

Modelación hidrodinámica para el diseño del emisario submarino de la playa El Chivo

Ing. Marlon Mederos Corrales
Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos de Occidente (ESIHO).
e-mail: marlonmederos@nauta.cu

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

RESUMEN

El trabajo muestra los estudios realizados para evaluar el comportamiento de la hidrodinámica y los campos de oleaje asociados a diferentes escenarios, con el objetivo de definir las condiciones de frontera, para el posterior dimensionamiento de un emisario submarino, que permita la disposición final de las aguas residuales de La Habana, en la zona denominada playa El Chivo. Se aplica la modelación numérica para simular el comportamiento de las variables hidrodinámicas y del oleaje, generadas por la marea astronómica y el viento. Se definen seis escenarios, tres dirigidos al estudio de las corrientes superficiales y los restantes para el estudio del oleaje. Se presenta, como resultado del análisis de los escenarios simulados, las condiciones seleccionadas para el diseño funcional y estructural del sistema de tratamiento.

Palabras clave: emisario submarino, modelación numérica, oleaje, variables hidrodinámicas.

Hydrodynamic modeling for the design of the submarine emissary of El Chivo beach

ABSTRACT

The work shows the studies carried out to evaluate the behavior of the hydrodynamics, and the wave fields associated with different scenarios, with the aim of defining the boundary conditions, for the subsequent sizing of an underwater outfall that allows the final disposal of the waste waters of Havana in the area called El Chivo beach. Numerical modeling is applied to simulate the behavior of the hydrodynamic and wave variables generated by the astronomical tide and the wind. Six scenarios are defined, three directed to the study of surface currents, and the rest for the study of the waves. The conditions selected for the functional and structural design of the treatment system are presented as a result of the analysis of the simulated scenarios.

Keywords: submarine emissary, numerical modeling, wave, hydrodynamic variables.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de abasto y saneamiento de la ciudad de La Habana, fueron construidos hace más de 100 años y actualmente no cuentan con la capacidad suficiente para evacuar las aguas residuales generadas por la población actual, provocando una sobrecarga del sistema y el vertimiento de volúmenes de residual hacia drenajes que finalizan en la bahía. Todo lo anterior, ligado al avance del desarrollo socio-económico previsto en la Avenida del Puerto, ha traído como consecuencia, el planteamiento de un nuevo proyecto, con el fin de mejorar el sistema de alcantarillado del área oeste del río Luyanó. Como parte de la solución para los problemas anteriormente presentados, se encuentra el dimensionamiento del emisario submarino de la playa El Chivo.

Debido a que el caudal que vierte el emisario submarino de la playa El Chivo, lo realiza a poca profundidad y longitud y, además, presenta salideros en toda su longitud, el estado técnico del emisario es malo, según afirma Artiles (1996). Se debe dimensionar un nuevo emisario, debido a que la reparación del existente sería ineficiente, además de que el empleo del material con el que fue construido se encuentra obsoleto.

La modelación numérica constituye actualmente una poderosa herramienta para la simulación de los fenómenos asociados con la hidráulica marítima. En este trabajo se presentan los estudios específicos para determinar las variables hidrodinámicas y de oleaje, que sirven como base para el dimensionamiento del emisario y de sus componentes, utilizando modelos computacionales.

DESARROLLO DE ESTUDIOS ESPECÍFICOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio, en general, estará compuesta por la cuenca hidrográfica que tributa a la bahía de La Habana y en particular a la zona de la playa El Chivo, que se aprecia en la Figura 1.

En la parte occidental del área en estudio existe un sistema de alcantarillado. El área servida es de 4 500 hectáreas y está cubierta por el sistema de alcantarillado central. El mantenimiento del sistema de alcantarillado lo realiza la empresa Aguas de La Habana. En la parte sur-oriental del área en estudio, existen también pequeñas áreas con alcantarillado, los cuales se construyeron para descargar las aguas residuales en los ríos o en las corrientes vecinas.

Batimetría y línea de costa

El grupo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), cuenta con información de batimetría y línea de costa, brindada por la empresa GEOCUBA Estudios Marinos, con el objetivo de reproducir el fenómeno de surgencia en un dominio amplio. Estos datos fueron acoplados con la información obtenida de la base de datos General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) y todos los datos procesados se llevaron a proyección UTM Zona 17 (84°W–78°W–Northern Hemisphere) referenciado WGS84.

En el caso de la información de la línea de costa, esta comprende desde calle 10 hasta pocos metros antes de la ensenada posterior a la ciudad Camilo Cienfuegos. Estos datos al ser digitalizados, resultaron en una línea de costas general, espaciada de forma ascendente, desde 20 metros a partir del área de estudio, o sea playa El Chivo, hasta 50 metros en los bordes del área seleccionada. En la figura 2 y figura 3 se muestra dicha información, tanto de la línea de costa como de la batimetría.

