tradicional es su forma de concha como se observa en la figura 8, y las grandes profundidades que se alcanzan rápidamente debido a lo estrecho de la plataforma insular. La primera zona y más cercana a la costa tiene una pendiente en el orden de 1/20 con una longitud alrededor de 300 m y una profundidad máxima de 14,00 m. La zona intermedia con una pendiente mayor, en el orden de 1/4, posee una longitud de 180 m y una profundidad máxima de 68 m. La zona de aguas más profundas posee una pendiente aproximada de 1/2 y profundidades superiores a 180 m.

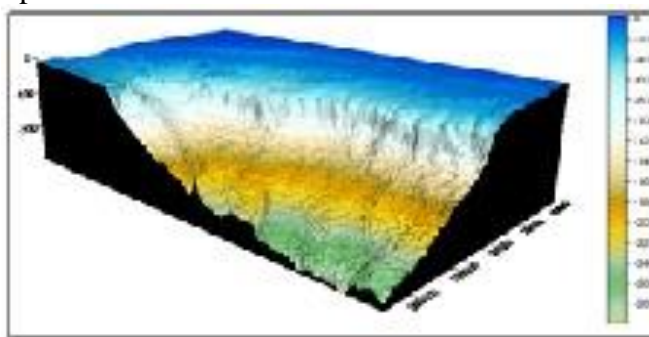


Figura 8. Representación en tres dimensiones de la batimetría de la zona del malecón Tradicional.

A continuación se presenta la figura 9, la cual muestra el nombre de las calles que conforman el área de estudio, y que serán referidas posteriormente.



Figura 9. Calles que conforman la zona de estudio. Tomado de Google Earth

ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Se establece el modelo SWAN, Simulation Waves Nearshore, Holthuijsen et al. (2004), el cual se establece para dos dominios de simulación. El primer dominio (dominio I) de menor resolución, tiene una extensión de 12,77 km por la horizontal y 8 km por la vertical, siendo la malla de cómputo de tipo regular con una resolución de 50 m. El segundo dominio (dominio II) de mayor resolución, posee una extensión de 1,605 km por la horizontal y 1,00 km por la vertical abarcando así la zona de estudio, enmarcada desde calle Marina (extremo Oeste) hasta calle Prado (extremo Este). La malla de cómputo asociada a este dominio es de tipo regular y tiene una resolución en ambos ejes de 5 m, la cual coincide con la resolución de la batimetría realizada.

La simulación en el dominio I es utilizada para proveer de las condiciones de fronteras al dominio II, lo cual es muy necesario ya que no se pueden asumir condiciones de aguas profundas en este dominio. La modelación se realiza introduciendo los datos del espectro de oleaje a propagar en el segmento norte del primer dominio, que se encuentra en aguas muy profundas. La malla anidada o dominio II toma las condiciones de frontera del oleaje desde las direcciones Norte, Noroeste y Noreste. El dominio I se ha definido de forma amplia y alejado del dominio II para evitar zonas de sombras o interferencias en las fronteras de la zona de estudio. Figura 10.

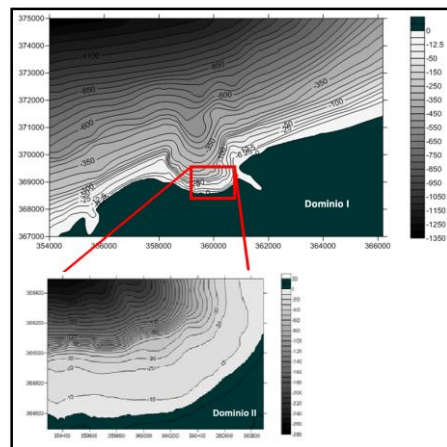


Figura 10 Establecimiento del modelo SWAN 2D

Evaluación de las posibles direcciones de propagación del oleaje generado en aguas profundas

A continuación se evalúan las posibles direcciones del oleaje que se genera en aguas profundas, cuyo objetivo principal es determinar cuál es la dirección más desfavorable para la zona de estudio desde el punto de vista de altura de ola significativa H_s . El procedimiento de pruebas consiste en propagar el oleaje de cada escenario desde las tres posibles direcciones, las mismas son: Norte; Noroeste y Noreste, para un total de 9 simulaciones. El objetivo de esta primera etapa es conocer el comportamiento del oleaje en puntos significativos de la zona de estudio, y definir los escenarios más peligrosos.

