

Modelo XBeach NH para el cálculo del rebase sobre muros verticales. Malecón de La Habana

Daykelin León Arias

E-MAIL: daykelin.la@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Luis F. Córdova López

E-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

RESUMEN

La investigación se centró en modelar con XBeach, en su modo No Hidrostático el comportamiento del oleaje durante la ocurrencia de eventos extremos en el malecón de La Habana para determinar el rebase sobre la estructura. Se realizó la calibración - validación del modelo para las condiciones de tormenta del huracán Wilma (2005) y el período de retorno 1/50 años. Se estableció el modelo y se simuló la hidrodinámica costera de 6,25 km del malecón para 49 horas del huracán Wilma correspondiente con los días 22 al 25 de octubre, obteniéndose los rebases específico y promedio sobre el muro.

PALABRAS CLAVES: hidrodinámica litoral, modelación numérica, muro vertical, no hidrostático.

XBeach NH model for the calculation of overtopping on vertical walls. Havana Malecon

ABSTRACT

The research focused on modeling with XBeach, in its Non-Hydrostatic mode, the behavior of the waves during the occurrence of extreme events on the Havana boardwalk to determine the overtopping on the structure. The calibration - validation of the model was carried out for the storm conditions of Hurricane Wilma (2005) and the return period 1/50 years. The model was established and the coastal hydrodynamics of 6.25 km of the seawall was simulated for 49 hours of Hurricane Wilma corresponding to October 22 to 25, obtaining the specific and average overtopping on the wall.

KEYWORDS: hydrodynamic coastal, numerical modeling, vertical wall, non Hydrostatic.

01 INTRODUCCIÓN

La protección contra las inundaciones costeras y penetraciones del mar ha cobrado una importancia especial a medida que el ascenso del nivel medio del mar se ha acelerado por los efectos del cambio climático global. Cuba no escapa de esta situación, por su posición geográfica, además, se ve amenazada por la ocurrencia de tormentas tropicales, huracanes, frentes fríos y otros fenómenos que vienen acompañados de fuertes vientos, intensas lluvias y marejadas. (Morejón, 2020)

Cada vez con mayor frecuencia el litoral costero de La Habana y en especial la zona donde se encuentra ubicado el malecón, es víctima de los efectos generados por los fenómenos hidrometeorológicos que azotan la isla, perjudicando en gran medida a la población capitalina que radica en sus cercanías y ocasionando grandes pérdidas a la economía del país. El malecón de La Habana se clasifica como un muro vertical de defensa de costas, además de su atractivo como espacio de ocio y esparcimiento tiene la finalidad de proteger la infraestructura de la zona contra el rebase del oleaje y las inundaciones, en muchas ocasiones ante la ocurrencia de eventos extremos como los ciclones tropicales y frentes fríos se ve rebasado.

La integración de los modelos numéricos en la estimación del rebase de oleaje resulta cada vez más atractivo dado el avance en la potencia de cálculo y su capacidad para reproducir la hidrodinámica litoral; se evidencia la necesidad de seguir abordando en el tema referido, por lo que la presente investigación se centrará en modelar con precisión a través del modelo XBeach, en su modo No Hidrostático el comportamiento del oleaje durante la ocurrencia de eventos extremos en el malecón de La Habana para determinar el rebase sobre la estructura.

La investigación constará de 2 etapas: calibración – validación del modelo y simulación y determinación del rebase sobre el muro.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para simular las condiciones hidrodinámicas en el malecón de La Habana (caso de estudio), se seleccionó el modelo numérico XBeach en su modo No Hidrostático (Roelvink et al. 2014), por su capacidad de reproducir los procesos costeros y en especial la rotura de la ola sobre la estructura al emplear las ecuaciones de Navier-Stokes en aguas poco profundas.

Los límites de representatividad de la investigación fueron las condiciones de tormenta del huracán Wilma (2005) y el período de retorno 1/50 años definido en la tarea técnica para la solución de las inundaciones en el malecón, en el caso de la calibración – validación y en la simulación solamente el escenario del huracán Wilma correspondiente con los días 22 al 25 de octubre donde se registraron las mayores afectaciones para la zona; el enmarcamiento espacial, abarca el malecón desde calle 12 hasta Prado con una longitud de 6,25 km subdividiéndose el área de estudio en 4 tramos considerando los criterios del Grupo de Expertos Gobierno de La Habana, 1993 (ver figura 1).

Se utilizó una base de datos que permitió una mayor precisión en la reproducción de las condiciones litorales extraída de los materiales que se presentan a continuación:

- Batimetría escala 1:500, GEOCUBA S.A, 2020
- Línea de costa (resolución 25 m), GEOCUBA S.A, 2020
- Topobatimetría, estacionado 20 m, GEOCUBA S.A, 2020
- Modelo de superficie del terreno (resolución 0,25 m), GEOCUBA S.A, 2020
- Clima Marítimo, INSMET, 2012

- Marea astronómica, INSMET, 2012
- Datos huracán Wilma, INSMET, 2005
- Zonas de inundación asociadas al área de estudio, Defensa Civil, 2006
- Resultados de la modelación física, Laboratorio de modelación física de la Universidad de Nápoles “Federico II”, Italia, 2013

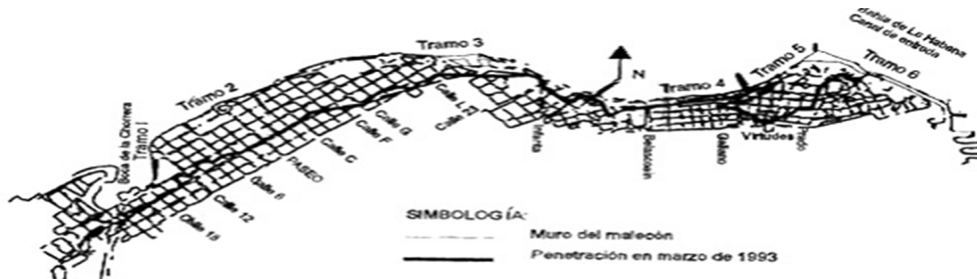


Figura 1: Vista en planta Malecón de La Habana, división por tramos. (Grupo de Expertos Gobierno de La Habana, 1993)

Se tomó como punto de referencia para la calibración-validación del modelo los resultados de la estimación del rebase obtenidos de la modelación física realizada en el laboratorio de la Universidad de Nápoles “Federico II”, Italia, 2013 para el caso de estudio (ver figura 2).

