

Campo de oleaje en la bahía de La Habana para diferentes escenarios climáticos

Dr. Ing. Luis F. Córdova López
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae)
e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ing. Yinelis González Estopiñán
Unidad Presupuestada Inversionista: Avenida del Puerto
Oficina del Historiador de la Ciudad
e-mail: yinelis@upi.ohc.cu

RESUMEN

El trabajo presenta un estudio del campo de oleaje para diferentes escenarios en la bahía de la Habana, Cuba. Se realiza el análisis para diferentes condiciones climáticas y períodos de retorno de eventos extremos, incluyendo la sobre-elevación del mar debido al cambio climático. Los resultados del trabajo serán de gran utilidad para el diseño de las futuras obras que se ejecutarán en la bahía de La Habana. La simulación de los diferentes escenarios se lleva a cabo mediante la aplicación del modelo matemático SWAN, establecido sobre una malla de cómputo curvilínea que permite una mejor representación de las variaciones en la línea de costa.

Palabras clave: bahía, modelo matemático, oleaje, vientos.

Wave Field in Havana bay for different climatic scenarios

ABSTRACT

This work presents a study of the wave field for different scenarios in Havana bay, Cuba. The analysis is carried out for different climatic conditions and return periods of extreme events, including sea uprise due to climatic change. The results of this work will be of great help for the design of future works that will be executed in Havana bay. The simulation of the different scenarios is performed by means of the application of the mathematical model SWAN, which has been set over a curvilinear computational mesh which allows a better representation of variations in the coast line.

Keywords: bay, mathematical model, waves, winds.

INTRODUCCIÓN

La Habana, capital del país, está bordeada totalmente al Norte por el mar, por lo que existe un alto riesgo de inundaciones debido al oleaje generado en el golfo de México. A esta situación se le agrega la alta urbanización de su litoral y el marcado desarrollo turístico que tendrá lugar en el transcurso de los próximos años, fundamentalmente en el interior de la bahía de La Habana, a partir del Programa Inversionista Avenida del Puerto, creado con el fin de recuperar las instalaciones portuarias en desuso y la imagen de esta importante zona de la ciudad, además de la reconversión del puerto de La Habana en puerto madre de la actividad de cruceros en la región y puerto turístico por excelencia (OHCH 2012).

Para enfrentar esta problemática se realiza el presente estudio, el cual va dirigido a la simulación del oleaje en la bahía de La Habana. Por el peligro que representa desde el punto de vista hidráulico el impacto del oleaje en las estructuras futuras se escogen una serie de períodos de retorno que pueden ser seleccionados para el diseño y la construcción de futuras obras, tanto en el marco de los próximos años, así como para los años 2050 y 2100 donde se espera un ascenso del nivel medio del mar debido al cambio climático.

DESARROLLO

Descripción del área de estudio

La bahía de La Habana es una bahía típica ubicada en la costa Noroeste cubana. Posee un área aproximada de 5,1 km² y una profundidad media de 8,6 m. Está conformada por 3 lóbulos o ensenadas (Atarés, Guasabacoa y Marimelena), una región central, y un canal de entrada recto y estrecho que con una orientación Noroeste - Sureste, la comunica con el mar adyacente. El canal tiene un ancho casi constante de 310 m y un largo aproximado de 1,597 km; fue dragado para permitirle el acceso a los buques de gran calado y sus profundidades máximas oscilan entre 10 y 18 m. Está situada en una costa abrasiva con terrazas coralinas de seboruco o diente de perro; su margen derecha (Este) es acantilada, y la izquierda (Oeste) es baja, llana y protegida por un malecón de hormigón. De todos los ríos que desembocan a la bahía, sólo cobran alguna importancia por sus aportes el Luyanó, el Martín Pérez y el arroyo Tadeo, creciendo sus volúmenes de descarga en épocas de abundantes precipitaciones. Sin embargo, las aguas procedentes del escurrimiento superficial de las alturas del Morro y La Cabaña, al Este, y las provenientes del alcantarillado pluvial (drenes) de la ciudad, que descargan directamente a la bahía y al canal, aumentan cuantiosamente el caudal de agua dulce que recibe constantemente la bahía alterando la estructura termohalina de sus aguas y, en consecuencia, su patrón de circulación. Las ensenadas de Atarés y Guasabacoa son las que reciben el mayor volumen de estas aguas (Espinosa y García 1983).

En la figura 1 se muestra la región en donde se sitúan los llamados puntos de interés que constituyen zonas en donde tendrán lugar obras desarrolladas dentro del proyecto integral de la Oficina del Historiador, y que, por estar ubicados en zonas de peligro dada la incidencia del oleaje y los vientos, serán analizados en el presente trabajo.

Modelo de propagación de oleaje SWAN

SWAN, acrónimo de SimulatingWavesNearshore, es también un modelo de tercera generación que describe la evolución del espectro de energía del oleaje tomando en cuenta las condiciones del viento, corrientes y batimetría, calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales. Permite obtener estimados reales de los parámetros de las olas en áreas costeras, lagos y estuarios (Lamazares 2009). Dentro de los principales procesos de *generación* y

disipación que tiene en cuenta el modelo están: la generación por viento, disipación por corte de la zona de espuma de la cresta por el viento (whitecapping), disipación por rompiente de la ola debido al fondo y producto de la fricción con el fondo, además de la interacción ola-ola tanto en aguas profundas como en aguas poco profundas (Rodríguez 2009). Mientras que, de los procesos de *propagación* de oleaje que SWAN incluye, están la difracción: propagación a través de un espacio geográfico y además la refracción y pérdidas de profundidad debidas a variaciones espaciales en el fondo y las corrientes.