Un elemento a definir es a la profundidad respecto al N.M.M donde será realizada la comparación entre las alturas de olas significativas H_s para las diferentes direcciones, y por tanto, un resultado que debe entregar el modelo SWAN. Al mismo tiempo esta profundidad debe ser representativa de la altura de ola al pie de la estructura, variable necesaria para los cálculos ingenieros posteriores. Debido a que en aguas poco profundas ocurre la rotura del oleaje, lo que se traduce en una reducción de su energía, y teniendo en cuenta que la longitud de onda de los oleajes a estudiar son de notable magnitud, lo que implica que la disipación de la energía no ocurre de forma rápida después de la rotura, por lo que olas que han roto impactan y rebasan la estructura existente, se decide tomar como profundidad al pie de la estructura 2,00 m, la cual se encuentra a una distancia de entre 0,00 y 20,00 m de la línea de costa. Es necesario destacar que para los tres escenarios la sobreelevación del mar se encuentra en el intervalo de 1,73 m y 2,28m, lo cual significa una profundidad mínima de 3,73 m y máxima de 4,48 m al pie de la estructura.

Comparación de los escenarios

En el proceso de propagación se analiza el comportamiento de la altura de ola significativa H_s a lo largo de la isobata -2,00 m. Como se observa en las figuras 11, 12 y 13, se puede constatar que los escenarios en los cuales ocurren las mayores alturas de olas son Período de Retorno 1/50 años (a partir de ahora se identifica como P.R 1/50 años en el texto), y el huracán Wilma, y el menos peligroso es el huracán Rita.

En la figura 11, se presenta el comportamiento a lo largo de la isobata -2,00 m de la altura de ola para la dirección del oleaje proveniente del Norte. Se puede constatar que el huracán Wilma presenta ligeramente mayores alturas de olas que el escenario P.R 1/50 años en el extremo más hacia el Oeste de la zona de estudio, ocupada por el parque Maceo. Existe un tramo en el centro, comprendido entre las calles Gervasio y Campanario donde ambos escenarios presentan similares alturas de ola. En la parte Este, existe un efecto significativo del fenómeno de refracción debido a que la batimetría y la línea de costa forman un ángulo de casi 45 grados con la dirección Norte. La altura de ola disminuye desde la calle San Nicolás hasta la calle Prado, siendo mínima en este punto. El escenario de mayor altura de ola es el P.R 1/50 años, ya que tiene la mayor altura en aguas profundas (9,20 m). Se concluye que el escenario P.R 1/50 años es con el cual se obtienen mayores alturas de ola desde la dirección Norte.

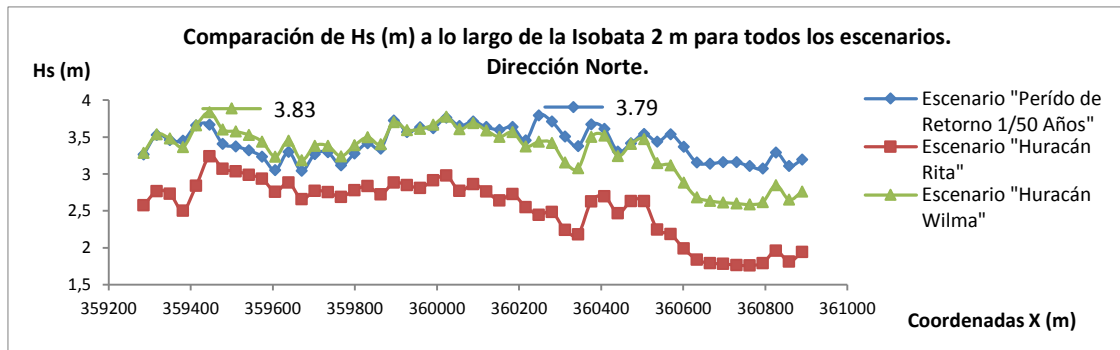


Figura 11. Comparación de las alturas de olas Hs para los tres escenarios. Dirección Norte