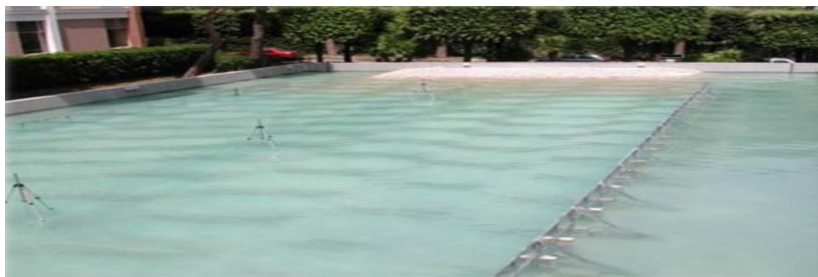


Figura 2: Tanque de oleaje irregular, Laboratorio Federico II, Universidad de Nápoles, Italia, 2013.

Para establecer las condiciones de frontera de la simulación se tomaron como referencia los resultados de (Orta, 2020), “Estudio del fenómeno del rebase promedio del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Wilma 2005 aplicando el modelo Delft 3D”, donde se obtuvo altura de ola, periodo pico y nivel total de mar durante la ocurrencia del evento de estudio medidos con boyas virtuales (usando Delft 3D) a varias profundidades en la zona del malecón; al carecer de la información requerida a la profundidad seleccionada para la simulación de -20 m se tomó una estimación de estos parámetros comprendidos entre las boyas 38 y 39 que se ubicaron en las profundidades -120 y $-3,14$ m respectivamente, en la dirección norte, ver figura 3.



Figura 3: Ubicación de las boyas virtuales, dominio Malecón Habanero. (Orta, 2020)

Los parámetros característicos para la simulación se muestran en las figuras 4 y 5 respectivamente.

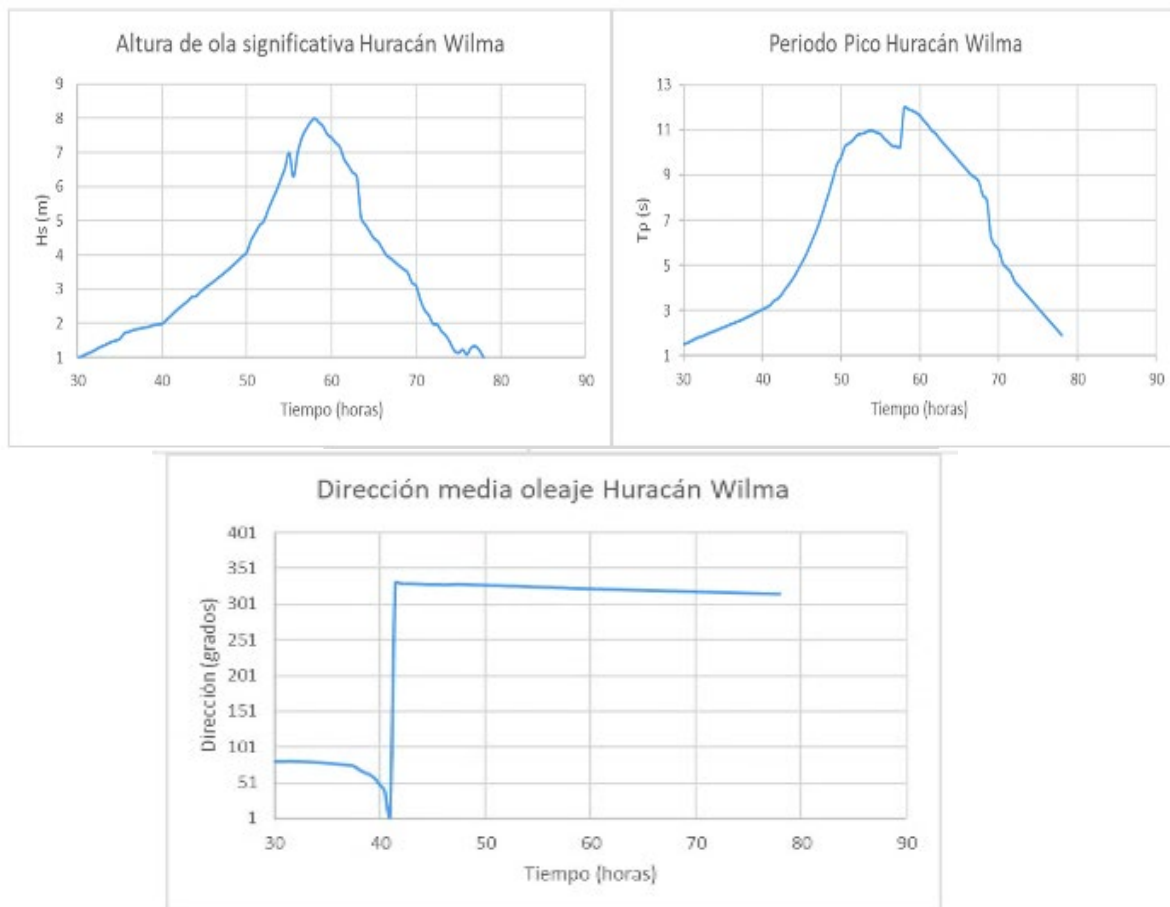


Figura 4: Altura de ola significativa, periodo pico y dirección media de oleaje huracán Wilma, profundidad - 20 m.



