

Simulación hidrodinámica del malecón habanero y la bahía de la Habana

Ing. Miguel Ponce Portela
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). ISPJAE.
email: mponce@cih.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Luis F. Córdova López
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). ISPJAE.
email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

El cambio climático ha agravado las condiciones de vida en el planeta. Conocer y predecir estos fenómenos se ha vuelto una necesidad del mundo actual, lo que ha dado lugar a la generación de herramientas matemáticas que permiten evaluar zonas de riesgos y magnitud de las afectaciones provocadas por dichos fenómenos. El trabajo presentado está encaminado a la aplicación de la modelación matemática con la herramienta ADCIRC (ADvanced CIRCulation model), a una zona altamente vulnerable, como es el malecón de la ciudad de la Habana y su bahía, determinando con precisión las variables hidrodinámicas ante la ocurrencia de diferentes escenarios, lo cual permite establecer políticas de seguridad, manejo de la zona costera, y parámetros de diseño eficientes en función de las acciones para la protección costera.

Palabras clave: corrientes, modelación hidrodinámica, niveles del mar.

Hydrodynamic simulation of the Havana seawall and the bay of Havana

ABSTRACT

Climate change has worsened the living conditions on the planet. To understand and predict these phenomena has become a necessity in the current world, which has led to the generation of mathematical tools to evaluate risk areas and the extent of damages caused by these phenomena. The work presented here is aimed at the application of mathematical modeling with the tool ADCIRC (Advanced Circulation Model), to a highly vulnerable area, as is the Seawall of the Havana city and its bay, determining the hydrodynamic variables for different scenarios, which allows to set security policies, coastal zone management, and efficient design parameters based on the actions for coastal protection.

Keywords: currents, hydrodynamic modeling, sea levels.

INTRODUCCIÓN

El mundo actual se caracteriza por la experimentación creciente de fenómenos producidos por el cambio climático. El calentamiento global se ha convertido en una amenaza grave para los habitantes del planeta. En los últimos 100 años el nivel del mar aumentó aproximadamente 20 centímetros.

Cuba no está exenta de la ocurrencia de estos fenómenos. Su ubicación geográfica a la entrada del Golfo de México, limitado al Norte con el Océano Atlántico, al Sur con el Mar Caribe y sus 5746 km de costa, constituyen factores que lo colocan dentro del grupo de países vulnerables a efectos del cambio climático. Conocer y predecir estos fenómenos, evaluar sus efectos para establecer políticas de protección se ha convertido en una necesidad y ha dado lugar a la creación de herramientas matemáticas que complementen la evaluación de riesgos. Tal es el caso del modelo ADCIRC (Modelo Avanzado de Circulación para océanos, costas y estuarios), el cual ha sido implementado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército y la marina de los Estados Unidos, así como por el Servicio Nacional Oceánico de la costa Este. Ha sido homologado por FEMA (Federal Emergency Management Agency) para el Programa Nacional de Seguro contra Inundaciones (Dietrich et al. 2011), y se ha convertido en una de las más importantes herramientas para la modelación y predicción de variables meteorológicas por las ventajas que presenta.

Específicamente en Cuba se han realizado pocas modelaciones con esta herramienta, aún cuando se tienen referencias de sus resultados confiables y se conoce de los aportes de su aplicación. Estudios con modelos de transformación de oleaje han recomendado la implementación de herramientas hidrodinámicas, así como la interacción de los resultados de ambos modelos, según Córdova y González (2014). Para enriquecer las investigaciones en este campo, partiendo de la confiabilidad de este modelo matemático, se considera pertinente comenzar su implementación en Cuba. Para ello se escogió como zona de estudio la bahía de la Habana y el malecón de la ciudad, por lo que el trabajo está dirigido a realizar la modelación hidrodinámica de este sector.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está compuesta por tramos, que abarcan desde calle 16, Miramar, Playa hasta las proximidades de la desembocadura del río Cojímar, Habana del Este, pero por su importancia y características para el estudio, se centró la atención en las zonas comprendidas por Bahía de la Habana y Malecón habanero.

Bahía de La Habana: Es una bahía típica de bolsa ubicada en la costa Noroeste cubana. Posee un área de 5 km² aproximadamente 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 1,6 km; fue dragado para permitirle el acceso a los buques de gran calado y sus profundidades máximas oscilan entre 10 m y 18 m. Los principales aportes de agua dulce los proporcionan los ríos Luyanó, Martín Pérez y el arroyo Tadeo, creciendo sus volúmenes de descarga en épocas de abundantes precipitaciones. Además, 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, aumentando cuantiosamente el caudal de agua dulce que recibe constantemente (Espinosa y García 1983).

Malecón habanero: El Malecón habanero se extiende unos 5,6 km desde la ensenada de La Chorrera, en la desembocadura del río Almendares, hasta la bahía de La Habana. Un muro de hormigón protege en alguna medida a la ciudad de la Habana de los embates del oleaje. La línea costera es rocosa y acantilada. Su localización geográfica está en los 23°8'30"N, 82°22'05"O. Existen tres niveles de terrazas submarinas, casi paralelas a la costa. Después de la tercera, las profundidades aumentan rápidamente, de manera que la profundidad de 200 m se localiza a menos de 2 km de la línea costera (Mitrani 2006).

HERRAMIENTAS UTILIZADAS

La principal herramienta utilizada es el modelo hidrodinámico ADCIRC, Modelo Avanzado de circulación para océanos, costas y estuarios. Este modelo matemático 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, y en el tiempo usando el método de diferencia finita (Dietrich et al. 2011).

FORZADORES A UTILIZAR EN LA MODELACIÓN

Marea: Las constituyentes de la marea son obtenidas de la base de datos (LeProvost et al. 1998), que contiene las componentes necesarias correspondientes a cada zona geográfica. Las componentes pueden ser procesadas para tiempo real o para la fecha y hora que se desee modelar.