El análisis de los escenarios para el oleaje propagado desde el Noroeste se basa en la figura 12. Los escenarios P.R 1/50 años y huracán Wilma tienen valores similares de altura de ola a lo largo de la línea de costa, ligeramente mayores para el tramo más al Este, debido fundamentalmente a su orientación hacia el Noroeste, lo que hace que las olas lleguen con mayor energía debido a que los efectos de la refracción son mínimos. Se concluye que para los dos escenarios las alturas de olas tienen un comportamiento similar.

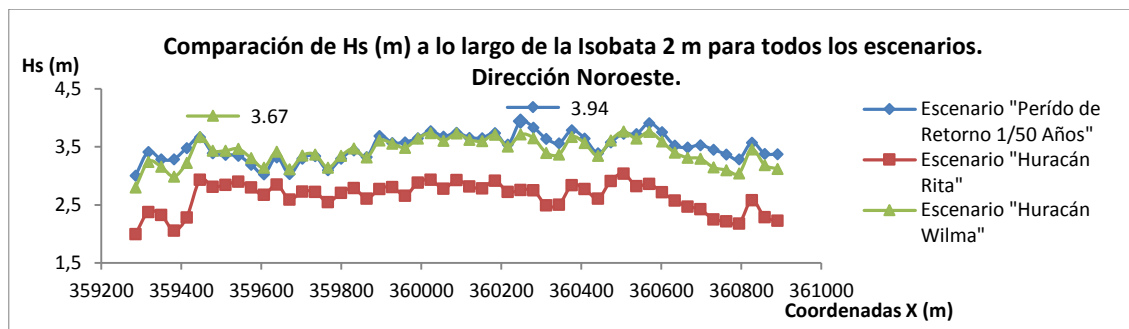


Figura 12. Comparación de las alturas de olas Hs para los tres escenarios. Dirección Noroeste

Para el caso de la dirección Noreste, como se puede constatar en la figura 13, las alturas de ola a lo largo de la línea de costa son las menores, debido a los efectos de la difracción provocada por el saliente rocoso del Morro, y a la fuerte refracción que hace que los oleajes en el lado Este sean los menores para las tres direcciones estudiadas. El escenario que presenta mayores alturas es el de P.R 1/50 años. En la zona Oeste, las alturas de olas son mayores ya que el efecto de la refracción es menor. En este sector de costa los escenarios P.R 1/50 años y huracán Wilma presentan alturas de ola similares. Como conclusión se plantea que el escenario más desfavorable es el P.R 1/50 años.

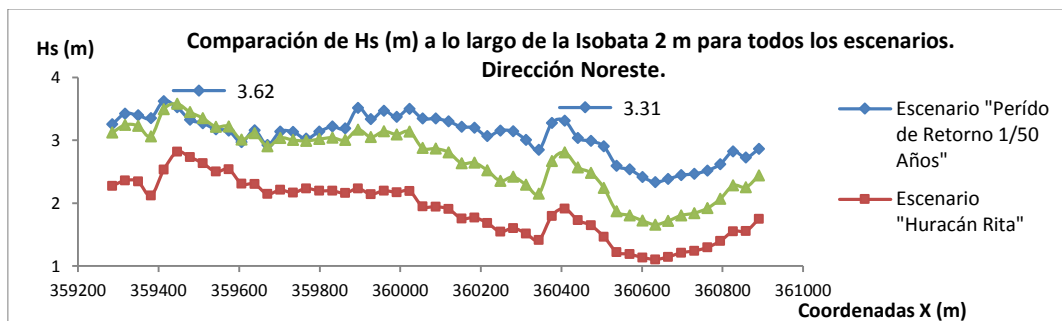


Figura 13. Comparación de las alturas de olas Hs para los tres escenarios. Dirección Noreste

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OLEAJE Y LAS ZONAS SOMETIDAS A MAYOR PELIGRO

Se estudian los dos escenarios más favorables que producen los mayores sobrepasos del oleaje, el escenario P.R 1/50 años y el huracán Wilma. El objetivo es definir los parámetros altura de ola significativa H_s y período medio de la ola y las zonas de mayor peligro.