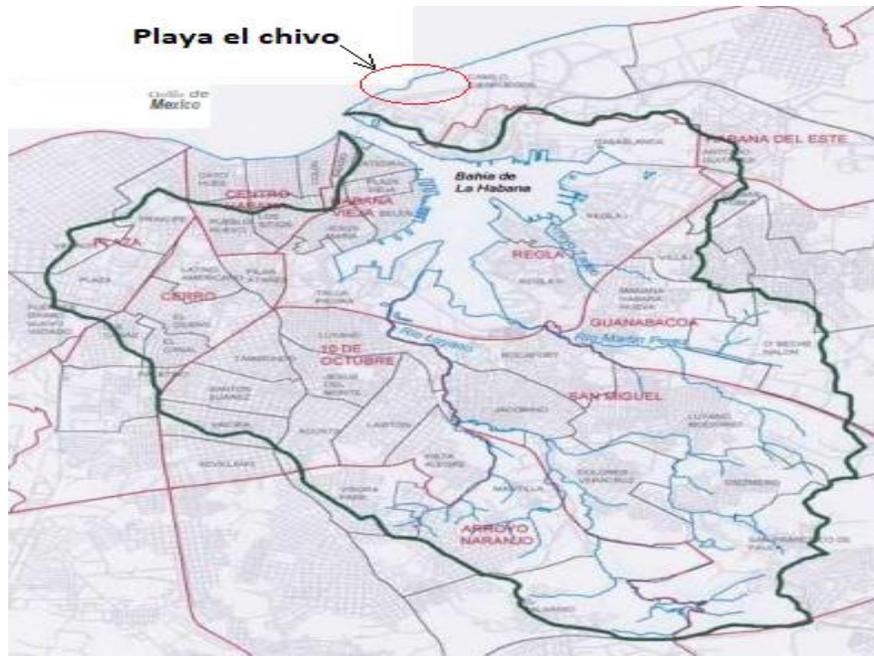


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio [fuente JICA (2004)]

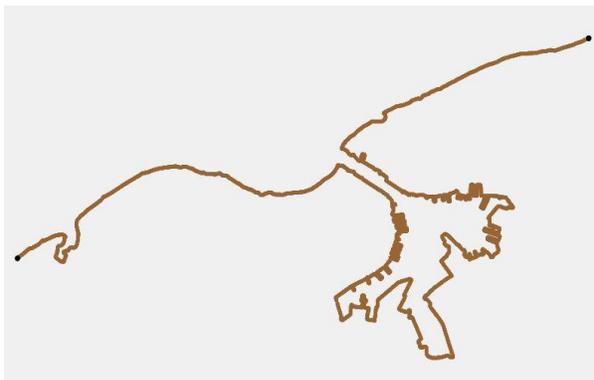


Figura 2. Línea de costa del área de estudio

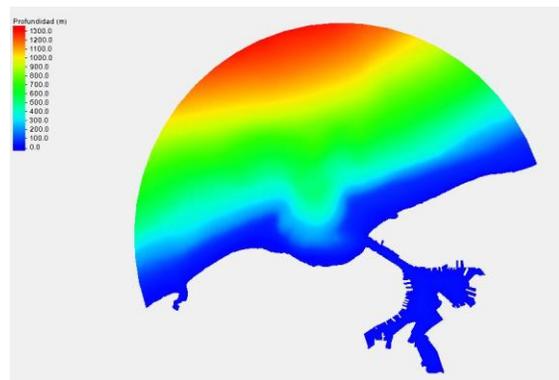


Figura 3. Batimetría del área de estudio

Generación de la malla de cómputo

Si se quiere realizar una modelación numérica, se debe generar una malla de cómputo. Para la confección de una malla adecuada se deben seguir dos criterios fundamentales: el primero es que la malla debe ser más densa en la línea de costa y en las zonas de interés (playa El Chivo), e ir disminuyendo su densidad gradualmente al alejarse de la costa. El segundo criterio es que la malla debe estar compuesta por la menor cantidad posible de nodos, así como elementos que la conforman. Cumpliendo esto, se garantiza mayor precisión en los resultados con un menor tiempo de cómputo.

La malla seleccionada tiene un total de 1 8192 nodos y 34 279 elementos o lados de triángulos en su composición, 1 tramo de costa y 57 nodos en la frontera abierta (océano), como se muestra en la Figura 4.

Estudios meteorológicos

Para el estudio del régimen de viento en la zona de interés, se tomaron los datos de la estación meteorológica más cercana, situada en la zona de Casablanca (coordenadas geográficas: 23° 9,8' Norte con 82° 20,9' Oeste). La misma se encuentra ubicada en una elevación de terreno a 50 metros sobre el nivel del mar y próxima a la playa El Chivo. En la tabla 1 y tabla 2, aparecen las características medias y extremas del régimen de viento según González (2013).