Vientos: Los campos de vientos son de tipo paramétrico.

Ríos: Los caudales simulados son impuestos con un valor representativo de 0,05 m³/s/m, el cual se fijó como gasto promedio diario de cada río. Este valor no es un dato real, fue asignado solo para analizar el comportamiento de las variables hidrodinámicas en el dominio.

CONFECCIÓN DE LA MALLA DE CÓMPUTO

La generación de mallas es un proceso complejo y multifactorial. Depende fundamentalmente de los objetivos trazados en la investigación. Existen múltiples procedimientos y herramientas matemáticas avanzadas para su creación, las cuales están encaminadas a encontrar el número de nodos adecuado a las características del fenómeno que se pretende modelar, y a la infraestructura computacional que se posea (Parrish and Hagen 2007).

Para la confección de la malla de cómputo, adecuada a las condiciones de frontera existentes, se siguieron 2 criterios:

1. Mayor densidad en la línea de costa y en las zonas de interés (canal de entrada a la bahía e interior de la misma), e ir disminuyendo su densidad gradualmente al alejarse de la costa.
2. Abarcar la menor cantidad posible de nodos, así como elementos que la conforman.

El cumplimiento de estos criterios garantiza mayor precisión en los resultados con un menor tiempo de cómputo (Hagen et al. 2001).

Para lograr encontrar una malla adecuada a las condiciones del problema se crearon tres líneas de trabajo:

- Variar la resolución de la costa sin cambiar las condiciones del océano.
- Variar la resolución del océano sin cambiar las condiciones de la costa.
- Variar las condiciones del océano y de la costa simultáneamente.

Como resultado de este proceso se obtuvo una malla con un total de 17092 nodos y 32058 elementos o lados de triángulos en su composición, 9 tramos de costa, incluyendo los 4 tramos pertenecientes a los ríos, y 67 nodos en la frontera abierta (océano) (ver figura 1).

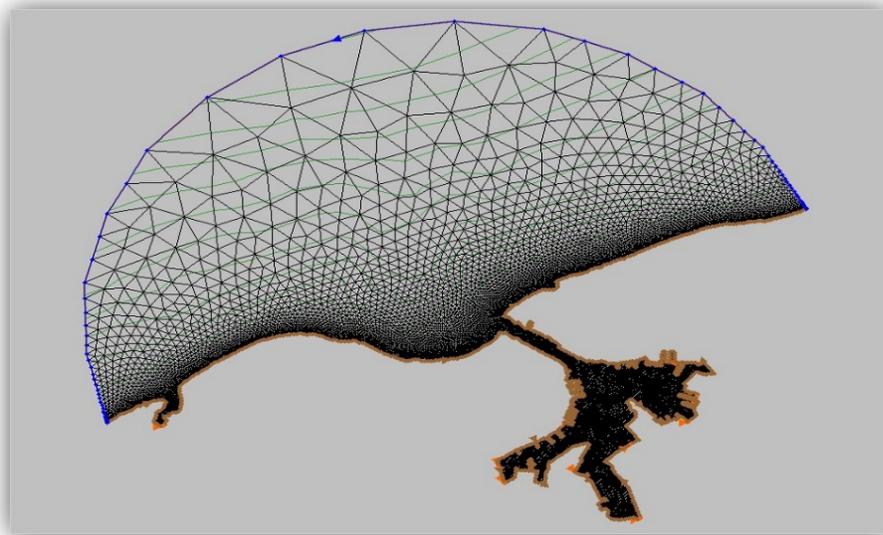


Figura 1. Malla para la modelación

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y NUMÉRICOS

La modelación con ADCIRC exige que sean definidos, en la etapa de pre-proceso, una serie de parámetros físicos y numéricos que son la base de las ecuaciones que contiene el modelo.

Además, es en este punto donde se definen las componentes de la marea que se usarán en la modelación, con su fecha y hora, el tiempo de duración de la modelación, el paso de tiempo de cómputo que empleará el modelo, así como las coordenadas de las boyas virtuales, intervalos de tiempo de salida de datos y las variables que se medirán en la simulación.

Para el estudio se definió emplear 96 horas (4 días) como duración total de la modelación, con un paso de tiempo de cálculo de 1 segundo. Son utilizadas 13 constituyentes de marea de la base de datos (Le Provost et al. 1998), (2N2, K1, K2, L2, M2, MU2, N2, NU2, O1, P1, Q1, S2, T2) y son definidos el formato de entrada de los datos de viento y presiones (NWS=5), incremento de tiempo del archivo de vientos (3600 segundos) y el sistema de coordenadas como parámetros fundamentales de la modelación.

DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Para el desarrollo de la investigación se colocaron 9 boyas virtuales en la zona de estudio, cuya colocación responde al interés de conocer el comportamiento de las variables en dichas zonas. Las boyas se colocaron una en cada río (B1, B2, B3, B4) (ver figuras 2 y figura 3), una en el océano (B5), otra en la zona del malecón tradicional (B7) (ver figura 4) y las restantes distribuidas entre la zona de entrada del canal de la bahía, centro del canal e interior de la bahía (B6, B8, B9) (ver figura 5). La tabla 1 resume la localización de cada boya.