Figura 1. Puntos de interés (tomada de Google)

Establecimiento del modelo SWAN

Para modelar la bahía con mayor precisión se emplea una malla de cómputo de cuadrícula curvilínea. Esto hace posible modelar mejor las formas irregulares en la bahía, lo que cobra importancia en la visualización de los patrones de oleaje en todo el recinto portuario.

El modelo tiene tres límites abiertos, dos son perpendiculares a la costa y uno es paralelo (figura 2). En la colocación de las fronteras es crucial considerar la distancia que existe hasta el área de interés para evitar problemas con posibles ondas reflejadas (Delft TU 2007). En este caso se define frontera tipo Neumann o abierta para los bordes laterales evitando la situación antes

mencionada y en el caso de la frontera principal está colocada en aguas profundas para evitar efectos del fondo sobre el oleaje.

Se usaron dos series de batimetría, una correspondiente a toda la bahía y otra que le pertenece al área del malecón ubicado en las proximidades del canal de entrada de la bahía. Convirtiendo estas series de datos a coordenadas UTM, combinándolas y ajustándolas de forma precisa se obtuvo la batimetría de toda el área de estudio (figura 3).

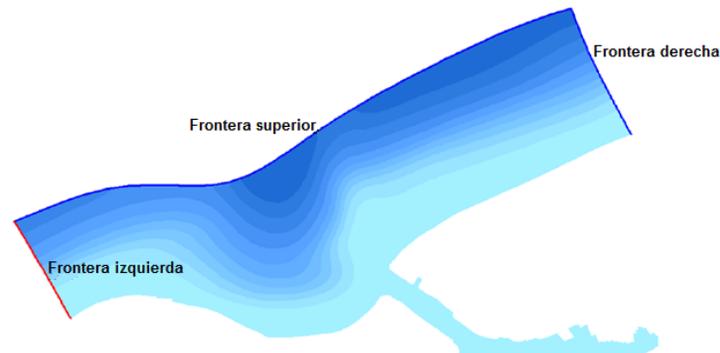


Figura 2. Fronteras del modelo

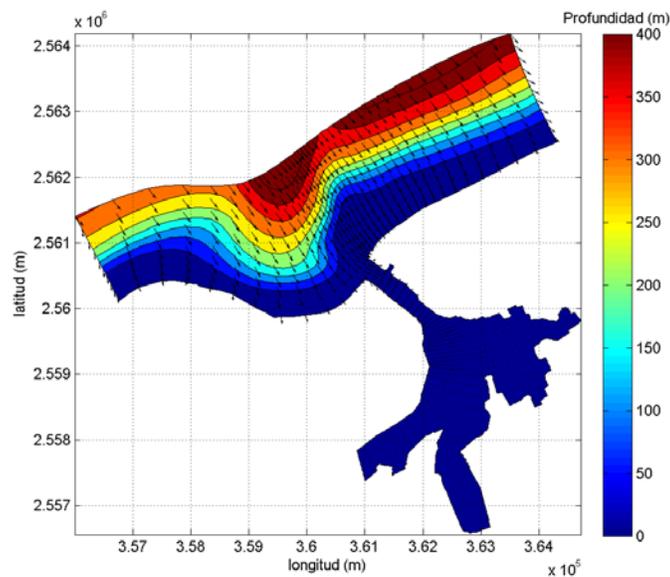


Figura 2. Batimetría de la zona de estudio

Diseño de la investigación

Todos los casos se desarrollan para la condición de pleamar como estado inicial del nivel del mar, correspondiente a un valor de 0,30 m por encima del nivel medio del mar. Se definen tres direcciones del viento y del oleaje (Norte, Noreste y Noroeste). Los escenarios son condicionados de forma tal que se incrementa el nivel de peligro o amenaza. Por último se incluye el efecto del cambio climático. El *Escenario 1* se denomina: Oleaje generado por el viento local promedio anual, en donde se analizará el efecto que tendrá el viento como generador de oleaje en condiciones medias, lo que equivale a una velocidad promedio de 5,2 m/s. El *Escenario 2*: Oleaje generado por vientos extremos locales, está asociado a los períodos de retorno 10, 20, 50 y 100 años. Se considera la sobre-elevación para la condición de ocurrencia de marea de tormenta vinculada a huracanes. El *Escenario 3*: Combinación de oleaje generado en

aguas profundas, viento local asociado a eventos extremos y sobre-elevación debido a huracanes, tiene incorporados los períodos de retorno 10, 20, 50 y 100 años. Además incluye igualmente la sobre-elevación para la condición de ocurrencia de marea de tormenta vinculada a huracanes. El *Escenario 4*: Efecto del incremento del nivel medio del mar, debido al cambio climático, sobre el campo de oleaje en la bahía. Se simula el comportamiento de la sobre-elevación de nivel del mar debido al cambio climático para los años 2050 y 2100, donde se espera una sobre-elevación del nivel medio del mar de 0,27 m y 0,85 m respectivamente. Se aplican las condiciones del *Escenario 3*. En la tabla 1 se muestran las condiciones iniciales para los *Escenarios 2, 3 y 4*.