Figura 5: Nivel total de mar huracán Wilma, tramos 2 al 5 Malecón de La Habana.

03 RESULTADOS DE LAS ETAPAS DE INVESTIGACIÓN

ETAPA I: CALIBRACIÓN – VALIDACIÓN DEL MODELO

En esta primera etapa correspondiente a la calibración – validación del XBeach se emplearon ocho pruebas de la modelación física correspondientes cuatro al escenario del huracán Wilma, considerando un nivel total de +2,28 m y cuatro al escenario del Periodo de retorno con un nivel total de +1,73 m, con dos alturas de olas significativas (H_s) 2,7 y 6,5 m y dos periodos picos (T_p) 10 y 12 seg para la calibración y ocho pruebas con la misma estructura para la validación (H_s 4 y 5,4 m, T_p 10 y 12 seg). La comparación de los resultados se realizó mediante el error absoluto definiendo como buenos resultados los correspondientes a un error absoluto menor que $q= 1 \text{ m}^3/\text{sm}$.

Se definieron tres parámetros a calibrar: resolución de la malla, esbeltez máxima de la ola y fricción de fondo, ver tabla 1.

Tabla 1: Parámetros a calibrar XBeach NH.

Descripción	Parámetro	Rango
Resolución de la malla (1D o 2D, m)	dx, dy	0-1000000000
Criterio de esbeltez máxima de la ola (adim)	maxbrsteep	0,3 - 0,8
Fricción de fondo (adim)	manning	Según tipo de fondo.

El proceso de calibración se dividió en tres fases:

1. Definición de la resolución de malla (dx)
2. Definición del parámetro de esbeltez máxima de la ola ($maxbrsteep$)
3. Definición del valor de fricción de fondo (n , Manning)

Estas fases se establecieron bajo el criterio de ir fijando cada una de las variables a calibrar y hacer corridas del modelo para comparar con los resultados de la modelación física a modo de ir definiendo variables en cada paso hasta tener la mejor selección de los parámetros.

La resolución de la malla (dx) se varió 0,5 y 1 m en una sola dimensión (1D), para la esbeltez máxima del oleaje se utilizaron valores representativos del rango admitido según XBeach Manual, 2015, 0,3; 0,6 y 0,8 y los valores de la n de Manning fueron 0,016 (hormigón) y 0,035 (roca) correspondientes con las características del muro y la zona de rompiente. El perfil característico que se empleó para este proceso se tomó a partir de los - 20 m de profundidad, con una cota de coronación del muro de 3,96 m por encima del nivel medio del mar y con una resolución de la malla de 1 m.

Los resultados de la primera fase para el parámetro dx (resolución de la malla) arrojaron que tanto para la resolución de 0,5 m como la de 1 m los resultados fueron buenos teniendo en cuenta que el error absoluto en todos los casos fue menor que $q= 1 \text{ m}^3/\text{sm}$; los mejores resultados se obtuvieron para $dx=1$ m, no solo los errores absolutos fueron menores, los valores de caudal se duplicaron estimando con mayor precisión el rebase y se fijó la malla de 1 m para los siguientes pasos; se realizaron un total de 16 pruebas. En la segunda fase se realizaron 16 pruebas; los tres valores seleccionados dentro del rango admisible del parámetro estudiado en este paso mostraron buenos resultados; los mejores resultados se obtuvieron para $maxbrsteep=0,8$, en cada una de las pruebas se pudo apreciar que los errores absolutos fueron menores y que disminuyeron a medida que se aumentó el parámetro al igual que los valores de caudal (que se duplicaron), por lo que se fijó el valor $maxbrsteep=0,8$. En la tercera fase se realizaron 8 pruebas y se obtuvieron los mejores resultados

para $n=0,016$ (hormigón), siendo la variante de menores errores absolutos y aumentándose los valores del caudal con una mejor aproximación al caudal obtenido en las pruebas de modelación física, los resultados de esta última fase se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados obtenidos en el proceso de calibración, tercera fase.

Escenario	No. de prueba	n-manning (adim)	maxbrsteep (adim)	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m ³ /sm) XBeach NH	q (m ³ /sm) Modelación Física	Error Absoluto (m ³ /sm)
Huracán n Wilma +2,28 m	5	0,016	0,8	1	10	2,7	0,192	0,35	0,158
	6	0,016	0,8	1	10	6,5	0,705	0,98	0,275
	7	0,016	0,8	1	12	2,7	0,249	0,37	0,121
	8	0,016	0,8	1	12	6,5	0,814	1,13	0,316
Período de Retorno 1/50 años +1,73 m	5	0,016	0,8	1	10	2,7	0,122	0,18	0,058
	6	0,016	0,8	1	10	6,5	0,419	0,67	0,251
	7	0,016	0,8	1	12	2,7	0,147	0,18	0,033
	8	0,016	0,8	1	12	6,5	0,504	0,80	0,296

Se realizaron un total de 40 pruebas y el proceso de calibración concluyó definiéndose los parámetros: $dx=1m$, $maxbrsteep=0,8$ y $n=0,016$ para el caso de estudio teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la modelación física. En la figura 6 se muestra gráficamente la comparación del caudal obtenido en la calibración (tercera fase) con los resultados de la modelación física para ambos escenarios.