Escenario Período de Retorno 1/50 años

En la figura 14 se puede observar que las alturas de olas en el sector más hacia el Oeste, dígase en la zona entre calle Marina y calle Belascoaín, son similares para las tres direcciones. Los valores máximos se comportan de la siguiente forma en este sector, dirección Norte 3,66 m, dirección Noroeste 3,67 m y dirección Noreste 3,62 m. Si se analiza el comportamiento del oleaje en dirección hacia el Este las alturas de ola disminuyen a valores en el orden de los 3,30 m en la zona comprendida entre las calles Belascoaín y Lealtad para las tres direcciones. Se produce un incremento de la altura de ola desde la calle Perseverancia hasta calle Galiano con un valor máximo de 3,94 m que se mantiene en ese orden de magnitud hasta la calle Crespo, disminuyendo a valores por debajo de 3,5 m en la calle Prado. Los oleajes máximos son debido a la dirección Noroeste en los sectores definidos desde la calle Perseverancia hasta la calle Prado, el valor promedio de altura de ola es de 3,61 m y período promedio de 7,93 segundos. Se puede destacar que en la zona desde calle Marina a calle Perseverancia las olas con dirección Norte son ligeramente más bajas, con un valor promedio de 3,41 m y período medio de 7,98 segundos.

Se define tomando los resultados de la simulación para las tres direcciones que el oleaje proveniente de la dirección Norte genera el mayor peligro en la zona del parque Maceo, donde olas de altura en el orden de los 6 m se producen a 300 m de la línea de costa debido fundamentalmente a la existencia de grandes profundidades, dígase perfiles con fuertes pendientes. Las olas en la isobata -2,00 m están en el orden de los 3,41 m. La segunda zona de mayor peligro se localiza entre las calles Gervasio y Crespo, donde se producen alturas máximas entre 3,70 m y 3,95 m. En el caso del oleaje proveniente del Noroeste, se puede constatar que las zonas coinciden con las definidas a partir del análisis de la dirección Norte, sólo destacar que la zona entre las calles Perseverancia y Crespo se amplía hacia el Este, debido a que las olas provenientes del Noroeste son menos afectadas en este sector por el efecto de la refracción. Por último se analiza la dirección Noreste, en este caso la zona definida entre las calles Marina y

Belascoaín (Zona del parque Maceo) se extiende más al Este hasta la calle Perseverancia, y la zona definida entre las calles Gervasio y Crespo, se localiza en la zona de la calle Galiano.

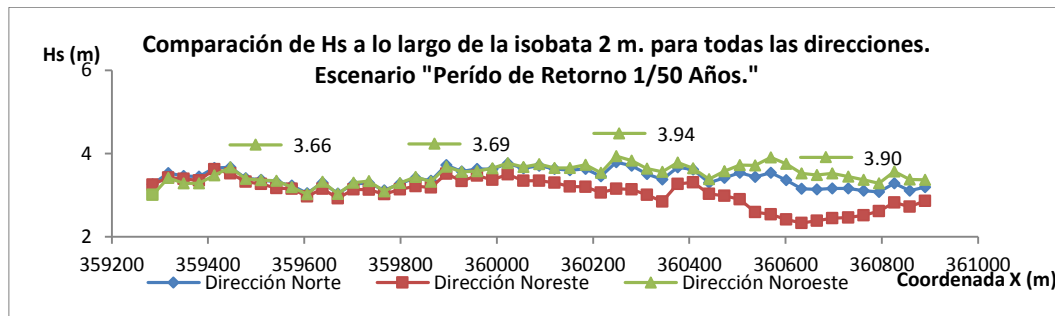


Figura 14. Comparación de altura de ola significativa a lo largo de la isobata -2,00 m. Escenario Período de Retorno 1/50 años