Tabla 1. Condiciones iniciales para los Escenarios 2, 3 y 4

| Escenario 4 | | | | | | |
|-----------------------------|------------|------------------------|--------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Escenario 3 | | | | | | |
| Escenario 2 | | | | | | |
| Frecuencia (1 caso/años) | V (m/s) | Sobre-elevación (m) | Hs (m) | Tm (s) | Sobre-elevación total 2050 (m) | Sobre-elevación total 2100 (m) |
| 1/10 | 21 | 1,1 | 7,95 | 10,57 | 1,37 | 1,95 |
| 1/20 | 25 | 1,9 | 9,06 | 10,98 | 2,17 | 2,75 |
| 1/50 | 34 | 2,6 | 10,34 | 11,04 | 2,87 | 3,45 |
| 1/100 | 42 | 3,3 | 11,93 | 11,55 | 3,57 | 4,15 |

Hs: Altura de ola significativa. Tm: Período medio del oleaje.

Análisis de los resultados

Se presenta la discusión de los resultados de los diferentes escenarios modelados.

Escenario 1: Oleaje generado por el viento local promedio anual. Como se puede observar en la figura 4, es fácil notar de forma general la poca influencia que tendrá para cada punto de interés el oleaje en condiciones medias, por ser las alturas de olas prácticamente insignificantes. Presenta la *Terminal de cruceros* la altura de ola mayor, con un valor de 0,13 m para la dirección Norte del viento, mientras que en dirección Noreste, tanto las *Marinas* como la *Terminal de ferrys internacional* serán los puntos en donde se desarrollarán olas de 0,14 m de alto. En dirección Noroeste, la *Entrada del canales* presentará olas de mayor altura con 0,14 m, lo que obviamente era de esperar por estar la bahía situada en dicha dirección, mientras que al analizar los puntos mencionados donde se llevarán a cabo construcciones de gran envergadura, sólo el *Paseo marítimo* alcanza un valor de 0,09 m de altura de ola, lo que resulta insignificante. En general, se concluye que para condiciones medias del viento, la dirección Noroeste presenta las olas de mayor altura para la zona del canal de entrada, mientras que para su interior será la dirección Noreste.

Escenario 2: Oleaje generado debido al viento local para condiciones extremas en el área de la bahía de La Habana. Los resultados se muestran en las tablas 2 y 3 para cada uno de los puntos de interés. En las tablas se han resaltado las mayores alturas de olas en cada dirección del viento. La dirección Noreste es la más desfavorable para las zonas de interés dentro de la bahía, donde se deberá prestar especial atención al área que ocupa las *Marinas* por ser la que presenta mayor peligro ante el impacto del oleaje con olas de altura entre 0,41 m y 0,95 m.

Escenario3: Combinación de los efectos de la propagación del oleaje desde aguas profundas y la generación de éste debido al viento local. En las tablas 4 y 5 se presentan los resultados de las simulaciones, donde se combinan los efectos de la propagación del oleaje desde aguas profundas y la generación de éste debido al viento. Se han resaltado también las mayores alturas de olas en cada dirección del viento. La dirección más desfavorable para el canal de entrada en este escenario será la Noroeste, por ser la dirección que provoca olas de gran altura sin sufrir el efecto de la difracción. Sin embargo, no es así para las zonas en donde habrá desarrollo estructural, ya que para estos puntos la dirección más perjudicial es la Noreste para todos los períodos de retorno.

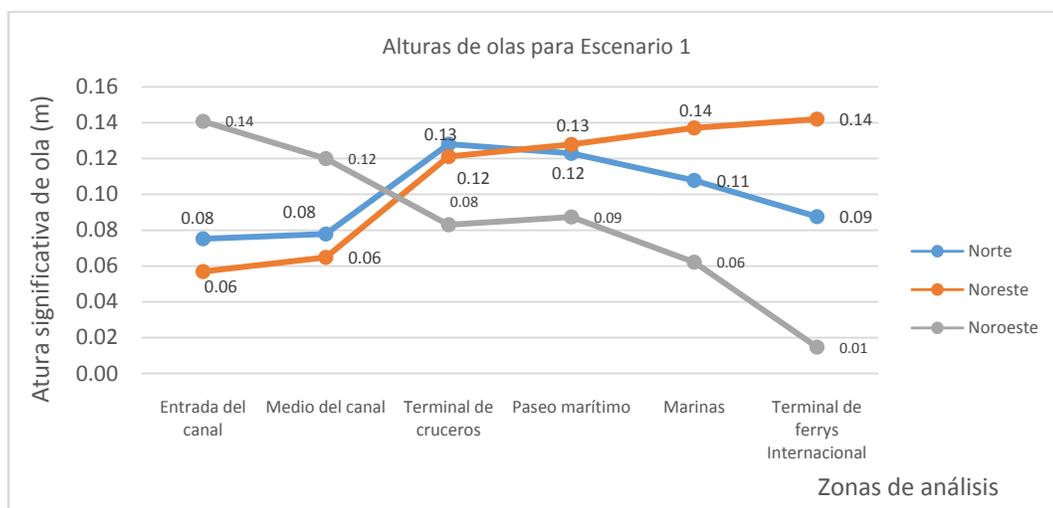


Figura 3. Resultados del Escenario 1

Tabla 2. Resultados del Escenario 2

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años). | Norte | | Noreste | | Noroeste | |
|----------------------|-----------------------------|-------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) |
| Entrada del canal | 10 | 0,49 | 2,19 | 0,38 | 1,96 | 0,87 | 2,90 |
| | 20 | 0,61 | 2,39 | 0,48 | 2,20 | 1,08 | 3,16 |
| | 50 | 0,90 | 2,87 | 0,74 | 2,65 | 1,57 | 3,69 |
| | 100 | 1,20 | 3,28 | 1,00 | 3,03 | 2,04 | 4,09 |
| Medio del canal | 10 | 0,40 | 1,87 | 0,33 | 1,78 | 0,69 | 2,62 |
| | 20 | 0,49 | 2,04 | 0,42 | 1,92 | 0,84 | 2,87 |
| | 50 | 0,70 | 2,39 | 0,63 | 2,18 | 1,16 | 3,31 |
| | 100 | 0,90 | 2,65 | 0,82 | 2,45 | 1,46 | 3,64 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,40 | 1,77 | 0,58 | 2,28 | 0,34 | 1,79 |
| | 20 | 0,49 | 1,90 | 0,73 | 2,47 | 0,43 | 1,87 |
| | 50 | 0,68 | 2,18 | 1,04 | 2,90 | 0,59 | 2,15 |
| | 100 | 0,89 | 2,45 | 1,35 | 3,23 | 0,76 | 2,41 |