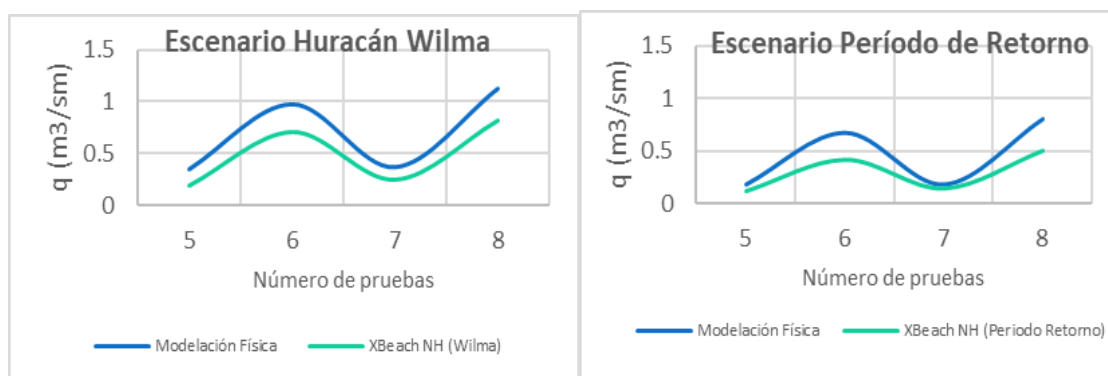


Figura 6: Comparación del caudal de rebase obtenido en la calibración con los resultados de la modelación física, escenarios simulados.

En la comparación gráfica del caudal se observa que el modelo subestima los valores de rebase obtenidos en la modelación física.

A partir de los resultados de la calibración se realizó el proceso de validación demostrándose la capacidad del modelo de reproducir las condiciones hidrodinámicas en el malecón de La Habana en base a la comparación realizada con los estudios de modelación física y cumpliendo con la condición planteada del error absoluto, observándose que para menores alturas de ola y menor nivel inicial (condición de frontera) los resultados son más precisos ya que los errores son menores; en la tabla 3 se muestran los resultados de la validación y en la figura 7 el análisis gráfico en base a la comparación con la modelación física.

Tabla 3: Resultados obtenidos en el proceso de validación de modelo.

Escenario	No. de prueba	n-manning (adim)	maxbrsteep (adim)	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m ³ /sm) XBeach NH	q (m ³ /sm) Modelación Física	Error Absoluto (m ³ /sm)
Huracán Wilma +2,28 m	1	0,016	0,8	1	10	4	0,386	0,53	0,144
	2	0,016	0,8	1	10	5,4	0,626	0,74	0,114
	3	0,016	0,8	1	12	4	0,461	0,60	0,139
	4	0,016	0,8	1	12	5,4	0,626	0,88	0,254
Período de Retorno 1/50 años	1	0,016	0,8	1	10	4	0,241	0,29	0,049
	2	0,016	0,8	1	10	5,4	0,347	0,47	0,123
	3	0,016	0,8	1	12	4	0,265	0,34	0,075
	4	0,016	0,8	1	12	5,4	0,392	0,56	0,168

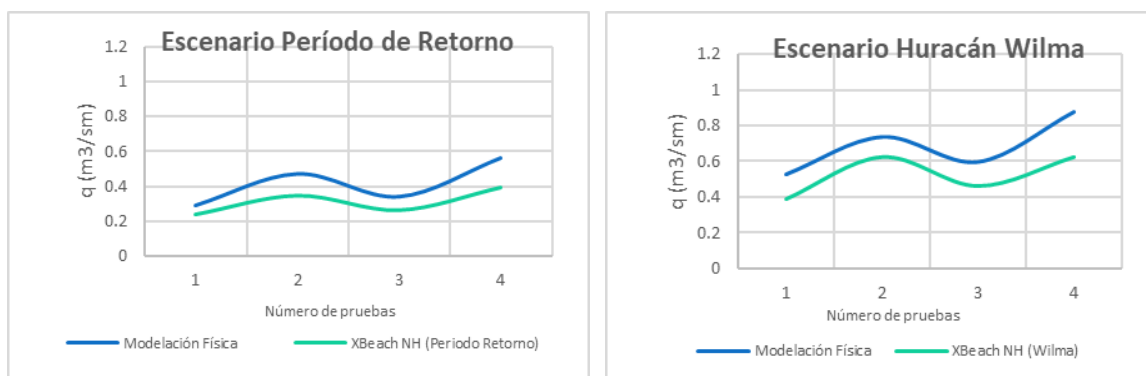


Figura 7: Comparación del caudal de rebase obtenido en la validación con los resultados de la modelación física.

En la figura 7 se evidencia claramente que, en el proceso de validación, aunque se cumple la condición del error absoluto, el modelo subestima los resultados del caudal de rebase obtenidos en los estudios de referencia, aspecto a considerar en la siguiente etapa.

Además de evaluar los resultados del XBeach NH con la modelación física se realizó una comparación con SWASH y las fórmulas de rebase del EurOtop (2018) para muros costeros verticales con una corrección de sus exponentes que fue obtenida en la modelación física (2013) y que se presentó por Montero, 2016 en su tesis de grado, donde el autor utilizó las mismas condiciones de simulación que se emplean en la presente investigación; la comparación de los resultados se muestra en la tabla 4.

Tabla 4: Comparación de los resultados obtenidos con el modelo XBeach NH – SWASH y Fórmulas del EurOtop.