Figura 2. Boya del río Almendares



Figura 3. Boyas de los ríos Luyanó, Martín Pérez y Tadeo, de izq. a derecha



Figura 4. Boyas del océano y malecón tradicional



Figura 5. Boyas de entrada a la bahía, centro del canal de entrada e interior de la bahía

Las variables analizadas en cada escenario son:

1. Elevación del nivel del mar (m).
2. Velocidades de las corrientes (cm/s) y sus direcciones.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS

Escenario 1: Marea

Es el escenario más simple, en el que intervienen sólo las componentes de la marea seleccionadas de la base de datos (LeProvost et al.1998). En este escenario no se consideran los efectos que producen las descargas de los ríos a la bahía, ni la influencia del viento en la superficie del agua. Los estudios de este escenario están dirigidos a dar respuesta a los siguientes aspectos:

1. Comparar los resultados de la simulación con el modelo ADCIRC con los niveles del mar presentados en “Tabla de marea de las costas de Cuba” (SHG 2013), publicación oficial que contiene los pronósticos de marea para los principales puertos y localidades de las costas cubanas.

2. Analizar el comportamiento de las variables hidrodinámicas en las distintas zonas de estudio.

Tabla 1. Ubicación de las boyas virtuales sistema de proyección WGS84

Boya	Coordenadas Oeste – Norte UTM WGS84		Ubicación
	X	Y	
B 0	-82,3537668888	23,1479290000	Caleta de los franceses
B 1	-82,4111563140	23,1300073208	Río Almendares
B 2	-82,3463195789	23,1214008162	Río Luyanó
B 3	-82,3365543337	23,1129277790	Río Martín Pérez
B 4	-82,3288512542	23,1308736136	Río Tadeo
B 5	-82,3760501442	23,1961775282	Océano
B 6	-82,3586416410	23,1490824057	Entrada Bahía
B 7	-82,3684702976	23,1444806690	Malecón tradicional
B 8	-82,3514815244	23,1448580031	Centro canal de entrada
B 9	-82,3391679803	23,1376654156	Bahía interior

Comparación de los resultados de los pronósticos de la tabla de marea 2013, con los de la modelación

Para realizar este análisis, además de las 9 boyas establecidas previamente, se creó una nueva boya virtual (B0), ubicada en la margen Este del canal de entrada. En esta zona existe una estación mareográfica que funciona con carácter permanente y es empleada para registrar los datos de niveles diarios. Esta boya se creó con el objetivo de comparar los resultados de la modelación y la mencionada tabla de pronósticos oficiales “Tabla de marea...”(SHG 2013). La estación está ubicada en una zona conocida como Caleta de los Franceses (ver figura 6).



Figura 6. Boya Caleta de los Franceses

Los datos de salida de la modelación son cada 1 h (ver figura 7), mientras que el documento “Tabla de marea...”(SHG 2013) proporciona los datos para los tiempos en que se producen las pleamares o bajamares locales (ver figura 8). Para comparar ambos resultados se tomaron los días del 1 al 4 de febrero de 2013.