Escenario huracán Wilma

En el caso de estudio huracán Wilma, el análisis se realiza basado en la figura 15. El comportamiento de la altura de ola a lo largo de la isobata -2,00 m es similar al del escenario P.R 1/50 años. En este caso la dirección Norte genera las mayores alturas de ola en un sector definido desde calle Marina hasta calle Perseverancia, donde el oleaje incide perpendicularmente a la línea de costa. El valor máximo de altura de ola es de 3,84 m y el valor promedio de 3,49 m, siendo el período medio de 8,54 segundos. Los oleajes provenientes del Noroeste y Noreste presentan alturas menores pero similares para la zona del parque Maceo, que oscilan entre 3,40 m y 3,60 m. En el sector enmarcado desde la calle Perseverancia hasta la calle Prado, la dirección que ocasiona las mayores alturas de ola es la Noroeste por la orientación de la costa en esa dirección, con valor máximo de 3,77 m y promedio de 3,48 m, siendo el período promedio de 8,50 segundos. El oleaje comienza a disminuir en este sector a partir de la calle Crespo hasta la calle Prado.

Para definir las zonas de mayor peligro se realiza un análisis similar al efectuado para el escenario P.R 1/50 años. Para las tres direcciones estudiadas en el caso de este escenario las zonas más críticas son muy parecidas. La zona definida entre las calle Marina y Perseverancia, con el punto crítico en el área de parque Maceo y la otra localizada en entre las calles Manrique y Aguila, con el punto de mayor peligro en la calle Blanco.

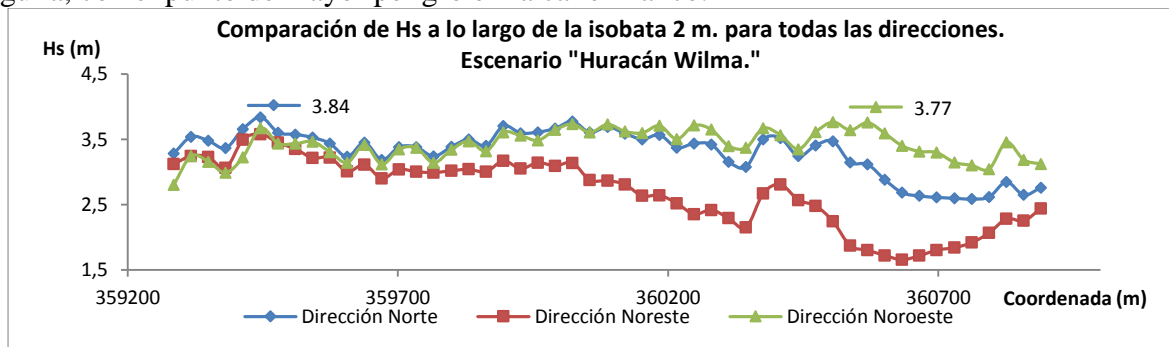


Figura 15. Comparación de altura de ola significativa Hs a lo largo de la isobata -2.00 m. Escenario huracán Wilma

Como conclusión se puede definir la zona donde el oleaje proveniente del Norte es más favorable para el rebase de las olas, identificándose el tramo comprendido entre las calles Marina y Perseverancia, “Subtramo Oeste”. Es importante señalar que la zona desde calle Marina hasta calle Belascoaín es la más crítica, donde se presentan alturas de ola en la isobata -2.00 m de 3,84 m durante el huracán Wilma, enmarcado en la zona del parque Maceo y calle Gervasio. Respecto al tramo desde calle Perseverancia hasta la entrada al canal de la bahía de La Habana “Subtramo Este” se caracteriza por un valor máximo de altura de ola de 3,94 m en las calles Blanco y Colón. A continuación se presentan las tablas 4 y 5 donde se resumen los parámetros del oleaje para las dos escenarios analizados y las zonas más críticas.