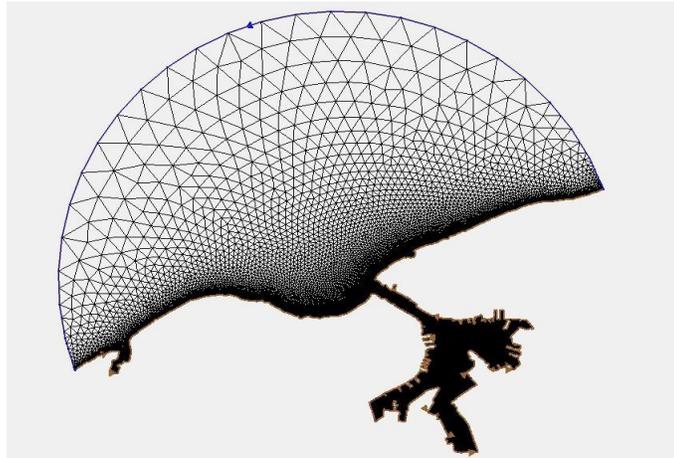


Figura 4. Malla de cómputo generada

Tabla 1. Velocidad media mensual del viento (m/s) en la estación de Casablanca (1984-1988)

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vm (m/s)	5,3	5,8	6,6	5,3	5,0	4,3	4,4	4,5	4,5	5,5	5,5	5,2
[fuente: González (2013)]												

Mediante un promedio de estos valores de velocidades, se puede afirmar que la velocidad media anual tiene un valor de 5,2 m/s, la cual será simulada desde las principales direcciones más desfavorables, que son Noreste, Noroeste y Norte, porque cualquier dirección proveniente del Sur, resultaría en un caso favorable y no sería de interés en el estudio.

En la información mostrada en la tabla 2 se incluyen datos de velocidad de vientos generados por huracanes y frentes fríos, apareciendo de forma promediada, además, se especifica su frecuencia de ocurrencia. Partiendo de esta, se ponderaron los vientos, con el objetivo de sacar las resultantes de las direcciones más desfavorables para el diseño del emisario submarino, dando como resultado la tabla 3.

Base de datos Le Provost (constituyentes de la marea)

Las constituyentes de la marea son obtenidas a partir de la base de datos Le Provost (1998) y contienen las componentes correspondientes a cada zona geográfica necesarias para el procesamiento con ADCIRC (Modelo de circulación avanzada para océanos, costas y estuarios).

Las componentes se procesan para tiempo real o para la fecha y hora que se desee modelar. Las principales constituyentes para el trabajo de esta investigación se muestran en la tabla 4.

Tabla 2. Velocidades medias máximas absolutas anuales y frecuencias relativas por rumbos, para la estación de Casablanca (1916-1993)

Rumbo	F (%)	Vm (m/s)
NNE	4,5	39,3
NE	3,4	27,5
ENE	1,1	30,0
E	2,3	22,9
ESE	2,3	23,9
SE	1,1	37,1
SSE	6,8	36,0
S	39,8	28,8
SSW	15,9	27,7
SW	5,7	31,8
WSW	1,1	30,3
W	4,5	27,3
WNW	1,1	22,4
NW	5,7	28,0
NNW	2,3	27,5
N	2,3	23,5
[fuente: González (2013)]		

Tabla 3. Velocidades medias máximas absolutas ponderadas anuales y frecuencias relativas por rumbos, para la estación de Casablanca (1916-1993)

Noreste	
Frecuencia ponderada (%)	Velocidad media máxima ponderada (m/s)
3,1	33,7
Norte	
Frecuencia (%)	Velocidad media máxima (m/s)
2,3	23,5
Noroeste	
Frecuencia ponderada (%)	Velocidad media máxima ponderada (m/s)
3,2	27,2

Forzadores a utilizar en la modelación con ADCIRC

El modelo ha sido creado para asimilar la información de múltiples forzadores, en función del fenómeno que se desee simular. En esta investigación los principales forzadores son los vientos en condiciones normales y extremos y la marea astronómica.

Tabla 4. Componentes de la marea empleados para el trabajo con ADCIRC

Componente	Amplitud (m)	Ajuste de la amplitud de los nodos de la frontera océano (m)
2N2	0	0,0028
K1	0,140	0,0950
K2	0,030	0,0130
L2	0	0,0034
M2	0,240	0,1300
MU2	0	0,0035
N2	0,046	0,0250
NU2	0	0,0047
O1	0,100	0,1000
P1	0,047	0,0320
Q1	0,030	0,0250
S2	0,110	0,0460
T2	0	0,0030
[fuente: González (2017)]		

Empleo de boyas virtuales

Para conocer el comportamiento de variables como viento y oleaje en la zona de interés de la playa El Chivo, se ubicaron boyas virtuales, todas en el área de posible vertido y cercanas a una línea imaginaria por donde se proyectará el futuro emisario. El proceso de selección de los puntos específicos a analizar, se realizó a partir del conocimiento adquirido mediante el análisis de la batimetría, los perfiles de la costa de la zona de interés y otros aspectos. Sin el debido estudio, no es aconsejable definir los sitios donde se colocarán las boyas, para que no se analice información que no será de utilidad y evitar pérdidas innecesarias de dinero y tiempo.