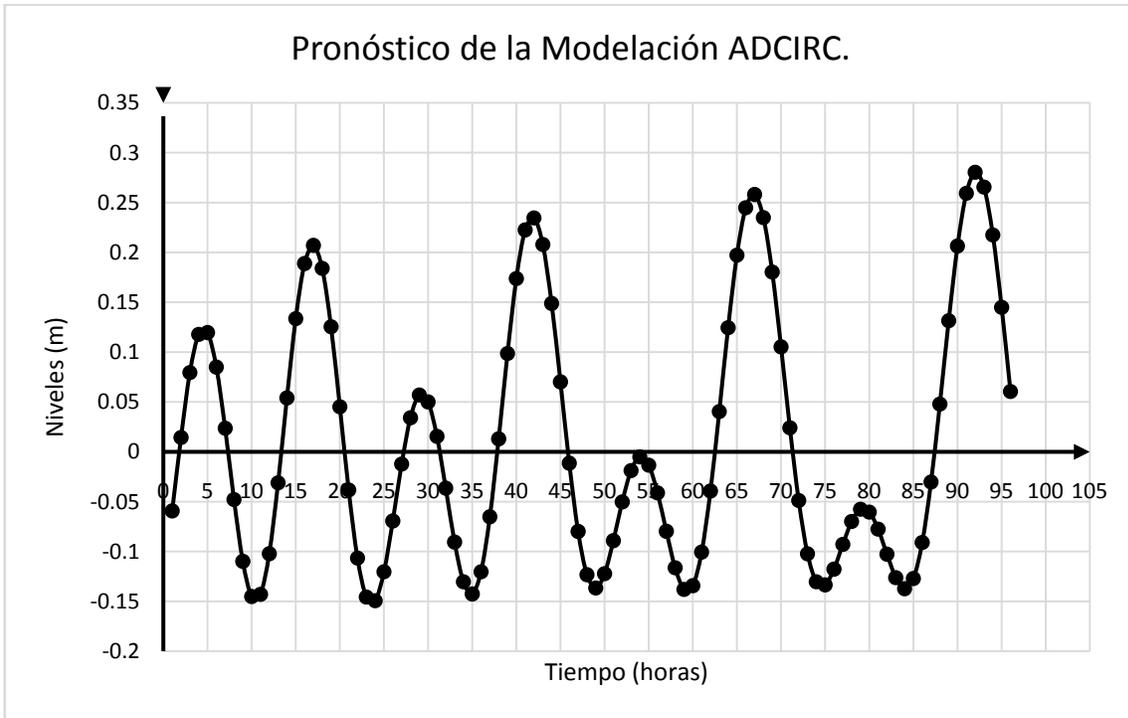


Figura 7. Pronóstico de la modelación ADCIRC

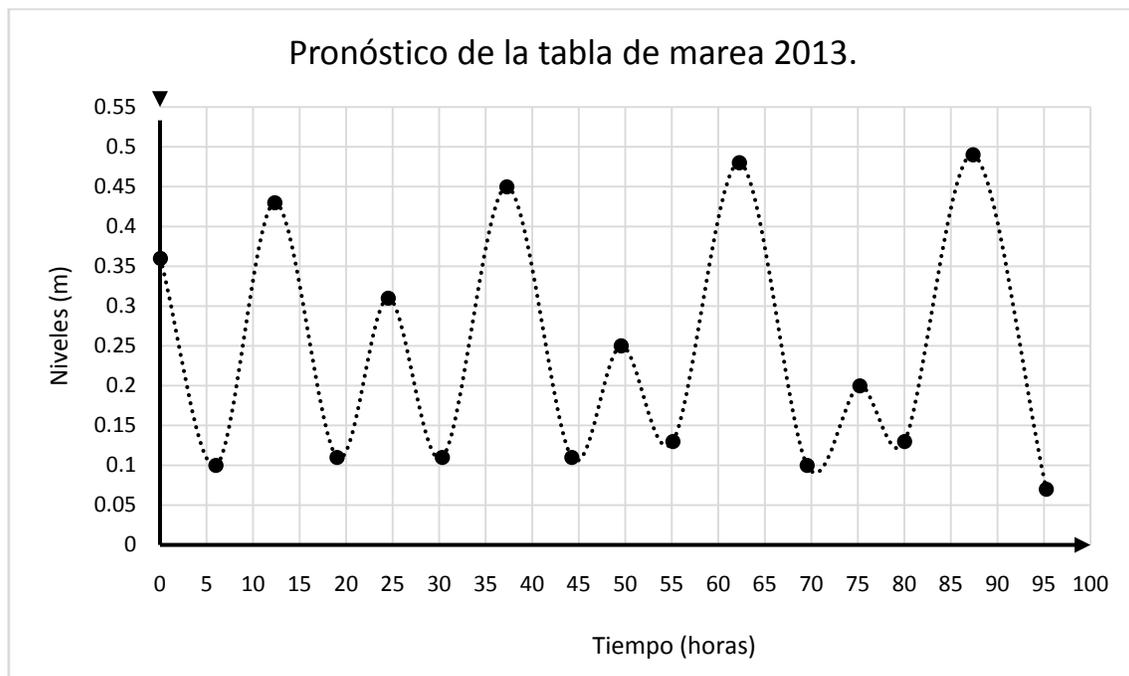


Figura 8. Pronóstico de la tabla de marea 2013

Como se observa en las figuras 7 y 8 existe un desfase entre ambas predicciones, tanto en tiempo como en nivel de marea. El desfase en el tiempo se debe a que las bases de datos de la marea (LeProvost et al. 1998), están configuradas en horario UTC, lo cual implica una diferencia de 4 h con respecto al horario local de Cuba.

Corrigiendo las diferencias de horas, se observa el ajuste en tiempo de los picos de las predicciones del modelo y las de la tabla de marea 2013 (ver figura 9).

Ajustada la diferencia de hora, queda solo corregir el nivel de marea, siendo necesario para esto analizar el plano de referencia de cada pronóstico. El plano de referencia de la Tabla de Marea está dado por la Bajamar Astronómica más baja (Lowest Astronomical Tide - Lat.).

Este plano se encuentra bajo el nivel medio del mar en una magnitud que varía en dependencia de la amplitud que la marea presente en la zona.

Este nivel se calculó tomando como base los juegos de constantes armónicas determinadas en cada localidad (SHG 2013). El modelo ADCIRC hace referencia en sus pronósticos al nivel medio del mar, lo cual implica una diferencia de nivel de 0,24 m respecto a la Tabla de Marea. La corrección de los resultados se muestra en la figura 9.

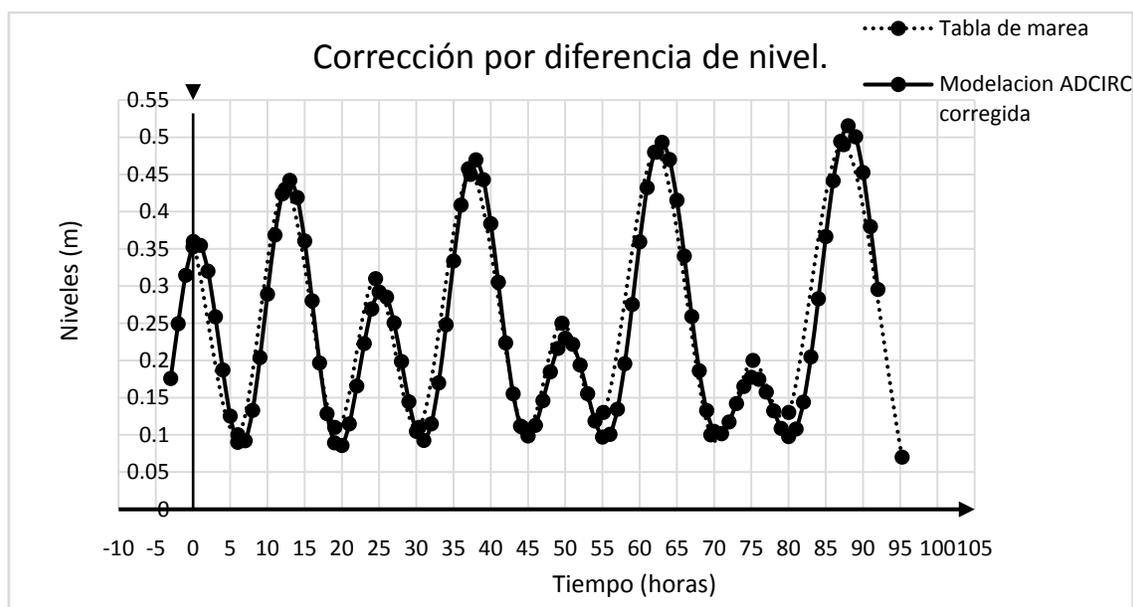


Figura 9. Acoplamiento de los pronósticos de la modelación con ADCIRC y los de la tabla de marea 2013

Comparando estos resultados en la figura 10 puede concluirse que los pronósticos de la tabla de marea y los simulados corregidos no presentan diferencias significativas, como lo indica el valor de $R^2=0,99$.