Tabla 4 Resultados del proceso de propagación para el escenario Período de Retorno 1/50 años

Dirección del oleaje	Tramo Oeste	Tramo Este	Comentarios
Norte	$Hs\ máx.=3,76\ m$ $Tm\ máx. = 8,03\ s$ $Hs\ prom. = 3,41\ m$ $Tm\ prom. = 7,98\ s$	$Hs\ máx.=3,79\ m$ $Hs\ prom. = 3,42\ m$	Tramo Oeste: El valor de altura máxima ocurre entre calle Marina y parque Maceo. Tramo Este: El valor de altura máxima ocurre en la zona entre las calles Perseverancia y Galiano.
Noroeste	$Hs\ máx.= 3,77\ m$ $Hs\ prom. = 3,37\ m$	$Hs\ máx.= 3,94\ m$ $Tm\ máx. = 8,10\ s$ $Hs\ prom. = 3,61\ m$ $Tm\ prom. = 7,93\ s$	Tramo Oeste: El valor de altura máxima ocurre entre calle Marina y calle Belascoaín. Tramo Este: El valor de altura máxima ocurre en la zona entre la calle Galiano y calle Crespo.

Tabla 5 Resultados del proceso de propagación para el escenario huracán Wilma (2005).

Dirección del oleaje	Tramo Oeste	Tramo Este	Comentarios
Norte	$Hs\ máx.= 3,84\ m$ $Tm\ máx. = 8,76\ s$ $Hs\ prom. = 3,48\ m$ $Tm\ prom. = 8,54\ s$	$Hs\ máx.= 3,69\ m$ $Hs\ prom. = 3,14\ m$	Tramo Oeste: El valor de altura máxima ocurre en la zona desde calle Marina hasta Belascoaín. Tramo Este: El valor de altura máxima ocurre en la zona de calle Galiano.
Noroeste	$Hs\ máx.= 4,00\ m$ $Hs\ prom. = 3,39\ m$	$Hs\ máx.= 3,77\ m$ $Tm\ máx. = 8,64\ s$ $Hs\ prom. = 3,48\ m$ $Tm\ prom. = 8,50\ s$	Tramo Oeste: El valor de altura máxima ocurre en la zona del parque Maceo. Tramo Este: El valor de altura máxima ocurre en la zona de calle Blanco y Colón.

DETERMINACIÓN DE LA SOBREELEVACIÓN POR ROTURA DEL OLAJE

La sobreelevación debida a la rotura del oleaje es un fenómeno que ocurre en aguas poco profundas y depende de las características del oleaje, dígame altura de ola y período, así como de la pendiente del perfil en la zona de análisis. Esta sobreelevación es un fenómeno importante en el proceso de propagación del oleaje. Como es conocido el oleaje en la realidad es irregular por lo que existe una zona de rotura de las olas que componen todo el espectro que se generó en aguas profundas.

En aguas poco profundas, y de acuerdo a la relación entre la altura de ola y la profundidad, ocurre el fenómeno de rompiente de la ola, ocasionado un desbalance en las tensiones de radiación lo que genera un incremento del nivel medio del mar hacia la línea de costa, lo cual ayudará a que las olas de menor altura puedan sobrepasar una estructura existente, causando considerables rebases.

Por lo anterior explicado se realiza el análisis de este fenómeno tomando como base los 6 perfiles con los cuales se caracterizó la batimetría en el área de estudio. El proceso para determinar este parámetro consiste en obtener mediante la simulación realizada a través de SWAN en dos dimensiones los valores de altura de ola significativa y período pico en 6 boyas virtuales localizadas al final de cada uno de los perfiles seleccionados, para posteriormente realizar la transformación del oleaje aplicando SWAN en una dimensión hasta la línea de costa, ya que el modelo en una dimensión resuelve las ecuaciones para el cálculo de la sobreelevación por rotura del oleaje de forma más precisa. En la figura 16, se pueden observar la localización de las boyas virtuales donde se obtienen los resultados de las simulaciones con el modelo SWAN en dos dimensiones, que servirán de datos de entradas para las simulaciones en una dimensión.