Para el desarrollo de la investigación se colocaron 9 boyas virtuales en la zona de estudio. Las primeras 6 se ubicaron cercanas al futuro emisario y a profundidades cercanas a los 15 m, que es por norma, a la profundidad donde debe comenzar el proceso iterativo, para el correcto diseño de los emisarios. Las últimas 3 boyas se ubicaron cercanas al futuro emisario y a la línea costera, con el objetivo de conocer los parámetros de diseño cerca de la costa. En la tabla 5 y en la figura 5, se brindan los datos de las coordenadas de dichas boyas y su ubicación, respectivamente.

Modelo ADCIRC (Modelo de circulación avanzada para océanos, costas y estuarios)

ADCIRC es un programa de computación altamente desarrollado para solucionar las ecuaciones de la hidrodinámica terrestre. Sus ecuaciones han sido formuladas usando las aproximaciones de presión hidrostática tradicional de Boussinesq, las cuales fueron discretizadas en el espacio, usando el método de elementos finitos (FE) y en el tiempo, usando el método de diferencia finita (FD).

Tabla 5. Coordenadas de las boyas virtuales

Coordenadas geográficas			
Boya	X	Y	Z
B1	-82,34799754	23,15915175	-19,39
B2	-82,34752440	23,15930770	-19,37
B3	-82,34803436	23,15868369	-14,88
B4	-82,34765770	23,15889563	-16,35
B5	-82,34802265	23,15826473	-7,39
B6	-82,34753961	23,15849519	-8,50
B7	-82,34815243	23,15738385	-2,85
B8	-82,34775873	23,15752215	-3,03
B9	-82,34733843	23,15770692	-2,82



Figura 5. Ubicación de las boyas virtuales

ADCIRC puede ejecutarse como modelo de profundidad en dos dimensiones (2DDI) o tres dimensiones (3D). En uno u otro caso, la elevación es obtenida de la solución de la ecuación de continuidad en forma Generalizada o Ecuación de Onda Continuidad (GWCE), por sus siglas en inglés. La velocidad es obtenida de la solución del modelo 2DDI o las ecuaciones de momento 3D. Todos los términos no lineales han sido retenidos en dichas ecuaciones.

Modelo SWAN (Modelo de simulación de olas en aguas poco profundas)

SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación para obtener estimaciones realistas de parámetros de la ola en las áreas costeras, lagos y estuarios, a partir de condiciones dadas de viento, fondo y corriente. Sin embargo, SWAN puede utilizarse en cualquier escala relevante para las ondas de gravedad superficial generadas por el viento. El modelo se basa en la ecuación del equilibrio de la acción de las olas con fuentes y sumideros.

MODELACIÓN NUMÉRICA

Modelación hidrodinámica en el modelo ADCIRC

Definición de los escenarios

El análisis de las variables hidrodinámicas dentro de distintos escenarios, permite comprobar las capacidades del modelo de reproducir fenómenos hidrodinámicos. En la tabla 6 se presentan los escenarios creados.

Tabla 6. Descripción de los distintos escenarios para el modelo ADCIRC

Escenario	Condiciones de frontera
A1	Marea y vientos promedios
A2	Marea y vientos extremos
A3	Marea y vientos promedios debidos al cambio climático

En el escenario A1 intervienen las componentes de la marea seleccionadas de la base de datos Le Provost (1998) y los vientos promedios de las direcciones más desfavorables, que como se señaló anteriormente, presentan un valor promedio de 5,2 m/s. Se seleccionaron todas las componentes de la marea de la base de datos.

En el caso del escenario A2, los valores de las velocidades de los vientos, se tomarán de la tabla 3, según sea la dirección que se analizará. El objetivo de este escenario es analizar el comportamiento de las variables hidrodinámicas ante la acción de vientos extremos y, por ende, que estén implícitos en los resultados, la ocurrencia de un evento extremo, ya sea un ciclón o un frente frío, con la marea en condiciones extremas.

Para el escenario A3, se analizarán los vientos promedios al igual que en el escenario 1, pero con la diferencia de que, en este caso, sí se tendrá en cuenta el efecto del cambio climático y, por tanto, el valor de la sobreelevación del mar sufrirá un aumento de 0,27 m, según el Grupo de Riesgo Nacional, para un valor final de 0,51 m.