Escenario	No. de prueba	dx (m)	Tp (s)	Hs (m)	q (m ³ /sm) Modelación Física	q (m ³ /sm) XBeach NH	q (m ³ /sm) SWASH	q (m ³ /sm) EurOtop
Huracán Wilma +2,28 m	1	1	10	4	0,53	0,386	0,210	0,280
	2	1	10	5,4	0,74	0,626	0,329	0,560
	3	1	12	4	0,6	0,461	0,293	0,520
	4	1	12	5,4	0,88	0,626	0,474	0,800
Período de Retorno 1/50 años +1,73 m	1	1	10	4	0,29	0,241	0,103	0,120
	2	1	10	5,4	0,47	0,347	0,181	0,350
	3	1	12	4	0,34	0,265	0,167	0,200
	4	1	12	5,4	0,56	0,392	0,279	0,430

Como se puede observar a iguales condiciones de altura de ola, periodo y resolución de malla, XBeach NH arroja mejores resultados en la obtención del caudal de rebase ante el modelo SWASH, duplicándose los valores obtenidos con una mejor aproximación a la modelación física. En la figura 8 se representa de forma gráfica la comparación establecida entre todos los métodos estudiados para ambos escenarios.

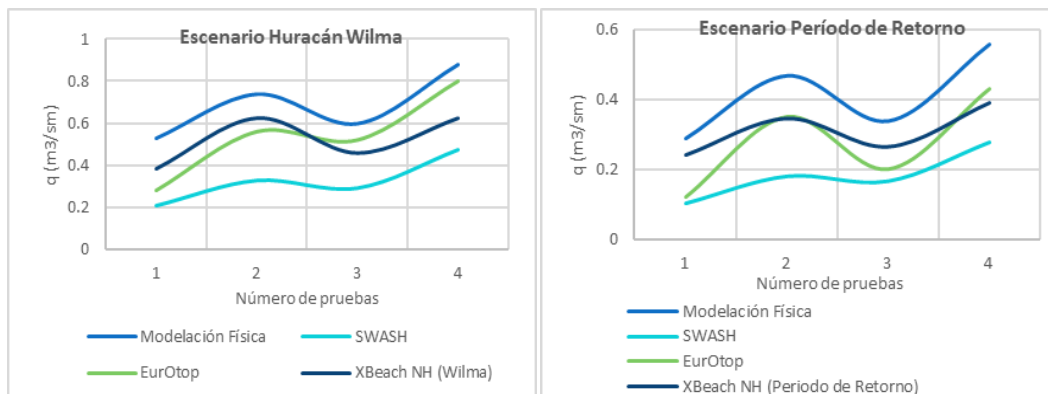


Figura 8: Comparación entre métodos estudiados para la obtención del rebase en los escenarios estudiados.

En el proceso de validación se pudo evidenciar la precisión de los resultados obtenidos con el XBeach siendo esta variante junto con las fórmulas del EurOtop las más acertadas, según figura 8; considerando que las fórmulas representa un régimen cuasi dinámico donde las variables: nivel, altura de ola y periodo pico son fijos y el valor de rebase obtenido representa un volumen de agua que rebasa la estructura y lo hace de forma continua durante el tiempo de simulación, se concluye que el XBeach NH reproduce la hidrodinámica costera y por tanto las condiciones de rebase, al usar el modo No Hidrostático donde a partir de datos de nivel de mar, altura de ola y periodo pico representativos en el tiempo de duración de un evento se puede modelar con precisión cuándo el oleaje rebasa la estructura y cuándo la masa de agua regresa al mar por el fenómeno de reflexión, a pesar de subestimar los valores de referencia obtenidos en la modelación física el uso de este modelo constituye una gran ventaja debido a su régimen semi dinámico que resulta un aspecto de gran importancia en el manejo costero y en el estudio de las inundaciones.

ETAPA II: SIMULACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL REBASE SOBRE EL MURO

En esta etapa partiendo de los resultados de la calibración – validación se estableció el modelo para el caso de estudio definiendo los perfiles característicos representativos de los tramos del malecón a partir de los criterios de selección: representación de las condiciones batimétricas (profundidad – 20 m hasta el muro), cota de coronación del muro y posición frente al oleaje; se trazaron 14 perfiles, su ubicación y distribución que se muestran en la figura 9.

Los tramos se dividieron en subtramos (ver figura 9) y cada subtramo se le asoció una longitud, las características fundamentales de cada subtramo se presentan en la tabla 5.



Figura 9: Ubicación de los perfiles a modelar.

Tabla 5: Características de los subtramos de estudio malecón de La Habana.

Tramo	Subtramo	Cota muro (m)	Longitud muro (m)
2	1	3,10	250
	2	3,35	250
	3	3,60	500
	4	3,75	250
	5	3,80	250
	6	4,10	250
	7	4,43	250
3	1	4,30	1000
	2	4,00	1000
4	1	4,16	250
	2	4,33	250
	3	3,97	750
5	1	3,97	500
	2	3,94	500

A partir de las condiciones de frontera y el establecimiento del modelo se presentan los resultados de la obtención del rebase del muro en el malecón de La Habana en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados del rebase específico en la modelación de los perfiles seleccionados.

Tramo	Sub tramo / Perfil	Cota muro (m)	Longitud muro (m)	Caudal rebase específico q (m ³ /sm)	Caudal rebase específico máximo q (m ³ /sm)
2	Subtramo 1 / Perfil 1	3,10	250	0,066	11,774
	Subtramo 2 / Perfil 2	3,35	250	0,096	14,152
	Subtramo 3 / Perfil 3	3,60	500	0,118	18,299
	Subtramo 4 / Perfil 4	3,75	250	0,133	25,548
	Subtramo 5 / Perfil 5	3,80	250	0,134	17,124
	Subtramo 6 / Perfil 6	4,10	250	0,129	23,042
	Subtramo 7 / Perfil 7	4,43	250	0,177	31,981
3	Subtramo 1 / Perfil 1	4,30	1000	0,048	14,287
	Subtramo 2 / Perfil 2	4,00	1000	0,196	30,325
4	Subtramo 1 / Perfil 1	4,16	250	0,153	22,280
	Subtramo 2 / Perfil 2	4,33	250	0,151	17,141
	Subtramo 3 / Perfil 3	3,97	750	0,246	32,144
5	Subtramo 1 / Perfil 1	3,97	500	0,246	32,144
	Subtramo 2 / Perfil 2	3,94	500	0,116	18,628

Al analizar el comportamiento del caudal específico de rebase por perfiles modelados presentados en la tabla 6, se observa que el rebase no es proporcional a la altura del muro, depende de varios factores como la batimetría, la posición del muro frente al oleaje y la propia trayectoria del evento simulado.

