

## Estudio de la surgencia durante eventos de inundación costera en la costa sur-occidental de Cuba

**Edgar Stefano**

E-MAIL: edgstefano@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.

**Luis F. Córdova López**

E-MAIL: cordovalopez1962@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.

### RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de la surgencia al paso los ciclones tropicales Iván (2004) y Gustav (2008), eventos asociados a inundaciones costeras en la zona; aplicando Delft3D-FLOW con el objetivo de determinar su influencia en las sobrelevaciones totales del mar ocurridas. Se obtuvieron gráficos de elevación del mar debido a la surgencia en La Coloma, Playa Bailen, Cabo de San Antonio, Playa Bibijagua y en Carapachibey. Ante la ausencia de datos medidos, se validó comparando los resultados con estudios anteriores y modelando en otra zona, con presencia de estaciones de medición del nivel del mar, pero aplicando la misma metodología. Finalmente se concluyó que la aplicación del modelo bajo la metodología empleada, describió correctamente el fenómeno.

**PALABRAS CLAVES:** eventos hidrometeorológicos, huracanes, marea de tormenta, modelación costera

## Storm surges study during coastal flooding events in the southwestern coast of Cuba

### ABSTRACT

This paper presents a study of the upwelling of tropical cyclones Iván (2004) and Gustav (2008), both associated with coastal flooding in the area. The Delft3D-FLOW model was applied in order to determine its influence on the total sea surges that occurred. Graphs of sea elevation due to upwelling were obtained at La Coloma, Playa Bailen, Cabo de San Antonio, Playa Bibijagua and Carapachibey. In the absence of measured data, it was validated by comparing the results with previous studies and modeling in another area, with the presence of sea level measurement stations, but applying the same methodology. Finally, it was concluded that the application of the model under the methodology used correctly described the phenomenon.

**KEYWORDS:** hydrometeorological events, hurricanes, storm surge, coastal modeling

## 01 INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha incrementado los daños producidos por las inundaciones costeras (IC), siendo más vulnerables los pequeños estados insulares. (IPCC-WGI, 2021). Específicamente Cuba es afectada cada año por múltiples eventos meteorológicos asociados a las IC (Hidalgo-Mayo et al., 2017). Según Mitrani et al. (2000), históricamente las mayores inundaciones han sido generadas al paso de ciclones tropicales (CT), de los cuales, además, se espera un aumento en intensidad y frecuencia en el futuro (Emanuel, 2013). Estos eventos generan sobrelevación temporal de nivel del mar a través de las mareas de tormenta o surgencia, arrastre del viento y oleaje.

Estas condiciones han aumentado el interés sobre lo CT, las inundaciones y la relación que existen entre ellos; facilitado por el desarrollo actual de la informática y los modelos computacionales de generación del oleaje, hidrodinámicos y atmosféricos.

Los modelos son una potente herramienta para el estudio de escenarios futuros y problemas teóricos difíciles de estudiar en los laboratorios, bien por limitaciones económicas o logísticas. En ingeniería costera y marítima han sido aplicadas en la predicción de las evoluciones de tormentas tropicales, surgencia de tormenta, cambios morfológicos en perfiles de playas, entre muchas otras investigaciones.

Ente estos modelos se encuentran los de la plataforma Delft3D (FLOW, MOR y WAVE), de gran prestigio, destacándose en la estabilidad y precisión. Este, ha sido desarrollado por la empresa holandesa Deltares y está diseñado para aplicaciones costeras, ribereñas y estearinas, simulando condiciones de flujo, oleaje, transporte de sedimentos, calidad de agua, ecología y morfología a través de sus modelos (Deltares, 2018). Es de acceso público y código abierto. Utiliza el método numérico de las diferencias finitas para el desarrollo de las ecuaciones físicas y las mallas horizontales pueden ser cartesianas, curvilíneas y estructuradas.