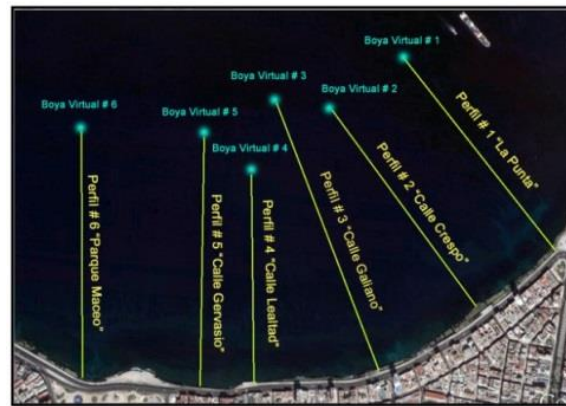


Figura 16 Localización de las boyas virtuales

A continuación en las tablas 6 y 7 se presentan los resultados de la modelación para los tres escenarios, los 6 perfiles y las 3 direcciones del oleaje seleccionadas. Se realizaron un total de 36 simulaciones.

A partir del análisis de los resultados de las simulaciones se puede concluir que el escenario que provoca los mayores valores de sobreelevación es el de Período de Retorno 1/50 años, con un valor máximo de 0,81 m en la zona del perfil 3 (calle Galiano), seguido de un valor de 0,68 m en el perfil 2 (calle Crespo). Estas zona se caracterizan por perfiles más suaves y la presencia de una mayor longitud de arrecifes rocosos como se puede observar en la figura 17. Ambas situaciones favorecen el incremento de la sobreelevación.

Tabla 6. Resultados del cálculo de la sobreelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje en el escenario PR 1/50 Años. Escenario PR 1/50 años

Perfil	Dirección Norte				Dirección Noreste				Dirección Noroeste			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)
P-1	6,16	10,76	285,5	0,52	4,44	10,76	268	0,36	7,19	10,76	310,7	0,61
P-2	7	10,76	277,6	0,68	5,16	10,76	261,31	0,49	7,52	10,76	304,09	0,8
P-3	7,3	10,76	274,3	0,46	5,66	10,76	257,12	0,53	7,57	10,76	303,16	0,81
P-4	7,25	10,76	274,34	0,3	5,58	10,76	257,89	0,17	7,42	10,76	301,59	0,28
P-5	7,31	10,76	273,5	0,3	5,7	10,76	256,83	0,18	7,41	10,76	301,19	0,26
P-6	7,52	10,76	269,72	0,23	6,25	10,76	251,95	0,12	7,2	10,76	298,39	0,16

Tabla 7. Resultados del cálculo de la sobreelevación del nivel del mar debido a la rotura del oleaje en el escenario huracán Wilma. Escenario huracán Wilma

Perfil	Dirección Norte				Dirección Noreste				Dirección Noroeste			
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (o)	Setup (m)
P-1	4,05	10,76	286,12	0,23	2,92	10,76	267,64	0,04	4,76	10,76	311,51	0,33
P-2	4,64	10,76	277,84	0,4	3,39	10,76	261,16	0,23	5,02	10,76	304,31	0,5
P-3	4,84	10,76	274,53	0,41	3,72	10,76	257,01	0,26	5,05	10,76	303,32	0,5
P-4	4,81	10,76	274,49	0,07	3,68	10,76	257,78	0	4,96	10,76	301,18	0,062
P-5	4,85	10,76	273,63	0,08	3,76	10,76	256,72	0,01	4,95	10,76	301,4	0,062
P-6	5	10,76	269,74	0,021	4,13	10,76	251,82	0	4,81	10,76	298,61	0

En el caso del escenario huracán Wilma, el valor máximo es de 0,41 m y 0,26 m en los perfiles P-2 y P-3 respectivamente. Los valores son menores que en el caso del escenario Período de Retorno 1/50 años fundamentalmente debido a que el nivel del agua o nivel del mar es mayor en este escenario debido a la surgencia producto del efecto del huracán, ver figura 18.

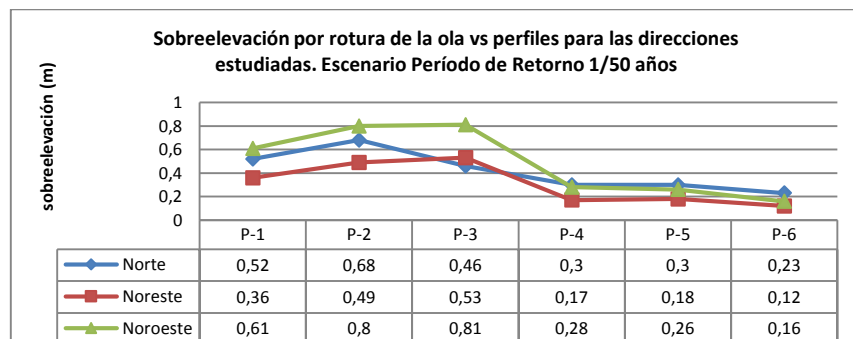


Figura 17 Sobre elevación por rotura vs Perfiles para las direcciones estudiadas. Escenario Período de Retorno 1/50 años