Se llevaron a cabo disímiles corridas en ADCIRC, respondiendo a cada escenario anteriormente explicado, introduciendo los ficheros de entrada fort.13, fort.14, fort.15 y fort.22 y obteniendo los ficheros de salida fort.63 y fort.64. Será el fichero que otorga la información sobre los vientos y su dirección, fort.64, el centro de atención, pues son de particular interés, las corrientes a causa de los vientos, sean en condiciones normales como extremas, para analizar el posterior transporte de residuales del futuro emisario.

Para analizar los resultados de las simulaciones, se escogió el quinto día, con el objetivo de esperar a que el modelo se estabilizara y arrojara los resultados más confiables. En las figuras 6, 7, 8 y 9, se muestra el resultado de este día de uno de los ficheros fort.64, que indican el comportamiento de las corrientes en la zona de estudio. Se considera oportuno aclarar que el tiempo se encuentra referenciado a las bases de datos de la marea Le Provost (1998), las cuales están configuradas en horario UTC, lo cual implica una diferencia de 4 h con respecto al horario local de Cuba.

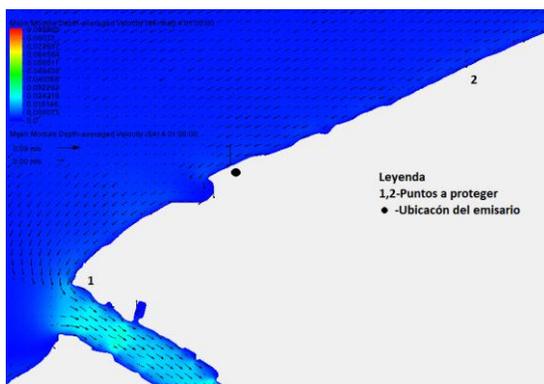


Figura 6. Resultado de la modelación a las 01:00 h UTC

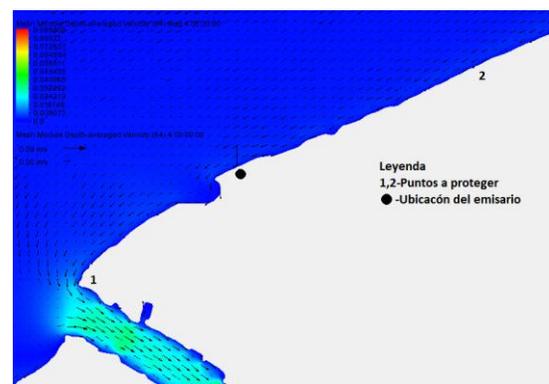


Figura 7. Resultado de la modelación a las 03:00 h UTC

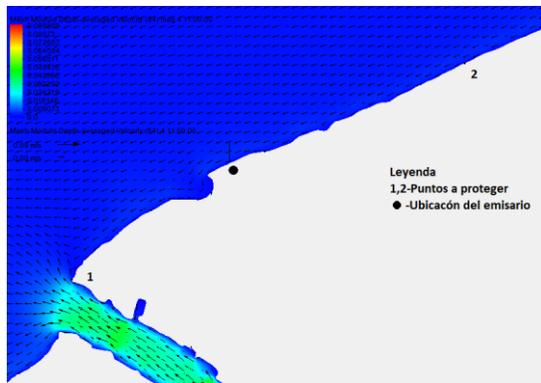


Figura 8. Resultado de la modelación a las 11:00 h UTC



Figura 9. Resultado de la modelación a las 24:00 h UTC

Como se puede observar, una vez que finalizó el estudio de las direcciones de la corriente inducida por el viento, se puede concluir que ocurren dos situaciones desfavorables: la primera a las 03:00 h UTC, donde es posible que se contamine la bahía, debido al residual descargado a través del emisario actual, por la poca distancia a la costa y el aumento de las velocidades en el canal de entrada de la bahía (definido en las figuras como punto 1 a proteger), y la segunda a las 11:00 h UTC, donde el contaminante puede llegar hasta la ciudad Camilo Cienfuegos (definido en las figuras como punto 2 a proteger), debido a la dirección de la corriente.

Análisis de los resultados

Se analizaron las 9 boyas, pero las últimas 3 (7, 8 y 9) tienen un carácter fundamentalmente de diseño estructural, por consiguiente, desde el punto de vista funcional, las boyas analizadas fueron las primeras 6, que son las que se encuentran en las profundidades cercanas a los 15 m.