En Cuba el modelo Delft3D-FLOW se ha aplicado en años recientes por el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) ya sea para el estudio independiente de la hidrodinámica del mar o acoplado con Delft3D-WAVE, el modelo de oleaje integrado al Delft3D. Entre estas investigaciones se encuentran las tesis diploma de Orta (2020) y Morejón (2020) en las que se estudian los sobrepasos del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia de los huracanes Wilma (2005) e Irma (2017) respectivamente usando el acoplamiento de Delft3D FLOW y WAVE. Previamente, existen antecedentes dentro del mismo grupo de investigaciones con otros modelos hidrodinámicos. Entre los casos más recientes se encuentran los trabajos de (Portela y Córdova 2016) y Rodríguez et al. (2020) desarrollados con el modelo ADCIRC (ADvanced CIRCulation Model) y ADCIRC+SWAN (Simulating Waves Nearshore Model).

Teniendo en cuenta lo anteriormente referido, este trabajo centró sus esfuerzos en el estudio mediante Delft3D-FLOW de la surgencia al paso los CT Iván (2004) y Gustav (2008), ambos asociados a IC al sur-occidental de Cuba, con el objetivo de determinar la influencia de esta variable en la sobrelevación del mar durante estos eventos en la zona. En la figura 1 se muestra las trayectorias de ambos CT a su paso por el Caribe y el Sur de Estados Unidos.

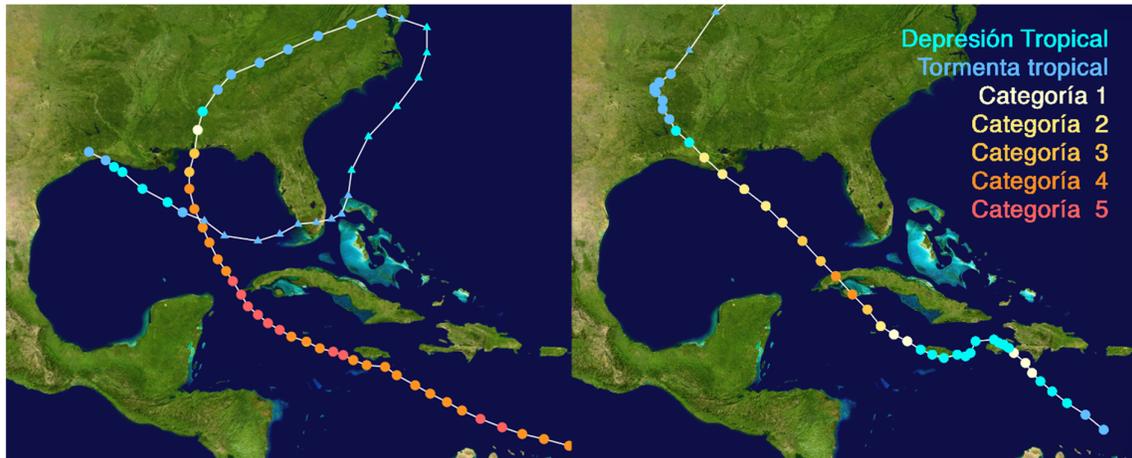


Figura 1 Trayectorias en el Caribe de los CT Iván (2004), en la imagen de la izquierda y Gustav (2008), a la derecha.

El Huracán Iván tuvo su paso por Cuba entre los días 13 y 14 de septiembre de 2004, acompañado de fuertes vientos y generando lluvias intensas en el occidente del país. En la costa sur de la Isla de la Juventud se produjeron IC por penetraciones del mar, al igual que en las zonas bajas de la costa sur de la región occidental. La altura de la surgencia calculada para la costa sur de Pinar del Río, desde La Coloma hasta el Cabo de San Antonio, estuvo en el rango de 1,8 y 3,7 metros. (INSMET, 2022b)

Por su parte, el huracán Gustav fue el segundo huracán más destructivo de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2008. Tuvo influencia en la costa sur de Cuba entre los días del 27 y día 31. El centro de Gustav, siendo un huracán de categoría 4 cruzó sobre la costa oriental de la Isla de la Juventud. (INSMET, 2022a)

Una vez en el golfo, Gustav se debilitó gradualmente pasando a huracán de categoría 2 a fines del 31 de agosto y permaneció con esa intensidad hasta tocar tierra en la mañana del 1 de septiembre cerca de Cocodrie (Luisiana, Estados Unidos). El debilitamiento continuó, y Gustav se convirtió en una tormenta tropical esa noche y a una depresión tropical al día siguiente mientras deambulaba por el centro sur de los Estados Unidos.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación es de tipo experimental, cuantitativa, longitudinal en el tiempo y de carácter exploratorio. Se basa en el método de modelación, al simplificar el objeto de investigación en un modelo capaz de reflejar idealmente la realidad, sustentado en la lógica de la ciencia. Se emplearon modelos espaciales, temporales, hidrodinámicos para simular el comportamiento de sistemas reales de mayor complejidad.