Comparación de los Escenarios 2 y 3

A continuación se compara el *Escenario 2* con el *Escenario 3* para todos los períodos de retorno estudiados, con el fin de analizar el impacto de la propagación del oleaje de aguas

profundas dentro de la bahía de La Habana. Esta comparación se efectúa para la dirección Noroeste del viento y del oleaje, por ser ésta la dirección donde el oleaje propagado desde aguas profundas es menos afectado por los fenómenos de refracción y difracción, con lo que pierde menos energía y puede penetrar más al interior de la bahía. En la tabla 6 se muestra la comparación de las alturas de olas en el canal de entrada y en la tabla 7 las alturas de olas para los puntos interiores de la bahía.

Tabla 3. Resultados del Escenario 2

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años). | Norte | | Noreste | | Noroeste | |
|----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) |
| Paseo marítimo | 10 | 0,49 | 2,01 | 0,66 | 2,39 | 0,38 | 1,87 |
| | 20 | 0,59 | 2,17 | 0,81 | 2,60 | 0,47 | 1,98 |
| | 50 | 0,82 | 2,50 | 1,16 | 3,04 | 0,64 | 2,26 |
| | 100 | 1,08 | 2,80 | 1,50 | 3,38 | 0,83 | 2,52 |
| Marinas | 10 | 0,57 | 2,25 | 0,71 | 2,52 | 0,41 | 1,86 |
| | 20 | 0,70 | 2,45 | 0,87 | 2,75 | 0,51 | 2,02 |
| | 50 | 0,98 | 2,83 | 1,25 | 3,20 | 0,73 | 2,31 |
| | 100 | 1,26 | 3,16 | 1,61 | 3,55 | 0,95 | 2,58 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,50 | 2,15 | 0,69 | 2,52 | 0,27 | 1,44 |
| | 20 | 0,61 | 2,35 | 0,84 | 2,74 | 0,34 | 1,51 |
| | 50 | 0,85 | 2,66 | 1,17 | 3,14 | 0,48 | 1,69 |
| | 100 | 1,08 | 2,91 | 1,47 | 3,44 | 0,62 | 1,93 |

Tabla 4. Resultados del Escenario 3

| Puntos de interés | Períodos de retorno(años) | Norte | | Noreste | | Noroeste | |
|----------------------|---------------------------|-------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) |
| Entrada del canal | 10 | 4,19 | 9,54 | 3,37 | 9,64 | 4,42 | 9,35 |
| | 20 | 4,68 | 9,89 | 3,84 | 9,98 | 5,02 | 9,69 |
| | 50 | 5,18 | 9,99 | 4,28 | 10,01 | 5,71 | 9,79 |
| | 100 | 5,79 | 10,37 | 4,81 | 10,32 | 6,48 | 10,17 |
| Medio del canal | 10 | 1,49 | 8,03 | 1,23 | 8,28 | 1,45 | 7,40 |
| | 20 | 1,70 | 8,20 | 1,46 | 8,38 | 1,69 | 7,52 |
| | 50 | 1,99 | 7,91 | 1,75 | 7,60 | 2,05 | 7,12 |
| | 100 | 2,26 | 7,93 | 2,06 | 7,57 | 2,36 | 7,04 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,64 | 2,89 | 0,71 | 2,77 | 0,56 | 3,09 |
| | 20 | 0,75 | 3,13 | 0,87 | 2,99 | 0,65 | 3,47 |
| | 50 | 0,96 | 3,26 | 1,17 | 3,25 | 0,84 | 3,57 |
| | 100 | 1,19 | 3,44 | 1,47 | 3,54 | 1,02 | 3,71 |

Como se observa en la tabla 6 es notable la influencia de la propagación del oleaje desde aguas profundas en todo el canal de entrada, lo que resulta lógico pues el canal de la bahía se encuentra colindando con mar abierto.

Tabla 5. Resultados del Escenario 3

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años). | Norte | | Noreste | | Noroeste | |
|----------------------------------|-----------------------------|-------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) | Hs(m) | Tm(s) |
| Paseo marítimo | 10 | 0,63 | 2,59 | 0,73 | 2,64 | 0,51 | 2,53 |
| | 20 | 0,72 | 2,75 | 0,88 | 2,86 | 0,61 | 2,76 |
| | 50 | 0,95 | 2,96 | 1,22 | 3,19 | 0,78 | 2,95 |
| | 100 | 1,20 | 3,20 | 1,56 | 3,51 | 0,95 | 3,07 |
| Marinas | 10 | 0,64 | 2,46 | 0,75 | 2,61 | 0,47 | 2,09 |
| | 20 | 0,75 | 2,62 | 0,91 | 2,84 | 0,57 | 2,26 |
| | 50 | 1,01 | 2,93 | 1,27 | 3,25 | 0,79 | 2,48 |
| | 100 | 1,28 | 3,23 | 1,62 | 3,58 | 0,99 | 2,69 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,53 | 2,27 | 0,70 | 2,56 | 0,29 | 1,53 |
| | 20 | 0,63 | 2,42 | 0,84 | 2,77 | 0,36 | 1,61 |
| | 50 | 0,84 | 2,66 | 1,13 | 3,10 | 0,50 | 1,77 |
| | 100 | 1,06 | 2,89 | 1,45 | 3,42 | 0,65 | 1,99 |

Para el caso de los puntos interiores de la bahía se concluye que el oleaje propagado desde aguas profundas no es un factor determinante en la altura de ola, sino que es el viento en condiciones extremas. Esto sucede debido a la disipación de energía del oleaje que se produce en el canal de la bahía por efecto de la difracción, ver tabla 7.