Esto demuestra que el modelo es confiable para la simulación de fenómenos como este, teniendo en cuenta los ajustes a condiciones locales

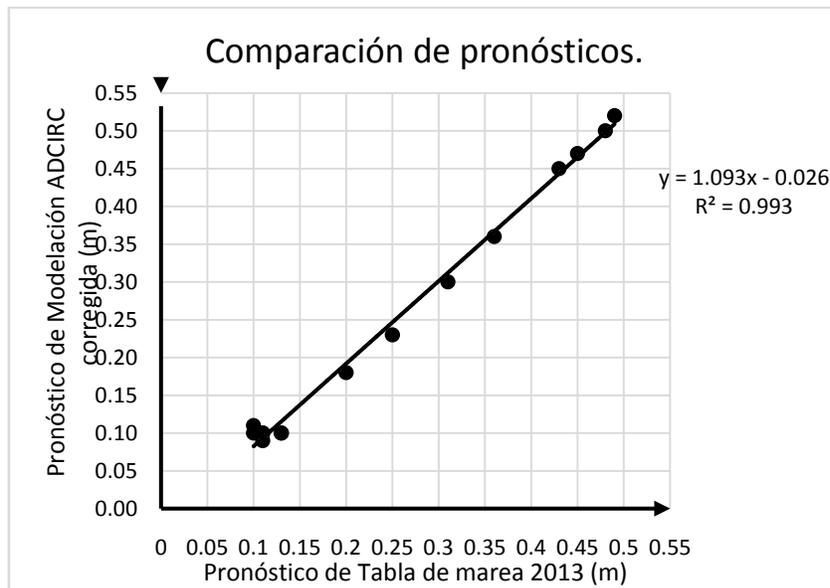


Figura 10. Comparación de los pronósticos de la modelación ADCIRC corregida y los de la tabla de marea 2013

Análisis del comportamiento de las variables hidrodinámicas en las zonas de estudio

La modelación con ADCIRC ofrece los resultados del comportamiento de la marea en las 9 boyas, con intervalos de tiempos de 1 h, durante el período comprendido entre el 1 de febrero de 2013 a las 0:00 horas UTC y el 4 de febrero de 2013 a las 23:59 horas.

El análisis de la variable niveles de marea se realizó para un ciclo de marea de 24 horas, con el objetivo de conocer la influencia que tiene la configuración de la costa y la bahía en los niveles de marea; demostrándose que las diferencias de niveles entre los dos grupos de boyas (exteriores e interiores) para este ciclo están entre 1,00 y 3,00 cm, lo cual es poco significativo e indica que la configuración de la costa, el estrechamiento que produce el canal de entrada y la forma de la bahía no producen variaciones considerables en los niveles de marea.

Al analizar la variable velocidad y dirección de las corrientes pudo determinarse que los patrones de circulación están acordes con el sentido que deben tomar las corrientes para los momentos en que asciende o desciende la marea. Se observa como las corrientes avanzan del océano a la costa y al interior de la bahía cuando crecen los niveles de marea y en sentido contrario cuando descienden.

El accionar de las corrientes de marea impone en el área oceánica direcciones preferenciales para el flujo, hacia el tercer y cuarto cuadrantes oceanográficos (rumbos NW - SW), y para el reflujó, direcciones hacia el primer y segundo cuadrantes oceanográficos. La dirección E sostenida, generalmente se mantiene durante 6 h.

En las 6 h posteriores, ocurre un cambio de dirección de E a W y se asocia principalmente a las mareas mayores de cada día. La dirección W franca transcurre durante 6 h, luego ocurre el cambio de dirección de W a E durante 6 h y se asocia básicamente con las mareas menores de

cada día (GEOCUBA 2010); resultado que el modelo reprodujo con precisión como se observa en las figuras 11 y 12.

Respecto a las velocidades de las corrientes es válido destacar que en la modelación de este escenario no están presentes los efectos del viento en condiciones normales, ni los aportes de otras fuentes (ríos y descargas por sistemas de drenaje), los cuales pueden inducir variaciones en la hidrodinámica de la zona de estudio. En los momentos de calma ocurren según GEOCUBA (2010) velocidades de corrientes medias en el orden de 4,00 cm/s, valores que se corresponden con la media de la modelación de 3,52 cm/s para estas condiciones.

Escenario 2: Marea y ríos

El objetivo de este escenario es analizar la influencia de los ríos sobre los niveles del mar y los patrones de corrientes, en las distintas etapas de la marea. La modelación de este escenario contiene las descargas de los ríos en condiciones normales y las componentes de la marea seleccionadas. Se desprecian los efectos del viento en condiciones normales sobre la superficie del agua.

Las componentes de la marea para la modelación de este escenario son las mismas que se usaron en el escenario 1. Para desarrollar este escenario se asigna un valor de caudal representativo de 0,05 m³/s/m, que se fijó como gasto promedio diario de cada río. Este valor no es el gasto real de los ríos, pero permite analizar el comportamiento de las variables en este escenario.

Para analizar la influencia de los ríos sobre los niveles del mar y los patrones de corrientes en las distintas etapas de la marea, se compararán los niveles pronosticados en el escenario 1, con los pronosticados para este escenario.