En la metodología aplicada para aplicar los modelos, el primer paso fue la elección y el procesamiento de los datos atmosféricos necesarios (vientos y presiones) se emplearon datos climáticos de re-análisis de la base de datos ERA5 del C3S (Copernicus Climate Change Services) de la ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts), disponibles en <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>. Estos datos son entrados al modelo como mallas de vientos.

Ante la ausencia de mediciones en la costa sur de Cuba, la validación de los modelos se basó en observaciones y estimaciones registradas en la literatura durante la ocurrencia de estos fenómenos, y en la aplicación del modelo aplicando la misma metodología para simular la surgencia al paso de Gustav cerca de las costas de Cocodrie, zona en la que existen estaciones de medición de nivel pertenecientes a la NOAA, cuyos datos son públicos en <https://tidesandcurrents.noaa.gov>. Se seleccionaron 4 estaciones, cuyas ubicaciones e identificación (ID) se muestran en la figura 2.

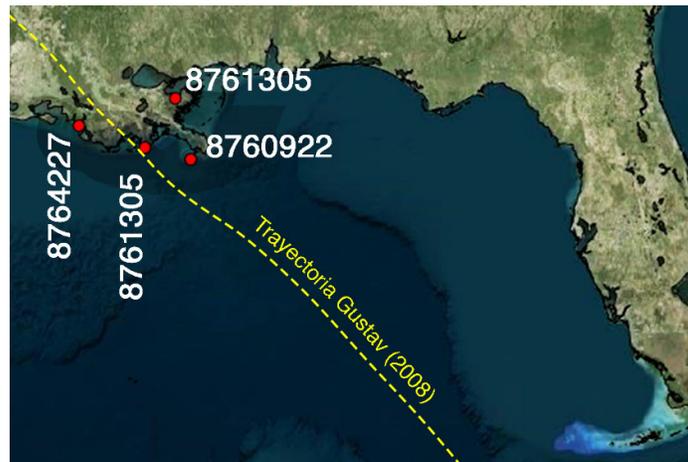


Figura 2 Ubicación e ID de las estaciones de medición de nivel del mar empleadas para la validación

Para los modelos se emplearon dos configuraciones de mallas de características similares, una para la validación, y otra para los casos de estudio en la zona sur-occidental de Cuba. Ambas configuraciones de mallas fueron anidadas como se muestran en la figura 3, siendo la resolución de la malla exterior de  $0,025^\circ$  (aproximadamente 2,78 km) y la malla interior de  $0,005^\circ$  (aproximadamente 0,56 km). Para las mallas exteriores se empleó la batimetría GEBCO 08, mientras para las anidadas se empleó SURA del Golfo de México en el modelo de validación y una batimetría local para la zona caso de estudio.

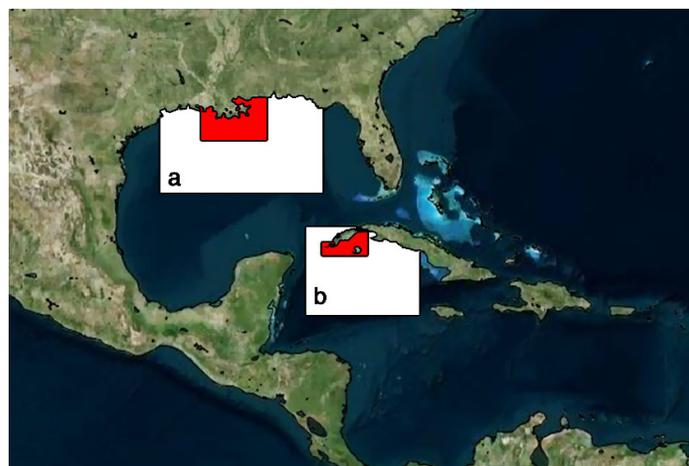


Figura 3 Mallas de cómputo para la calibración en la costa sur de Estados Unidos (a) y la modelación en la zona sur-occidental de Cuba (b).