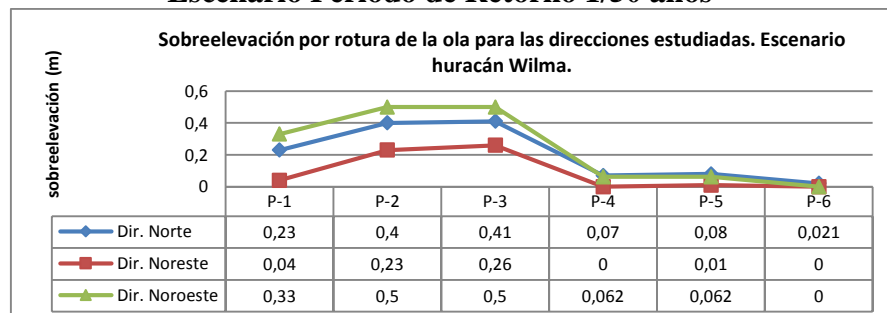


Figura 18 Sobre elevación por rotura vs Perfiles para las direcciones estudiadas. Escenario huracán Wilma

CONCLUSIONES

Se presenta el mecanismo generador de inundaciones en el malecón habanero, lo que permite concebir una solución integral.

Se realizó la comparación entre los tres escenarios seleccionados para llevar a cabo los diseños a partir de las restricciones planteadas para obtener una solución integral de protección a la zona del malecón tradicional, siendo los escenarios, huracán Wilma, y período de retorno 50 años los que presentan las condiciones de oleaje máximas para las tres direcciones posible de propagación del oleaje.

Las zonas donde ocurren las mayores alturas de ola es debido a que el oleaje incide de forma perpendicular a la línea de costa, la batimetría en los dos subtramos definidos en el estudio presenta grandes profundidades a distancia cercana a la línea de costa, lo que hace que el oleaje conserva su energía, ya que es mínima la fricción con el fondo.

Los oleajes más severos se producen tanto de la dirección Norte, como de la dirección Noroeste, con alturas de ola que pueden alcanzar para la máxima sobreelevación del mar estudiada valores entre 3,77 m y 4,00 m, se genera sobreelevación del mar debido a la rotura del oleaje que puede alcanzar valores máximos de 0,81 m, ambos aspectos generaran valores significativos de rebase promedio del oleaje.

REFERENCIAS

- Córdova L.** (1999). Estudio del fenómeno de Rebase en obras de defensa de costas para las condiciones de Cuba. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica de La Habana, “José Antonio Echevarría”, Cujae, La Habana. Cuba.
- Córdova L.** (2010). “Estimación de la tasa de sobrepaso promedio de oleaje para muros costeros de sección transversal curva”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 31, no. 3, ISSN: 1815-591X, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Córdova L., Buccino M., Salerno D., Pugliese E., Torres R., Capobianco A., Ponce M.** (2016). “Análisis de los resultados de los estudios mediante modelación física del rebase del oleaje, presiones sobre los muros costeros y estabilidad de los elementos que componen las bermas y rompeolas. Propuesta de Solución”. Reporte Técnico. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.
- Holthuijsen L. H., Booji N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. M. M, Ris R. C, Van Der Westhuysen A. J. and Zijlema M.** (2004). “SWAN Cycle III version 40.41 user’s manual”, Delft University of Technology Press, Delft, The Netherlands.
- Mitrani I., L. Díaz, P. Pérez, J. González (1994):** “Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero”, Informe de Resultado Científico, Biblioteca INSMET, 38 pp, La Habana, Cuba.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Luis Fermín Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó el diseño de la investigación, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final.