Tabla 6. Alturas de olas en la zona del canal para los Escenarios 2 y 3

| Puntos de Interés | Período de retorno (años) | Escenario 2(m) | Escenario 3(m) |
|-------------------|---------------------------|----------------|----------------|
| Entrada del canal | 10 | 0,87 | 4,42 |
| | 20 | 1,08 | 5,02 |
| | 50 | 1,57 | 5,71 |
| | 100 | 2,04 | 6,48 |
| Medio del canal | 10 | 0,69 | 1,45 |
| | 20 | 0,84 | 1,69 |
| | 50 | 1,16 | 2,05 |
| | 100 | 1,46 | 2,36 |

Escenario 4: Efecto del incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático sobre el campo de oleaje en la bahía.

De las tres direcciones estudiadas, en este escenario y para el año 2050 (ver tabla 8) se destaca la Noroeste como la más desfavorable para la zona del canal de la bahía (con alturas de olas que van desde 1,48 m hasta 6,54 m). Pero en cuanto a las zonas con desarrollo futuro, sin duda alguna, la dirección Noreste es la más desfavorable.

En este escenario tanto para el año 2050 como para el 2100 en la dirección más desfavorable para el canal de entrada (Noroeste), se desarrollan alturas de olas relativamente similares, pero con un ligero ascenso en el 2100 de aproximadamente 0,10 m (ver tabla 9).

En la dirección Noreste (dirección más crítica para los puntos del interior de la bahía en ambos años), el comportamiento de las alturas de olas es muy similar.

Comparación de las alturas de olas en los Escenarios 3 y 4

En este apartado se evalúa el impacto de la sobre-elevación del nivel del mar debido al cambio climático para los años 2050 y 2100 sobre las condiciones de oleaje. Para ello se comparan los *Escenarios 3 y 4* en dirección Noroeste del viento y del oleaje por ser la dirección más desfavorable por efecto de propagación del oleaje desde aguas profundas. Véase la tabla 10 para los puntos ubicados en el canal de entrada y la tabla 11 para las zonas de estudio más críticas del interior de la bahía en los períodos de retorno estudiados.

Tabla 7. Alturas de olas en los puntos interiores de la bahía para los Escenarios 2 y 3

| Puntos de Interés | Período de retorno (años) | Escenario 2 (m) | Escenario 3 (m) |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Terminal de cruceros | 10 | 0,34 | 0,56 |
| | 20 | 0,43 | 0,65 |
| | 50 | 0,59 | 0,84 |
| | 100 | 0,76 | 1,02 |
| Paseo marítimo | 10 | 0,38 | 0,51 |
| | 20 | 0,47 | 0,61 |
| | 50 | 0,64 | 0,78 |
| | 100 | 0,83 | 0,95 |
| Marinas | 10 | 0,41 | 0,47 |
| | 20 | 0,51 | 0,57 |
| | 50 | 0,73 | 0,79 |
| | 100 | 0,95 | 0,99 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,27 | 0,29 |
| | 20 | 0,34 | 0,36 |
| | 50 | 0,48 | 0,50 |
| | 100 | 0,62 | 0,65 |

Se concluye del análisis anterior que la sobre-elevación del nivel del mar causará incrementos muy pequeños de las alturas de olas. Esto no excluye la necesidad de analizar la repercusión del efecto de la sobre-elevación sobre otros aspectos tales como los relacionados con el funcionamiento del sistema de drenaje pluvial que descarga en el área, las zonas posibles a inundarse en la franja costera y los rebases producto del oleaje en la línea de costa que actualmente posee como obra de defensa el muro costero.

Para esta zona se observa que la sobre-elevación del nivel del mar casi tendrá un efecto nulo en la generación de olas. En el caso de la *Terminal de ferrys internacional* el comportamiento será muy similar que en el descrito para la zona de las *Marinas*. Se concluye del análisis que no hay diferencia notable en el campo de olas, lo que no significa que sea irrelevante para el estudio de las inundaciones, ya que los valores de rebase del oleaje sobre una estructura no solo dependen de las características de las olas, sino también del borde libre de la obra (Córdova 2010).

En el caso de los escenarios de cambio climático, el incremento del nivel medio del mar junto a la sobre-elevación esperada para los períodos de retorno estudiados, implica una disminución sustancial del bordo libre, por lo que se prevé que se generen importantes sobrepasos del oleaje, independientemente de que las alturas de olas para los escenarios analizados sean similares.