Como parte del estudio se colocaron puntos de observación virtuales, de los que no se tienen mediciones pero que permiten conocer el comportamiento de la surgencia en el sur occidental. Los

puntos seleccionados se ubicaron, como se ilustra en la figura 4, en La Coloma, Playa Bailen y Cabo de San Antonio en Pinar del Río. Para la Isla de la Juventud se ubicaron puntos en Playa Bibijagua y en Carapachibey.



Figura 4 Ubicación de los puntos virtuales de observación

La ubicación geográfica de estos puntos se detalla en la tabla 1.

Tabla 1 Ubicación de los puntos virtuales de observación

Boya virtual	Latitud (°)	Longitud (°)
Cabo de San Antonio, Pinar del Río	21,864	-84,951
La Coloma, Pinar del Río	22,231	-83,559
Playa Bailen, Pinar del Río	22,158	-83,931
La Coloma, Pinar del Río	22,231	-83,559
Playa Bibijagua, Isla de La Juventud	21,900	-82,742
Carapachibey, Isla de La Juventud	21.500	-82.917

### 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en las figuras de la 5 a la 8 se muestran gráficos del nivel del mar calculado mediante el modelo en comparación a las mediciones y la predicción en cada una de las estaciones de observación seleccionadas. Estos resultados, como se expuso previamente fueron empleados para validar los modelos.

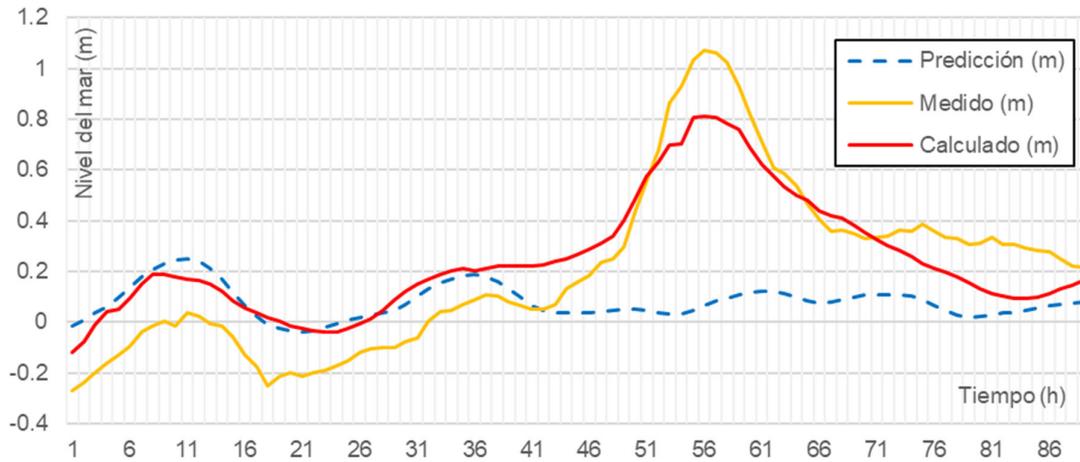


Figura 5 Comparación de los niveles del mar calculados en la modelación con la predicción y lo medido por la estación 8760922 al paso de Gustav (2008)