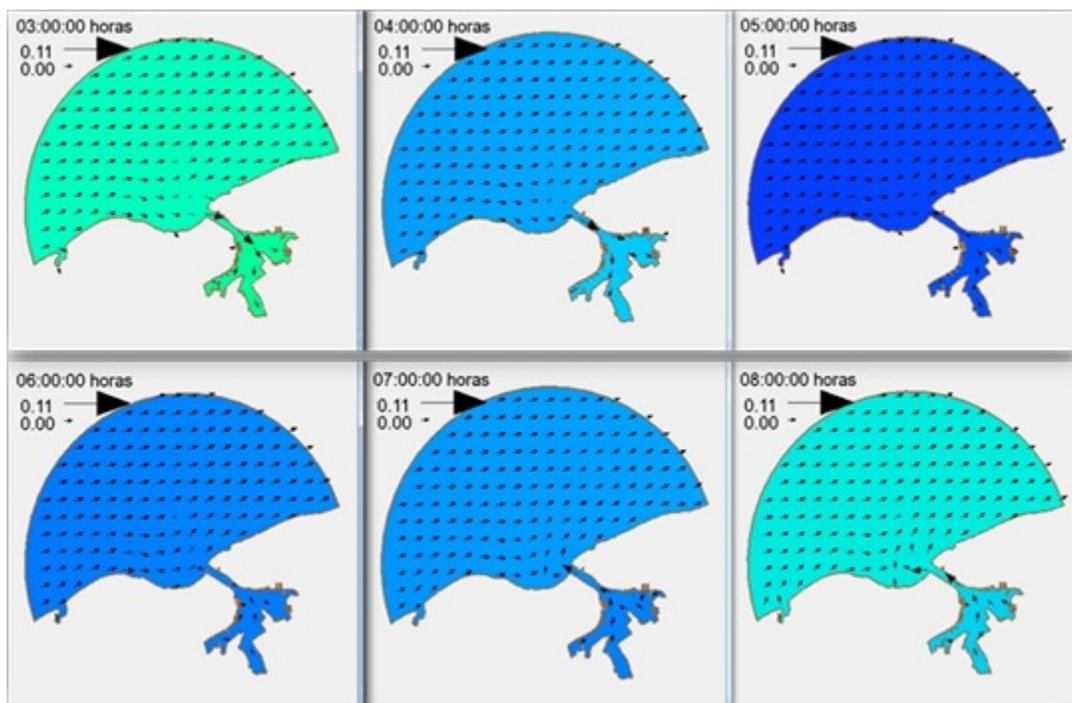


Figura 11. Duración de la dirección Este sostenida de las corrientes

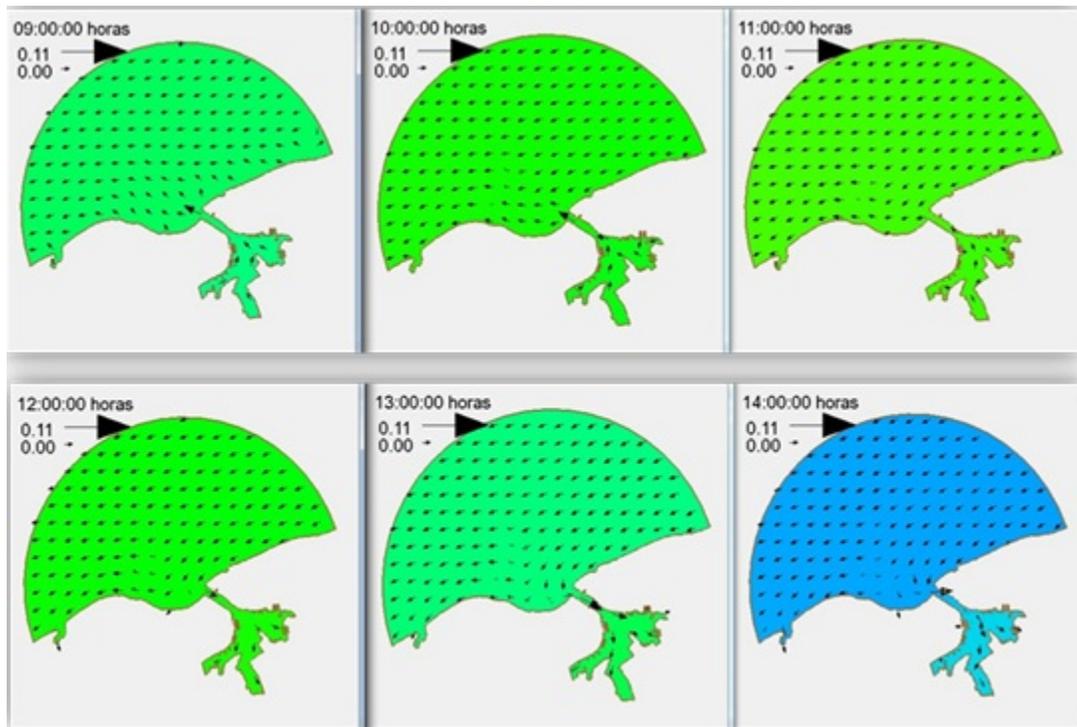


Figura 12. Duración de la dirección Oeste sostenida de las corrientes

El análisis de las variables hidrodinámicas permitió concluir que los ríos no ejercen influencia alguna sobre el nivel de marea, dentro o fuera de la bahía. Sólo en el caso del río Martín Pérez se producen alteraciones de los niveles, debido a que las profundidades de la zona de descarga son menores que 2 m y la energía del flujo es capaz de reducir los niveles del mar en estas zonas.

El comportamiento de las corrientes indica la salida de flujo de cada río y su interacción con las corrientes producidas por la marea. Comparando los resultados de las modelaciones de los escenarios 1 y 2 se observa un aumento de las velocidades de corrientes en las boyas ubicadas en los ríos.

En general es notable el aumento de velocidades de corrientes del escenario 2 en todas las boyas. Los valores de velocidades de corriente más altos se registran en la boya del río Martín Pérez (B3), de acuerdo con las características de la zona de descarga. En esta boya se registran valores de hasta 115,7 cm/s en dirección al NW, indicando movimiento del flujo del río hacia el mar.