Tabla 8. Resultados de la simulación del Escenario 4 para el 2050

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años) | Norte | | Noreste | | Noroste | |
|----------------------------------|----------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) |
| Entrada del canal | 10 | 4,23 | 9,56 | 3,39 | 9,66 | 4,46 | 9,36 |
| | 20 | 4,74 | 9,91 | 3,87 | 9,99 | 5,06 | 9,71 |
| | 50 | 5,23 | 10,00 | 4,32 | 10,02 | 5,76 | 9,80 |
| | 100 | 5,85 | 10,39 | 4,87 | 10,35 | 6,54 | 10,19 |
| Medio del canal | 10 | 1,52 | 8,11 | 1,24 | 8,38 | 1,48 | 7,50 |
| | 20 | 1,73 | 8,30 | 1,47 | 8,49 | 1,72 | 7,60 |
| | 50 | 2,02 | 8,00 | 1,77 | 7,72 | 2,08 | 7,21 |
| | 100 | 2,30 | 8,03 | 2,08 | 7,65 | 2,40 | 7,13 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,65 | 2,94 | 0,72 | 2,79 | 0,57 | 3,14 |
| | 20 | 0,75 | 3,19 | 0,87 | 3,01 | 0,66 | 3,55 |
| | 50 | 0,97 | 3,31 | 1,17 | 3,27 | 0,85 | 3,65 |
| | 100 | 1,20 | 3,49 | 1,48 | 3,55 | 1,03 | 3,79 |
| Paseo marítimo | 10 | 0,64 | 2,61 | 0,73 | 2,65 | 0,53 | 2,58 |
| | 20 | 0,73 | 2,77 | 0,89 | 2,87 | 0,62 | 2,80 |
| | 50 | 0,95 | 2,98 | 1,22 | 3,20 | 0,78 | 2,98 |
| | 100 | 1,21 | 3,22 | 1,56 | 3,52 | 0,96 | 3,12 |
| Marinas | 10 | 0,64 | 2,47 | 0,75 | 2,62 | 0,48 | 2,12 |
| | 20 | 0,76 | 2,63 | 0,91 | 2,85 | 0,58 | 2,27 |
| | 50 | 1,01 | 2,93 | 1,27 | 3,25 | 0,79 | 2,49 |
| | 100 | 1,28 | 3,23 | 1,63 | 3,59 | 1,00 | 2,70 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,53 | 2,28 | 0,70 | 2,56 | 0,29 | 1,54 |
| | 20 | 0,63 | 2,42 | 0,84 | 2,77 | 0,36 | 1,62 |
| | 50 | 0,84 | 2,66 | 1,13 | 3,10 | 0,50 | 1,77 |
| | 100 | 1,07 | 2,89 | 1,45 | 3,42 | 0,65 | 2,00 |

Escenario 5: A partir del análisis desarrollado para los anteriores escenarios se propone el estudio de la combinación del oleaje propagado desde aguas profundas en dirección Noroeste, unida al efecto del viento local en dirección Noreste, surgiendo de esta manera un nuevo escenario. La combinación del oleaje propagado desde aguas profundas desde la dirección Noroeste unido a la influencia del viento local en dirección Noreste, genera alturas de olas apreciables en la zona de *Entrada del canal* (4,26 m - 6,06 m), ver tabla 12.

Mientras, el efecto de la propagación del oleaje, como ya se explicó, no tiene influencia sobre los puntos del interior de la bahía, por tanto es solamente el viento local en dirección Noreste el que conduce olas de menor altura hacia los puntos interiores, destacándose nuevamente la zona de las *Marinas* con alturas de olas que van desde 0,76 m hasta 1,62 m, correspondientes a los períodos de retorno en estudio.

Tabla 9. Resultados de la simulación del Escenario 4 para el 2100

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años) | Norte | | Noreste | | Noroeste | |
|----------------------------------|----------------------------|--------|--------|---------|--------|----------|--------|
| | | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) | Hs (m) | Tm (s) |
| Entrada del canal | 10 | 4,33 | 9,58 | 3,43 | 9,68 | 4,55 | 9,38 |
| | 20 | 4,85 | 9,94 | 3,93 | 10,03 | 5,15 | 9,73 |
| | 50 | 5,36 | 10,03 | 4,40 | 10,06 | 5,87 | 9,84 |
| | 100 | 6,00 | 10,43 | 4,98 | 10,40 | 6,65 | 10,24 |
| Medio del canal | 10 | 1,58 | 8,29 | 1,26 | 8,59 | 1,54 | 7,63 |
| | 20 | 1,80 | 8,48 | 1,50 | 8,69 | 1,78 | 7,75 |
| | 50 | 2,10 | 8,18 | 1,81 | 7,96 | 2,15 | 7,38 |
| | 100 | 2,40 | 8,22 | 2,13 | 7,90 | 2,48 | 7,32 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,67 | 3,06 | 0,73 | 2,84 | 0,58 | 3,32 |
| | 20 | 0,78 | 3,31 | 0,89 | 3,06 | 0,67 | 3,73 |
| | 50 | 0,99 | 3,41 | 1,19 | 3,31 | 0,87 | 3,80 |
| | 100 | 1,23 | 3,60 | 1,49 | 3,60 | 1,05 | 3,96 |
| Paseo marítimo | 10 | 0,64 | 2,67 | 0,74 | 2,67 | 0,54 | 2,66 |
| | 20 | 0,74 | 2,84 | 0,90 | 2,89 | 0,63 | 2,88 |
| | 50 | 0,97 | 3,03 | 1,23 | 3,22 | 0,80 | 3,06 |
| | 100 | 1,22 | 3,27 | 1,58 | 3,54 | 0,97 | 3,19 |
| Marinas | 10 | 0,65 | 2,49 | 0,75 | 2,63 | 0,48 | 2,15 |
| | 20 | 0,77 | 2,66 | 0,92 | 2,86 | 0,59 | 2,30 |
| | 50 | 1,02 | 2,96 | 1,28 | 3,26 | 0,80 | 2,52 |
| | 100 | 1,29 | 3,26 | 1,63 | 3,60 | 1,00 | 2,72 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,54 | 2,30 | 0,70 | 2,57 | 0,29 | 1,55 |
| | 20 | 0,64 | 2,44 | 0,85 | 2,78 | 0,36 | 1,63 |
| | 50 | 0,85 | 2,68 | 1,14 | 3,11 | 0,50 | 1,79 |
| | 100 | 1,08 | 2,92 | 1,46 | 3,44 | 0,65 | 2,01 |