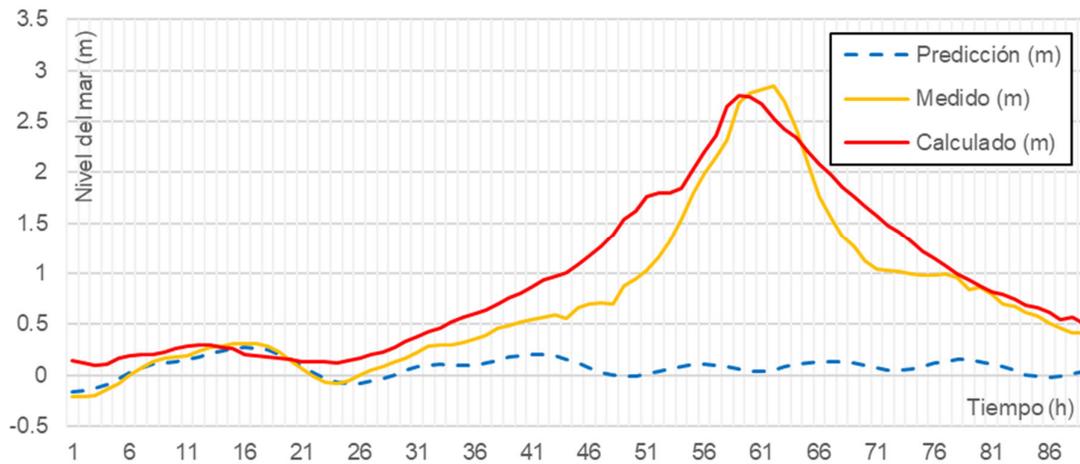


Figura 6 Comparación de los niveles del mar calculados en la modelación con la predicción y lo medido por la estación 8761305 al paso de Gustav (2008)

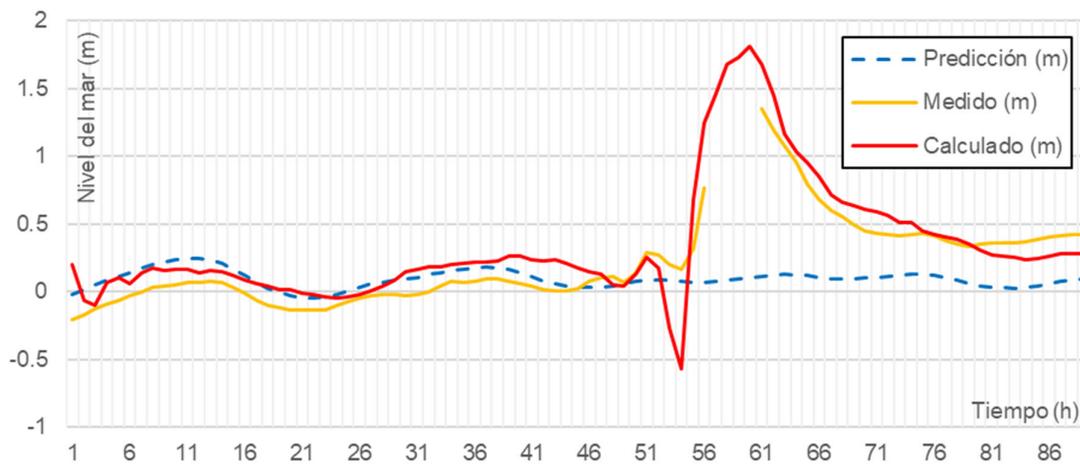


Figura 7 Comparación de los niveles del mar calculados en la modelación con la predicción y lo medido por la estación 8761305 al paso de Gustav (2008)

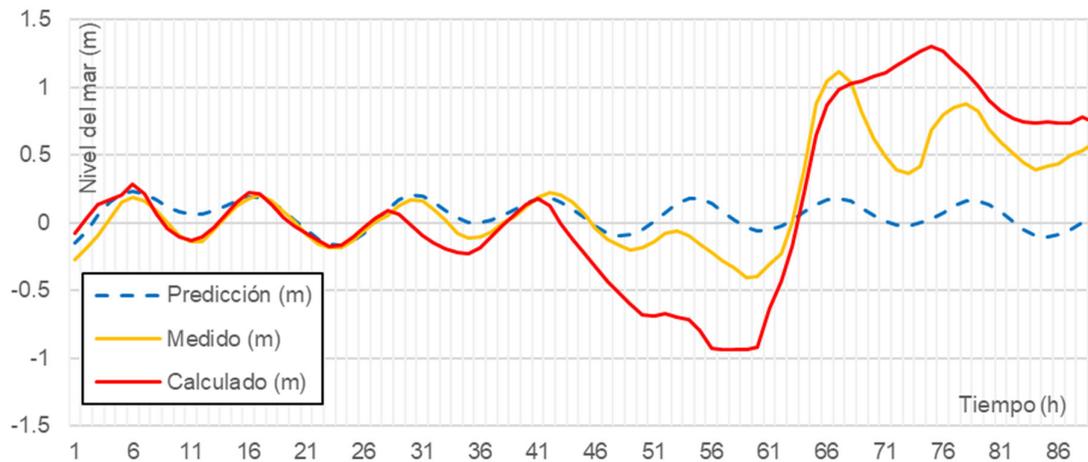


Figura 8 Comparación de los niveles del mar calculados en la modelación con la predicción y lo medido por la estación 8764227 al paso de Gustav (2008)