Los resultados de la modelación muestran cómo influyen las descargas de los ríos en las direcciones de las corrientes. Cuando la marea asciende, en el escenario 1 las corrientes van del océano a la costa y al interior de la bahía, mientras que en el escenario 2, en las zonas de desembocadura de los ríos, producto de las descargas, se redirigen los movimientos en sentido contrario (ver figura 13).

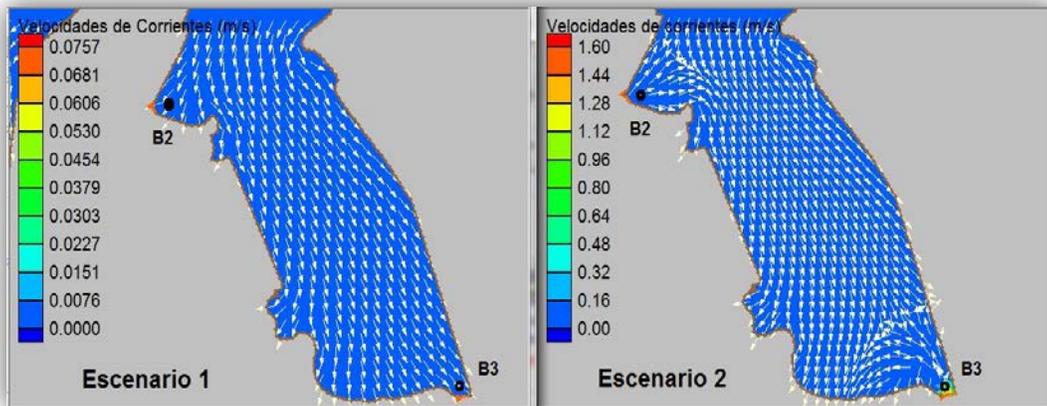


Figura 13. Dirección de las corrientes correspondientes a los ríos Luyanó y Martín Pérez, 04:00 horas UTC, 02/02/13

En la boya B1 (río Almendares), el escenario 2 muestra cómo avanzan las corrientes por el canal de desembocadura, hasta encontrarse con las corrientes que circulan en dirección al NE en las proximidades de la costa. Según GEOCUBA(2010) con una estación colocada en la desembocadura ensanchada del río Almendares se pudo determinar que la fuerza que ejerce el mar, actuando como una barrera hídrica, hace que las velocidades disminuyan en esta área reportándose valores máximos que oscilan entre 3,00 y 4,20 cm/s y medios entre 1,80 y 2,2 cm/s.

La figura 14 muestra el comportamiento de las corrientes de la modelación de este escenario, coincidiendo con lo descrito por GEOCUBA(2010).

El caudal medio diario representativo del río Almendares en la modelación es de 2,15 m³/s, mientras que el real es de 2,74 m³/s según GEOCUBA (2010). Debido a que los valores son muy similares, las velocidades de corriente también deben serlo, aunque los puntos de referencia de la medición y de la modelación están separados por 500 m aproximadamente. La modelación pronostica velocidades entre 2,50 y 3,00 cm/s, en el orden de los medidos por GEOCUBA(2010).

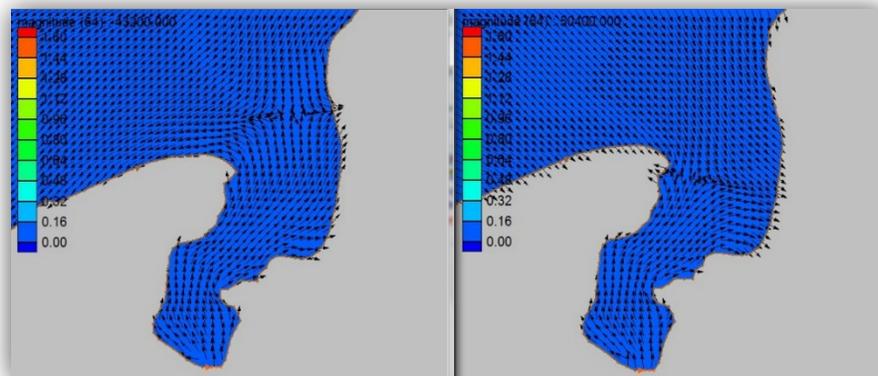


Figura 14. Corrientes en el río Almendares

Escenario 3: Marea, viento promedio anual y descargas promedio diarias a la bahía

Con este escenario se pretende modelar con mayor precisión los fenómenos reales de la zona de estudio, asignando al modelo las descargas reales de agua dulce a la bahía y la acción del viento promedio anual en la dirección predominante (NE). El dominio seleccionado para la realización de la simulación se considera adecuado para estudiar el efecto del viento promedio sobre el comportamiento de los niveles del mar, así como sobre el patrón de corrientes ya que la magnitud del viento promedio es baja, sólo podrá afectar de forma superficial la hidrodinámica del área, no trayendo consigo efectos de surgencia.

Para el desarrollo de este escenario se decidió mantener las descargas de los ríos con un caudal específico de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, debido a que gran parte de las descargas de las industrias tributan a ellos, pero fue necesario crear nuevos puntos de descargas distribuidos en las zonas del interior de la bahía con el objetivo de acercarse a las condiciones reales, puesto que solo los ríos no contienen todos los aportes de agua dulce.

Estos puntos de descarga fueron colocados siguiendo criterios de estudios bibliográficos realizados y se le asignó un gasto específico de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, igual que el de los ríos de la zona. Se seleccionaron 6 puntos de descarga, tratando de mantener longitudes de descargas menores de 45 m.

La velocidad del viento usada en la modelación de este escenario es la media anual del período 1984-1988, donde se reporta un valor medio de 5,2 m/s (Pérez et al. 2001).