Las condiciones de vientos extremos del escenario 2, lógicamente generan mayores velocidades, pero por ser condiciones extremas, sus resultados son mejor empleados para recomendaciones de monitoreo. En el caso del escenario 3, se observó que no se generaban prácticamente cambios en relación con los resultados del escenario 1 y como es, en definitiva, una condición más favorable, pues al aumentar el nivel de sobreelevación del mar, se favorece la dilución inicial al tener mayor profundidad, este escenario no fue el seleccionado. Se observó que para el escenario 1, la condición más desfavorable, tiene lugar cuando los vientos provienen del Noreste, por tanto, esta fue la variante de diseño escogida. En todos los escenarios las velocidades máximas, fueron registradas en la boya 5, como se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de la simulación en ADCIRC para los distintos escenarios

Escenario	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Velocidad máxima (cm/s)	0,38	0,31	0,26	17,20	3,85	3,04	0,38	0,31	0,26
Boya de velocidad máxima	B5	B5	B5	B5	B5	B5	B5	B5	B5
Hora de velocidad máxima (UTC)	1:00	19:00	1:00	1:00	19:00	1:00	1:00	19:00	1:00

Como se puede observar, el mayor valor de la velocidad de la corriente, para el escenario de vientos promedio, es de 0,38 cm/s, para la dirección Noreste. En el caso de los vientos extremos, el mayor valor también es el de la dirección Noreste, con un valor de 17,20 cm/s.

Se considera que el resultado de la velocidad máxima de la corriente, para el caso más desfavorable de los vientos promedios, es algo bajo y que esto repercutirá en gran medida en el tamaño del difusor, haciéndolo muy pequeño. El hecho de que la velocidad de la corriente sea muy baja, conlleva a una condición favorable, lo cual no conviene para el diseño. Por esta razón se decidió tomar para el caso de diseño, la velocidad máxima absoluta anual del viento, para un período de retorno de 2 años, con un valor de 13 m/s, extraída de la tabla 8, lo cual arrojó un resultado de velocidad de corriente igual a 1,60 cm/s.

Tabla 8. Velocidad máxima absoluta anual del viento para distintos períodos de retorno

T (años)	10	20	25	50	100	200	1000
V máx (m/s)	40,5	53,0	57,0	69,1	81,1	93,0	120,5
[fuente: González 2013]]							

Modelación de oleaje en el modelo SWAN

Definición de los escenarios

Se definen diferentes escenarios climáticos para el estudio del campo de oleaje en la playa El Chivo, en tres direcciones del viento y del oleaje (Noreste, Noroeste y Norte). Estos escenarios se desarrollan de forma tal, que se incrementa el nivel de peligro y, por último, se incluye el efecto del cambio climático, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Descripción de los distintos escenarios para el modelo SWAN

Escenario	Condiciones de frontera
S1	Oleaje generado por el viento local promedio anual
S2	Oleaje generado por vientos extremos locales
S3	Oleaje generado por vientos extremos locales y sobre elevación debida al cambio climático

En este primer escenario 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, este valor de velocidad fue tomado de la tabla 1.

Todos los casos se desarrollan para la condición de pleamar, como estado inicial del nivel del mar, correspondiente a un valor de 0,30 metros por encima del nivel medio del mar, dicho valor se obtuvo del informe de oceanografía de la bahía de La Habana, facilitado por el Grupo de Trabajo Estatal Bahía de La Habana, según Espinosa et al. (1983). En la tabla 10 se brinda información sobre este escenario.

En el caso del segundo escenario, será analizado el oleaje generado por los vientos extremos locales, asociados al período de retorno de 50 años. Se considera la combinación del viento local asociado con eventos extremos y de la sobre elevación para la condición de ocurrencia de marea de tormenta vinculada con huracanes. Los datos de este escenario se muestran en la tabla 11.

Tabla 10. Parámetros del escenario S1

Oleaje medio		
F(caso)	1/50	(años)
Vmc	5,2	(m/s)
Hsig	1,5	(m)
Tm	5,5	(s)
Encuentro	63	(%)
Sobreelevación	0,3	(m)
[fuente: Lee (1986)]		

Tabla 11. Parámetros del escenario S2

Oleaje extremo		
F(caso)	1/50	(años)
Vmc	34	(m/s)
Hsig	10,34	(m)
Tm	11,04	(s)
Encuentro	63	(%)
Sobreelevación	2,6	(m)
[fuente: González (2013)]		

El estudio del tercer escenario está fundamentalmente dirigido a analizar el comportamiento de la sobreelevación de nivel del mar debido al cambio climático para el año 2 100; donde se ha estimado de 0,85 metros, según el Grupo de Riesgo Nacional, aplicando las condiciones del escenario S2. En la tabla 12 se muestran las condiciones iniciales para el caso en estudio.

Tabla 12. Parámetros del escenario S3

Oleaje extremo con cambio climático		
F(caso)	1/50	(años)
Vmc	34	(m/s)
Hsig	10,34	(m)
Tm	11,04	(s)
Encuentro	63	(%)
Sobreelevación	3,45	(m)
[fuente: González (2013)]		

Análisis de los resultados

Luego de realizada la simulación, el escenario escogido es el 3, porque en este caso un aumento de la sobreelevación del mar, producto del cambio climático, trae como consecuencia que las olas que antes rompían más alejadas de la línea de costa, ahora lo hagan más cerca de ella y con más energía. Sin embargo, se tomarán algunos resultados del escenario 2, porque es donde se encuentran los mayores valores de la fuerza inducida por el oleaje. Luego, la variante

seleccionada es la que analiza los vientos provenientes del Noroeste, porque dentro del escenario 3, es la opción que registra la mayor altura de ola significativa más próxima a la costa, con un valor de 4,26 m.