En los gráficos se puede observar una buena correspondencia entre los resultados de la modelación y los valores medidos. Esto se puede constatar en la tabla 2 donde se relacionan el coeficiente de correlación de Pearson, el SKILL y los errores cuadráticos medios (RMS) entre los valores medidos y los calculados para cada una de las estaciones de observación. Para el caso de los coeficientes de correlación se obtuvo mejores resultados para la estación 8761305, sin embargo, en esta estación se obtuvo el mayor error cuadrático medio (0,369m), pero que se puede considerar igualmente un buen resultado. En el caso de las estaciones 8764227 y 8761305 se obtuvieron los valores más bajos de correlación según los coeficientes Pearson y SKILL respectivamente, sin que estos dejen de ser buenos resultados.

Tabla 2 Coeficientes estadísticos de relación de datos y el error cuadrático medio entre las estaciones de observación y los datos calculados.

Estaciones	8760922	8761305	8761305	8764227
Pearson	0.915	0.964	0.865	0.860
SKILL	0.560	0.716	0.193	0.456
RMS (m)	0.171	0.369	0.297	0.330

Los valores de elevación del mar para la modelación al sur-occidental en el Cabo de San Antonio y Carapachibey al paso del huracán Iván se presentan a continuación (figuras 9 y 10).

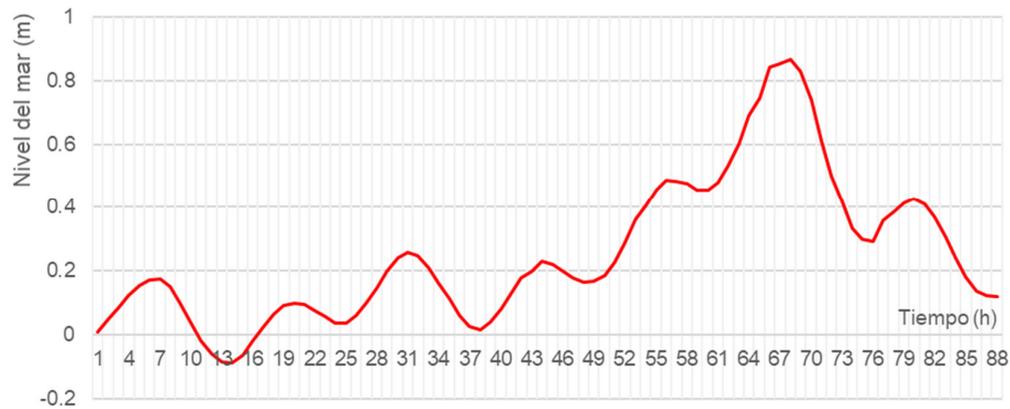


Figura 9 Niveles del mar calculados en el Cabo de San Antonio al paso del huracán Iván (2004)

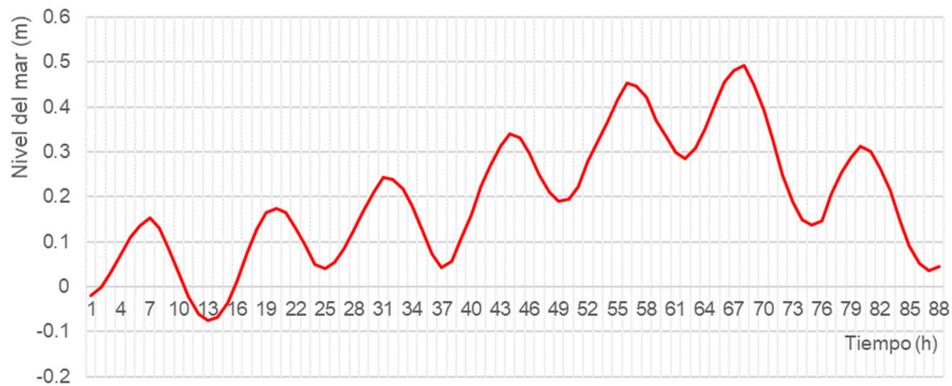


Figura 10 Niveles del mar calculados en Carapachibey al paso del huracán Iván (2004)