Comparación del Escenario 5 con los Escenarios 3 y 4 estudiados anteriormente, para períodos de retorno de 50 y 100 años

Para realizar la comparación se dividirá el análisis para la zona del canal de entrada y los puntos interiores de la bahía. Para el caso del canal de entrada la comparación se realiza en dirección Noroeste del oleaje y del viento ya que, como se ha concluido, ésta es la que ocasiona las mayores alturas de olas. En la tabla 13 se puede observar que el *Escenario 5* no supera en

alturas de olas a los *Escenarios 3 y 4*, debido a que en los mismos, el oleaje y el viento están en la misma dirección, por lo que el viento imprime energía a las olas.

Tabla 10. Comparación de los Escenarios 3 y 4 en la zona del canal de entrada

| Puntos de Interés | Períodos de retorno (años) | Escenario 3, Hs (m) | Escenario 4, Hs (m) | |
|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|------|
| | | | 2050 | 2100 |
| Entrada del canal | 10 | 4,42 | 4,46 | 4,55 |
| | 20 | 5,02 | 5,06 | 5,15 |
| | 50 | 5,71 | 5,76 | 5,87 |
| | 100 | 6,48 | 6,54 | 6,65 |
| Medio del canal | 10 | 1,45 | 1,48 | 1,54 |
| | 20 | 1,69 | 1,72 | 1,78 |
| | 50 | 2,05 | 2,08 | 2,15 |
| | 100 | 2,36 | 2,40 | 2,48 |

Tabla 11. Comparación entre Escenarios 3 y 4 para puntos interiores de la bahía

| Puntos de Interés | Períodos de retorno (años) | Escenario 3, Hs (m) | Escenario 4, Hs (m) | |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|------|
| | | | 2050 | 2100 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,56 | 0,57 | 0,58 |
| | 20 | 0,65 | 0,66 | 0,67 |
| | 50 | 0,84 | 0,85 | 0,87 |
| | 100 | 1,02 | 1,03 | 1,05 |
| Paseo marítimo | 10 | 0,51 | 0,53 | 0,54 |
| | 20 | 0,61 | 0,62 | 0,63 |
| | 50 | 0,78 | 0,78 | 0,80 |
| | 100 | 0,95 | 0,96 | 0,97 |
| Marinas | 10 | 0,47 | 0,48 | 0,48 |
| | 20 | 0,57 | 0,58 | 0,59 |
| | 50 | 0,79 | 0,79 | 0,80 |
| | 100 | 0,99 | 1,00 | 1,00 |
| Terminal de ferrys internacional | 10 | 0,29 | 0,29 | 0,29 |
| | 20 | 0,36 | 0,36 | 0,36 |
| | 50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| | 100 | 0,65 | 0,65 | 0,65 |

Tabla 12. Resultados de la simulación del Escenario 5

| Puntos de interés | Períodos de retorno (años) | Parámetros de la ola. | |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-------|
| | | Hs(m) | Tm(s) |
| Entrada del canal | 10 | 4,26 | 9,53 |
| | 20 | 4,81 | 9,89 |
| | 50 | 5,37 | 10,02 |
| | 100 | 6,06 | 10,41 |
| Medio del canal | 10 | 1,35 | 7,72 |
| | 20 | 1,56 | 7,76 |
| | 50 | 1,86 | 7,26 |
| | 100 | 2,12 | 7,23 |
| Terminal de cruceros | 10 | 0,76 | 2,93 |
| | 20 | 0,91 | 3,14 |
| | 50 | 1,22 | 3,39 |
| | 100 | 1,52 | 3,65 |
| Paseo marítimo | 10 | 0,75 | 2,72 |
| | 20 | 0,91 | 2,92 |
| | 50 | 1,25 | 3,26 |
| | 100 | 1,58 | 3,56 |
| Marinas | 10 | 0,76 | 2,64 |
| | 20 | 0,92 | 2,86 |
| | 50 | 1,28 | 3,27 |
| | 100 | 1,62 | 3,59 |
| Terminal de ferrys Internacional | 10 | 0,71 | 2,58 |
| | 20 | 0,84 | 2,77 |
| | 50 | 1,14 | 3,11 |
| | 100 | 1,44 | 3,41 |

Tabla 13. Comparación de alturas de olas en la zona del canal en dirección Noroeste del oleaje

| Puntos de Interés | Período de retorno (años) | Escenario 3, Hs (m) | Escenario 4, Hs(m) | | Escenario 5, Hs(m) |
|-------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|------|--------------------|
| | | | 2050 | 2100 | |
| Entrada del canal | 50 | 5,71 | 5,76 | 5,87 | 5,37 |
| | 100 | 6,48 | 6,54 | 6,65 | 6,06 |
| Medio del canal | 50 | 2,05 | 2,08 | 2,15 | 1,86 |
| | 100 | 2,36 | 2,40 | 2,48 | 2,12 |

Respecto a los puntos interiores de análisis dentro de la bahía, se toma como dirección para realizar la comparación la Noreste. En la tabla 14, como se puede apreciar, comparando los *Escenarios 3 y 5*, este último presenta alturas de olas ligeramente mayores o similares, por lo que

se reafirma que no hay un incremento de la altura de ola en el interior de la bahía, causado por el oleaje propagado desde aguas profundas en dirección Noroeste.