En la zona de rotura de las olas, se generan corrientes longitudinales o paralelas a la costa, razón por la cual es importante estudiar, para el caso de los emisarios submarinos, la longitud de dicha zona. Conociendo que el oleaje tiene un carácter irregular y que las olas rompen a diferente distancia, de acuerdo con su altura y perfil de fondo, se ha decidido que la longitud de la zona de rompiente, será la distancia a la que se produzca al menos el 10 % de rotura del total de olas analizadas.

De la modelación del oleaje y de la información extraída de la tabla 13, se pueden sacar tres conclusiones:

- El escenario donde los vientos extremos provienen del Noroeste, con una sobre elevación debida a eventos extremos, teniendo en cuenta el efecto del cambio climático, es el más desfavorable al generar la mayor altura de ola significativa, que en la costa es igual a 4,26 m.
- El emisario debe tener una longitud mínima de 88 m, para garantizar el menor número de olas en rotura sobre el punto de descarga, en este caso se asegura que sea inferior al 10 % de las olas que rompen en los escenarios.
- El emisario debe estar previsto de una estructura de protección contra el oleaje en los primeros 18 m como mínimo, porque en esa distancia se produce la rotura de más del 50 % de las olas, para el escenario escogido. Sin embargo, se recomienda recubrirlo hasta los 42 m, porque a esta distancia se registran los mayores valores de la fuerza inducida por el oleaje, como se aprecia en la figura 10.

En las figuras 11 y 12, se muestran representaciones de parámetros de oleaje, como el tanto por ciento de olas que rompen y la altura de ola significativa, respectivamente, para la variante seleccionada, con el objetivo de comprender el comportamiento de estos fenómenos en la zona de interés.



Figura 10. Resultante de la fuerza inducida por el oleaje (W)

Tabla 13. Resultados de la simulación en SWAN para los distintos escenarios

Escenario	1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
Qb (%) (línea de costa)	12	27	26	71	92	90	51	69	66
Hsig (m)	0,78	0,91	0,91	3,49	3,71	3,69	3,98	4,26	4,23
Tm (sec)	4,83	4,85	4,85	9,59	9,62	9,63	9,65	9,69	9,69
Tm50% (sec) (50%)	-	-	-	9,69	9,82	9,82	9,66	9,79	9,79
Y-W for Qb50% (N/m ²)	-	-	-	-188,25	-309,26	-325,57	-21,34	-250,43	-248,43
X-W for Qb50% (N/m ²)	-	-	-	37,18	156,24	104,21	3,63	128,25	83,01
DirQb50% (°)	-	-	-	352	331	343	352	331	342
HsigQb50% (m)	-	-	-	4,12	5,15	5,08	4,03	5,01	4,94
DepthQb50% (m)	-	-	-	4,73	5,90	5,81	4,61	5,72	5,65
DistQb50% (m)	-	-	-	16	32	31	2	18	17
Tm10% (sec) (10%)	4,90	5,01	5,00	9,95	10,13	10,10	9,97	10,18	10,15
Y-W for Qb10% (N/m ²)	-0,52	-5,56	-6,35	-139,02	-170,34	-199,66	-131,32	-155,97	-187,84
X-W for Qb10% (N/m ²)	-0,22	3,19	1,62	-5,22	104,06	49,59	-7,41	96,51	44,49
DirQb10% (°)	353	329	342	358	330	345	358	330	345
HsigQb10% (m)	0,82	1,12	1,12	6,25	7,37	7,37	6,32	7,55	7,55
DepthQb10% (m)	1,52	2,14	2,14	10,22	11,72	11,72	10,02	12,12	12,12
DistQb10% (m)	5	14	14	78	88	88	71	85	85
Qb (%)	0	1	0	43	40	58	33	32	46
Tmmáx (sec) (máx%)	5,12	5,05	5,19	9,72	9,87	9,77	9,76	9,92	9,81
Y-Wfmáx (N/m ²)	4,28	-8,44	6,31	-252,78	-319,93	-311,88	-246,62	-307,65	-314,34
X-Wfmáx (N/m ²)	-2,80	4,83	-3,70	49,42	160,74	106,25	42,43	156,31	104,69
DirWmáx(°)	3	329	347	352	331	342	353	331	342
HsigWmáx (m)	0,94	1,21	1,21	4,36	5,62	4,65	4,79	6,06	5,15
DepthWmáx (m)	4,26	2,63	4,26	5,14	6,71	5,14	5,99	7,56	5,99
DistWmáx (m)	42	21	42	22	42	22	22	42	22