Para simular la hidrodinámica de la bahía en condiciones similares a las naturales se incluyen en la modelación las descargas de agua dulce que llegan a la bahía y el viento en condiciones normales en la dirección NE y se comparan con los pronósticos del escenario 2.

La simulación permitió observar que en las boyas tanto del exterior como del interior de la bahía aumentan los niveles de marea para el escenario 3, aunque ocurren disminuciones puntuales en determinados intervalos de tiempo. Las variaciones de nivel de marea entre los escenarios 2 y 3 son inferiores a los 3 cm en el exterior de la bahía y hasta 10 cm en el interior, lo que demuestra la influencia del viento en condiciones normales en la dirección NE y las descargas de agua dulce sobre esta variable.

Analizando las velocidades de corrientes se determina que no existen alteraciones significativas. Incrementos menores que 1,00 cm/s indican que las descargas de agua dulce y los efectos del viento en condiciones normales, producen ligeras variaciones en las velocidades de corrientes en el exterior de la bahía.

En las boyas ubicadas en los ríos (B2, B3, B4) se producen disminuciones de las velocidades de corriente, resaltando los registros de la boya B3 con disminuciones medias alrededor de los 58 cm/s y máximas de 60 cm/s aproximadamente. En las boyas B8 y B9 se producen incrementos y descensos por intervalos de tiempo, con valores que no sobrepasan los 0,90 cm/s.

Estos resultados permiten afirmar que tanto dentro como fuera de la bahía, la combinación de los efectos de las descargas de agua dulce y los vientos de 5,2 cm/s en dirección NE, provocan

alteraciones menores a los 2 cm/s, exceptuando el caso de la boya B3 (río Martín Pérez) donde descienden considerablemente las velocidades.

En el caso de este río, el aumento de las descargas en las zonas adyacentes y la incidencia del viento de forma opuesta a su descarga, provocan que se reduzca la velocidad del flujo de salida.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del escenario 1 se logró el ajuste de los pronósticos de marea del modelo matemático aplicado con los de la “Tabla de marea de las costas de Cuba”, para lo que fue necesario corregir diferencias de tiempo y de plano de referencia, de lo que resultó un coeficiente de correlación de 0,99 entre ambos pronósticos.

La modelación del escenario 2 permitió comprobar que las descargas de los ríos en el interior de la bahía no producen incrementos del nivel de marea, aunque contribuyen al aumento de las velocidades de corrientes.

Un aumento de las descargas a la bahía, unido a la generación de vientos de 5,2 m/s provenientes del NE (forzadores del escenario 3), mostraron incrementos de los niveles de marea hasta 3 cm en el exterior de la bahía y 10 cm en el interior, respecto a los pronosticados para el escenario 2. Estos fenómenos no producen incrementos considerables en las velocidades de corriente en comparación con el escenario 2.

La presente investigación sirvió de base para el establecimiento del modelo a escala local. Estudios posteriores estarán encaminados a la modelación de eventos extremos, para lo que se hace necesario ampliar el dominio de trabajo de escala local a escala regional, además de la aplicación de algoritmos generación de las mallas como son los desarrollados por Parrish and Hagen (2007), que permiten generar mallas más eficientes en función del fenómeno meteorológico que se desee modelar.

REFERENCIAS

- Córdova L. y González Y.** (2014). “Campo de oleaje en la bahía de La Habana para diferentes escenarios climáticos”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, ISSN: 1815-591X, vol. 35, no. 2, pp. 3-17, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Dietrich J., Tanaka S., Westerink J., Dawson C., Luetlich R., Zijlema M., Holthuijsen L., Smith J., Westerink L. and Westerink H.** (2011) “Performance of the Unstructured-Mesh, SWAN+ADCIRC Model in Computing Hurricane Waves and Surge.” Journal of Scientific Computing, vol. 52, pp. 468-497, ISSN: 1573-7691 (electronic version), Springer International Publishing AG, USA.
- Espinosa M. A. y García J. M.** (1983). “Inventario y caracterización de fuentes contaminantes”. Informe Técnico. Instituto de Investigaciones del Transporte. Ministerio del Transporte, La Habana, Cuba.

GEOCUBA(2010). “Estudios oceanográficos del área costera del Malecón Habanero”. Informe Técnico de Estudios Marinos. Agencia de Oceanografía, Empresa GEOCUBA.La Habana, Cuba.

Hagen S., Weterink J., Kolar R. and Horstmann O. (2001).“Two-dimensional, unstructured mesh generation for models”. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 35, pp. 669-686, ISSN: 1097-0363,John Wiley & Sons, USA.

Le Provost C., Genco M. L., Lyard F., Vincent P. and Canceil P. (1998). “A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set.”. J. of Geophysical Research, vol. 103, pp. 5513-5529, ISSN: 1097-0363,John Wiley & Sons, USA.

Mitrani X. I. (2006). “Las inundaciones costeras en Cuba su representación social”. Informe Técnico. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.

Parrish D. and Hagen S. (2007) “2D unstructured mesh generation for oceanic and coastal tidal models from a localized truncation error analysis with complex derivatives”. International Journal of Computational Fluid Dynamics, vol. 21, no. 7, pp. 277-296, ISSN:1061-8562, Taylor & Francis Group, USA.

Pérez O. P., Casals R., Vega R., del Sol A. y Hernández N. (2001). “Sistema de información y referencia de los fenómenos meteorológicos y oceanográficos que han afectado la costa norte de la región occidental de Cuba con inundaciones costeras por penetraciones del mar”. Informe de resultado. Instituto de Meteorología. pp. 30.La Habana, Cuba.

SHG (2013). “Tabla de mareas de las costas de Cuba”. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba. Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias, La Habana, Cuba.