Tramo 2: los mayores rebases se dieron en perfil 7 con $0,177 \text{ m}^3/\text{sm}$ perteneciente al subtramo 7 donde a pesar de tener la cota de coronación del muro más alta para ese tramo el muro se encuentra más cercano a la profundidad de -20 m incidiendo directamente en una mayor altura de ola y en los niveles de rebase, la posición del muro orientado hacia el noroeste posibilitó el incremento del rebase para este fenómeno en específico debido a su trayectoria haciendo que el frente de olas impactará perpendicular a la zona donde se encuentra el perfil; comparando con los récords históricos del huracán, donde se ubicó este perfil, cercano a calle G se observaron grandes volúmenes de inundación, el rebase del muro resultó una de las principales causas de que esto ocurriera.

El análisis de la distribución del rebase en el tiempo modelado, para este perfil en específico, arrojó que el sobrepaso comenzó a partir del día 24 de octubre del 2005 (49,17 horas) en horas de la madrugada (aproximadamente las 6:00 hora local) y se mantuvo por casi 20 horas, en los resultados ola a ola se evidenció que el mayor rebase ocurrido alcanzó los $31,98 \text{ m}^3/\text{sm}$ (aproximadamente a las 17:00 hora local del día 24) y que por más de 10 horas a partir de las 14:00, hora local (día 24) los rebases superaron los $10 \text{ m}^3/\text{sm}$, ver figura 10.

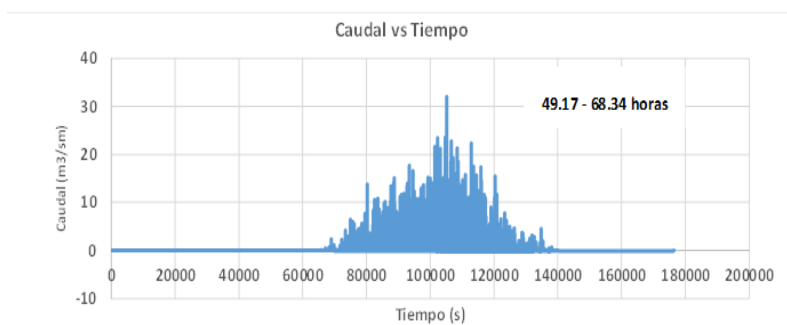


Figura 10: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P7, Sub 7, Tramo 2.

Tramo 3: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 2 del subtramo 2 con $0,196 \text{ m}^3/\text{sm}$ en este caso tuvo mayor influencia la altura del muro y su distancia a la profundidad de -20 m , la posición del muro ubicada más hacia el norte se ve afectado en menor medida por la trayectoria del huracán, este perfil se ubicó frente al Hotel Nacional de Cuba, cercano a calle 23 y como en el caso anterior en la zona se reportaron grandes volúmenes de inundación siendo el rebase una de las causas y el sobrepaso del muro comenzó a partir del día 24 de octubre, el mayor rebase ocurrido alcanzó los $30,32 \text{ m}^3/\text{sm}$ (aproximadamente a las 16:00 hora local, día 24) y por más de 8 horas los rebases superaron los $10 \text{ m}^3/\text{sm}$, ver figura 11.

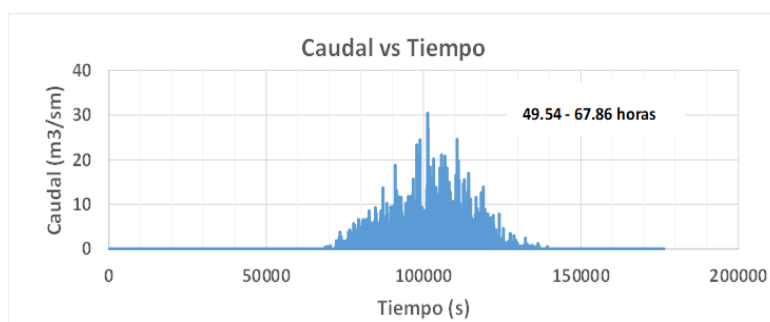


Figura 11: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P2, Sub 2, Tramo 3.

Tramo 4: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 3 del subtramo 3 con $0,246 \text{ m}^3/\text{sm}$ influyendo la altura del muro y la batimetría de la zona, debido a que este un perfil más extendido hacia el muro donde las profundidades son menores, el perfil se encuentra entre las calles Perseverancia y Campanario correspondiente a la zona del Malecón Tradicional, otro de los puntos de mayor inundación. En este caso como se puede ver en la figura 12 los rebases comienzan a darse una hora antes de los perfiles analizados anteriormente, el mayor rebase ocurrido alcanzó los $32,14 \text{ m}^3/\text{sm}$ a las 16:00 hora local del día 24 de octubre y por más de 10 horas los rebases superaron los $15 \text{ m}^3/\text{sm}$.