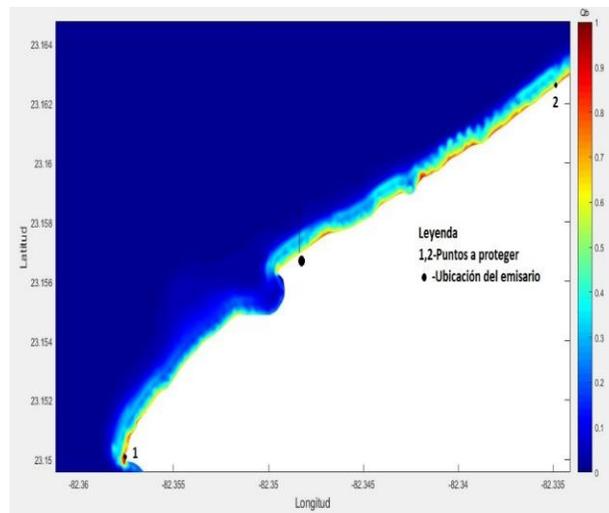


Figura 11. Tanto por ciento de las olas que rompen en la playa El Chivo

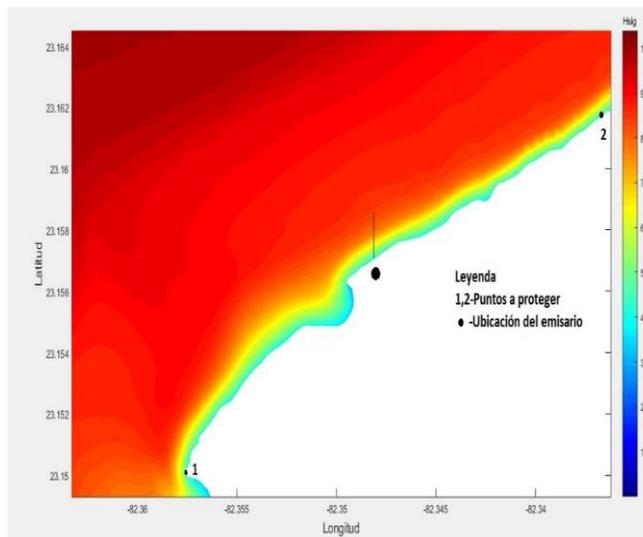


Figura 12. Altura de ola significativa en la playa El Chivo

CONCLUSIONES

- Se generaron disímiles mallas de cómputo, seleccionando al final una que cumpliera con todos los parámetros, a fin de modelar las corrientes en ADCIRC y el oleaje en SWAN, para los distintos escenarios seleccionados. La malla seleccionada tiene un total de 18 192 nodos y 34 279 elementos, 1 tramo de costa y 57 nodos en la frontera abierta.
- En la modelación hidrodinámica se analizaron las direcciones y magnitudes de las corrientes de los vientos, dando como resultado, para el escenario más desfavorable, una velocidad de corriente debida a vientos promedios igual a 1,60 cm/s y debida a vientos extremos igual a 17,20 cm.
- En el caso de la modelación de oleaje, se registraron las mayores alturas de olas significativas en la costa a una altura de 4,26 m y se determinó que el emisario debe tener una longitud

mínima de 88 m y que debe estar previsto, a su vez, de una estructura de protección contra el oleaje, los primeros 18 m como mínimo, aunque es recomendable que se extienda hasta los 42 m.

REFERENCIAS

Artiles R. (1996). "Informe Técnico-Económico. Saneamiento Nacional de Recursos Hidráulicos", Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana, Cuba.

Espinosa J., García P. P. y Menéndez. G. M. (1983). "Evaluación de los efectos ocasionados por vertimientos de aguas albañales en un arrecife costero de ciudad de La Habana, Cuba", Instituto de Oceanología, La Habana, Cuba.

González Y. (2013). "Estudio del campo de oleaje en la bahía de La Habana", Trabajo de Diploma (en opción del título de Ingeniero Hidráulico), Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

González P. (2017). "Simulación asociada a los campos de oleaje y la surgencia en los huracanes Kate (1985) y Rita (2005) en la zona norte de Matanzas a Camagüey", Trabajo de Diploma (en opción del título de Ingeniero Hidráulico), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

JICA (2004). "Estudio del desarrollo del alcantarillado y el drenaje pluvial en la cuenca tributaria de la bahía de La Habana en la república de Cuba.", Informe Técnico, Agencia de Cooperación Internacional del Japón, La Habana, Cuba.

Le Provost C. (1998). "A hydrodynamic ocean tide model improved assimilating a satellite altimeter-derived data set", Journal of Geophysical Research, vol. 103, no. C3, pp 5513 - 5529, ISSN 0148-0227, American Geophysical Union, USA.

Lee W. T. (1986). "Global wave statistics for structural design assessments", Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, Washington D.C.