Tabla 14. Comparación de alturas de olas en puntos interiores de la bahía en dirección Noreste del viento

| Puntos de Interés | Períodos de retorno (años) | Escenario 3, Hs (m) | Escenario 4, Hs (m) | | Escenario 5, Hs (m) |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|
| | | | 2050 | 2100 | |
| Terminal de cruceros | 50 | 1,17 | 1,17 | 1,19 | 1,22 |
| | 100 | 1,47 | 1,48 | 1,49 | 1,52 |
| Paseo marítimo | 50 | 1,22 | 1,22 | 1,23 | 1,25 |
| | 100 | 1,56 | 1,56 | 1,58 | 1,58 |
| Marinas | 50 | 1,27 | 1,27 | 1,28 | 1,28 |
| | 100 | 1,62 | 1,63 | 1,63 | 1,62 |
| Terminal de ferrys Internacional | 50 | 1,13 | 1,13 | 1,14 | 1,14 |
| | 100 | 1,45 | 1,45 | 1,46 | 1,44 |

Se concluye que, debido a que la bahía de La Habana es un recinto casi cerrado donde fuertes vientos generan olas de cresta corta, existirá una influencia del oleaje sobre las *Marinas* que se plantean diseñar. Es necesario señalar que no existen en la literatura criterios específicos sobre los oleajes máximos que pueden tolerar pero se han hecho algunas recomendaciones como las que se señalan en la tabla 15.

Tabla 15. Criterios para un buen clima de oleaje (DFO 1981)

| Tp (s) | Hs (1 en 1 Semana) | Hs (1 en 1 Año) | Hs (1 in 50 Años) |
|---|--------------------|-----------------|-------------------|
| < 2 | 0,30 | 0,31 | - |
| > 2 | 0,15 | 0,30 | 0,61 |
| Hs está dada por período de retorno (en metros). Tp: Período pico del espectro. | | | |

Un criterio de clima de oleaje moderado se puede obtener multiplicando Hs por 1,25. Es evidente que de acuerdo con los resultados obtenidos para los *Escenarios 3, 4 y 5*, y tomando como criterio los oleajes para el período de retorno de 50 años, se observan olas superiores a las recomendadas en las zonas donde se localizan las posibles *Marinas* a construir, lo cual implica la necesidad de la proyección de obras que disminuyan las alturas de olas a niveles aceptables en concordancia con el tipo de embarcación.

CONCLUSIONES

Se concluye que, para condiciones de viento promedio anual, las alturas de olas tienen valores pequeños que alcanzan los 0,14 m en la *Entrada* del canal para la dirección Noroeste, así como en la *Terminal de ferrys internacional* para la dirección Noreste.

Se demuestra que el oleaje propagado desde aguas profundas es un factor determinante para el desarrollo de olas de gran altura en la zona del canal de entrada, fundamentalmente en la

dirección Noroeste con alturas máximas esperadas para períodos de retorno de 50 años y 100 años de 5,71 m y 6,48 m para el *Escenario 3*, las cuales generarán inundaciones costeras.

Referente al viento local en condiciones extremas, se observó que tiene influencia en toda la zona de estudio, particularmente con dirección Noreste, destacándose la zona de las *Marinas* (con alturas de olas de 1,25 m y 1,61 m para períodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente), mientras que en dirección Norte la *Terminal de ferrys internacional* será la más sensible con olas de alturas desde 0,50 m hasta 1,08 m.

En la zona donde se proyecta construir las *Marinas* se producen alturas de olas de aproximadamente 1,27 m y 1,63 m (correspondientes a los *Escenarios 3, 4 y 5*) para la dirección Noroeste para los períodos de retorno de 50 años y 100 años respectivamente.

Los escenarios de sobre-elevación del nivel medio del mar debido al cambio climático para los años 2050 y 2100, permitieron observar la poca influencia de este fenómeno sobre las alturas de olas, sin embargo, para las condiciones que se imponen, se producirán severas inundaciones sobre todo en la zona del canal de entrada.

El *Escenario 5*, que conjuga las direcciones más peligrosas, no provocó un ascenso en las alturas de olas, por lo que se concluye que el escenario más desfavorable será el *Escenario 4*, por el peligro que representarán las inundaciones que se producirán en la zona de *Entrada* del canal, y su repercusión en el área de desarrollo futuro.

REFERENCIAS

- Córdova L.** (2010). “Estimación de la tasa de sobrepaso promedio del oleaje para muros costeros de sección transversal curva”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), vol. 31, no. 3, pp. 44-54.
- Delft TU** (2007). “SWAN Technical documentation”. Delft University of Technology. Delft. The Netherlands.
- DFO** (1981). “Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences”. Small Craft Harbours Branch Department of Fisheries and Oceans. Ottawa, Ontario.
- Espinosa M. A. y García J. M.** (1983). “Inventario y caracterización de fuentes contaminantes”. Informe Técnico. Instituto de Investigaciones del Transporte. La Habana. Cuba.
- Lamazares G. R.** (2009). “Determinación de las características del oleaje asociado a dos tipologías de eventos meteorológicos extremos en la zona del Malecón utilizando el modelo matemático SWAN”. Trabajo de Diploma. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- OHCH** (2012). “Proyecto Avenida del Puerto”. Informe Técnico. Oficina del Historiador de la Ciudad. Programa Inversionista: Avenida del Puerto. La Habana. Cuba.
- Rodríguez A. M.** (2009). “Estudio comparativo entre fuentes de información nacional e internacional de oleaje en aguas profundas”. Trabajo de Diploma. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.