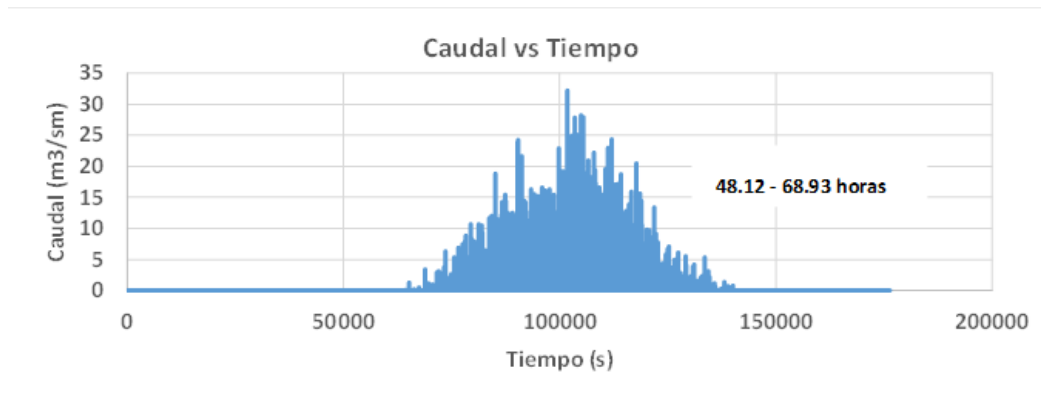


Figura 12: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P3, Sub 3, Tramo 4.

Tramo 5: el mayor rebase específico se obtuvo en el perfil 1 del subtramo 1 con $0,246 \text{ m}^3/\text{sm}$ influyendo la altura del muro, la batimetría de la zona y la trayectoria del huracán respecto a la posición del muro en sentido noroeste, el perfil también se encuentra entre las calles Crespo y Genios correspondiente a la zona del Malecón Tradicional. En la figura 13 se muestra tal como en el caso anterior que los rebases comienzan una hora antes respecto a los tramos 2 y 3, el mayor rebase ocurrido alcanzó los $32,14 \text{ m}^3/\text{sm}$ aproximadamente a las 16:00 hora local del 24 de octubre y por de 8 horas del mismo día los rebases superaron los $15 \text{ m}^3/\text{sm}$.

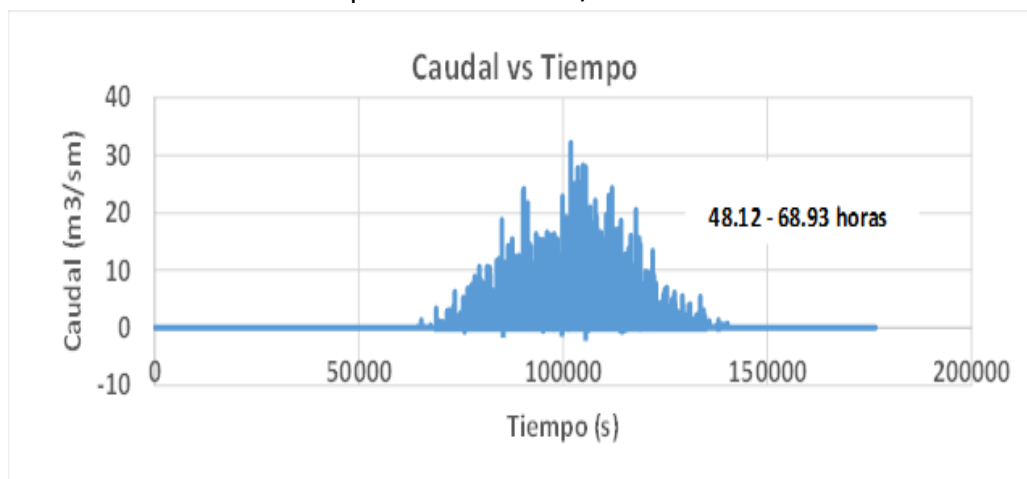


Figura 13: Representación gráfica del rebase específico en el tiempo simulado, P1, Sub 1, Tramo 5.

De forma general en los perfiles donde se dieron los mayores rebases específicos, el mayor valor ocurrió alrededor de las 16:00 horas, hora local y los rebases se mantuvieron durante aproximadamente 20 horas del día 24 de octubre de 2005.

Seguidamente se presenta el rebase específico por perfiles modelados y su distribución por tramos y subtramos, donde se evidencian los perfiles que arrojaron mayor rebase correspondientes al análisis anterior.

A partir del rebase específico se obtuvo el rebase promedio por subtramos y tramos, ver tabla 7.

Tabla 7: Resultados rebase promedio malecón de La Habana.

Tramo	Sub tramo / Perfil	Caudal rebase promedio subtramos (m ³ /s)	Caudal rebase promedio tramos (m ³ /s)
2	Subtramo 1 / Perfil 1	16,50	272,35
	Subtramo 2 / Perfil 2	24,00	
	Subtramo 3 / Perfil 3	88,50	
	Subtramo 4 / Perfil 4	33,35	
	Subtramo 5 / Perfil 5	33,50	
	Subtramo 6 / Perfil 6	32,25	
	Subtramo 7 / Perfil 7	44,25	
3	Subtramo 1 / Perfil 1	48,00	244,00
	Subtramo 2 / Perfil 2	196,00	
4	Subtramo 1 / Perfil 1	38,25	260,50
	Subtramo 2 / Perfil 2	37,75	
	Subtramo 3 / Perfil 3	184,50	
5	Subtramo 1 / Perfil 1	123,00	181,00
	Subtramo 2 / Perfil 2	58,00	
Total			957,85

Según los resultados obtenidos para las 49 horas modeladas del huracán Wilma y su influencia en el área del malecón de La Habana el caudal de rebase total fue de 957,85 m³/s.

Al incluir en el análisis la longitud que se le asocia a cada perfil, se evidencia una gran influencia en los resultados del rebase promedio; aplicando un mismo valor de rebase a un subtramo previamente definido, en los puntos donde este fue superior y se seleccionó una longitud más extensa, se encontrarán los mayores sobrepasos (comportamiento aplicable para el caso contrario); por lo que resulta de especial atención la discretización de los tramos y subtramos para simular de forma más acercada la realidad. Ver figura 14, representación del rebase promedio por subtramos.

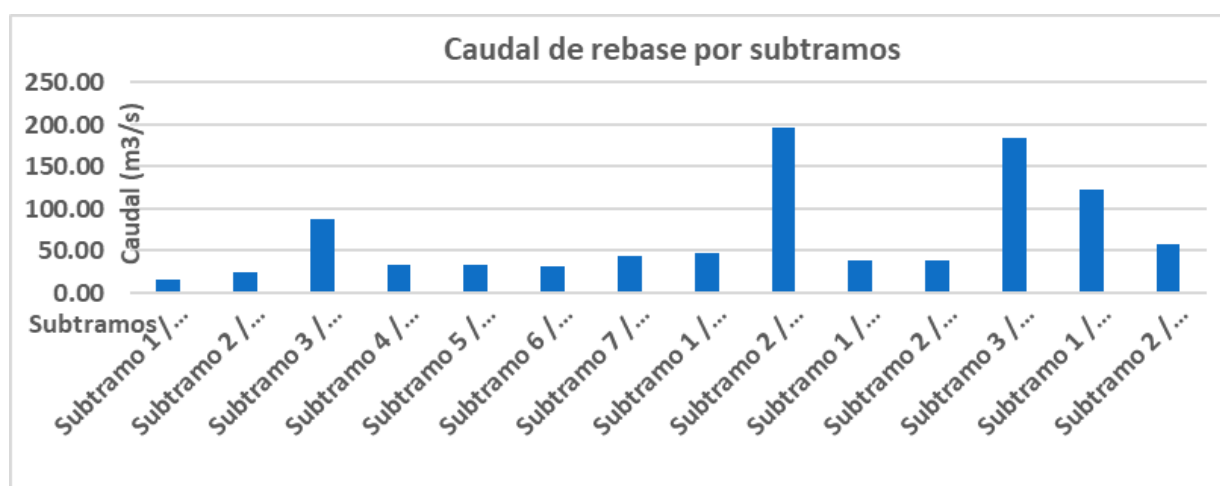


Figura 14: Rebase promedio por subtramos malecón de la Habana.

Los mayores rebases se localizaron en el subtramo 2 del tramo 3, en el subtramo 3 del tramo 4 y subtramo 1 del tramo 5, tomando en consideración lo explicado del efecto del rebase específico y la

longitud asociada a cada perfil; el peor escenario por tramos se dio en el tramo 2, seguido del tramo 4, 3 y 5.

04 CONCLUSIONES

El modelo XBeach NH se calibró para el caso de estudio obteniéndose los valores de los parámetros: $dx=1\text{m}$, $maxbrsteep=0,8$ y $n=0,016$; siendo la resolución de la malla y el parámetro de rompiente de la ola los de mayor importancia en la calibración del modelo.

El modelo XBeach NH se validó para el caso de estudio en base a la evaluación realizada con los resultados de la modelación física de 2013.

Los resultados del rebase por tramos del malecón proyectaron un peor escenario en cuanto al rebase específico en el tramo 2 de calle 12 a calle J, el valor más elevado en este tramo fue $0,177\text{ m}^3/\text{sm}$ en el subtramo 7 cercano a calle G.

Los mayores rebases específicos en el resto de los tramos se presentaron en: tramo 3, subtramo 2, frente al Hotel Nacional: $0,196\text{ m}^3/\text{sm}$; tramo 4, subtramo 3, entre las calles Perseverancia y Campanario: $0,246\text{ m}^3/\text{sm}$; tramo 5, subtramo 1, entre las calles Crespo y Genios: $0,246\text{ m}^3/\text{sm}$.

El rebase total obtenido fue de $957,85\text{ m}^3/\text{s}$; los mayores rebases por tramos se dieron en el tramo 2 con $272,25\text{ m}^3/\text{s}$, seguido del tramo 4 con $260,50\text{ m}^3/\text{s}$, el 3 con $244,00\text{ m}^3/\text{s}$ y el 5 con $181,00\text{ m}^3/\text{s}$.

El uso del XBeach NH presenta ventajas en su aplicación ante otros métodos fundamentado por el dinamismo del modelo y la reproducción de forma acertada de la hidrodinámica costera y la interacción del oleaje – estructura.

05 REFERENCIAS

- Montero D.A.** (2016). Determinación del Rebase del oleaje en el malecón Tradicional Habanero, mediante la aplicación del modelo Matemático SWASH. Cuba, 118 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Cuba
- Morejón M. B.I.** (2020). Estudio del sobrepaso del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Irma 2017 aplicando el modelo Delft3D. Cuba, 134 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Cuba
- Orta P. C.** (2020). Estudio del fenómeno del rebase promedio del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Wilma 2005 aplicando el modelo Delft 3D. Cuba, 116 pp., Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero Hidráulico), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. Cuba
- Roelvink J.A., McCall R., Masselink G., Poate T.G., Almeida L.P., Davidson M. and Russel P.E.** (2014). “Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G”. Coastal Engineering, 91 (2014) 231-250. The Netherlands.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

[Luis Fermín Córdova López](https://orcid.org/0000-0001-8175-6819)

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

[Daykelin León Arias](https://orcid.org/0009-0002-3737-6362)

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación y en la redacción final del informe.