También, para el huracán Iván, se hicieron comparaciones entre los resultados de la modelación mediante Delft3D-FLOW (figura 11) y resultados previos obtenidos por Fernández (2019) mediante el modelo ADCIRC para La Coloma y Playa Bailen (figura 12).

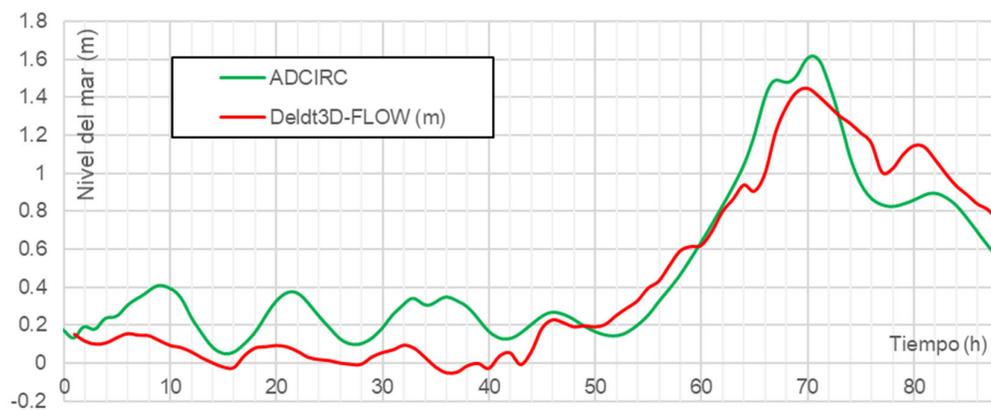


Figura 11 Niveles del mar calculados en La Coloma al paso del huracán Iván (2004)

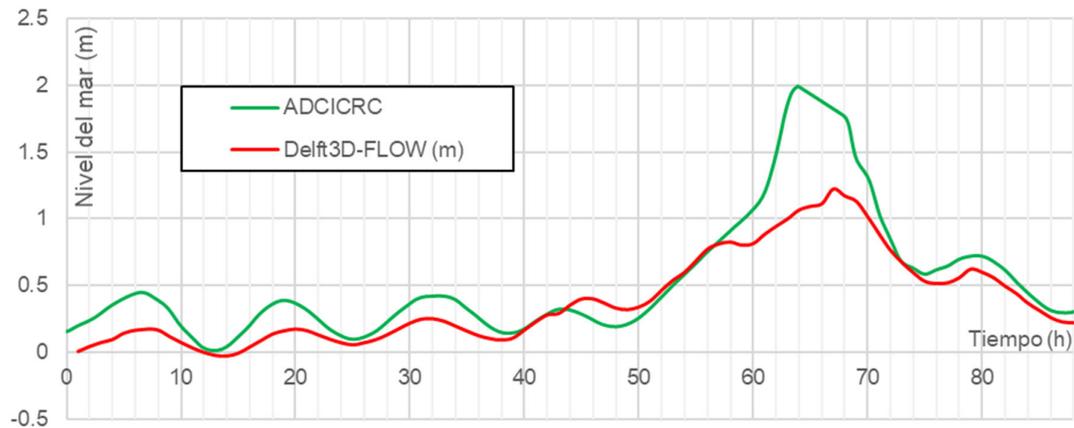


Figura 12 Niveles del mar calculados en Playa Bailen al paso del huracán Iván (2004)

Los resultados obtenidos entre los dos modelos son congruentes, lo que aumenta la validez de ambos.

Específicamente para la hora de máxima surgencia, ocurrida el 18:00 del 13 de septiembre de 2004, GTM se graficaron las magnitudes de la elevación del mar y los vectores de dirección del viento. Los resultados se muestran en la figura 13.

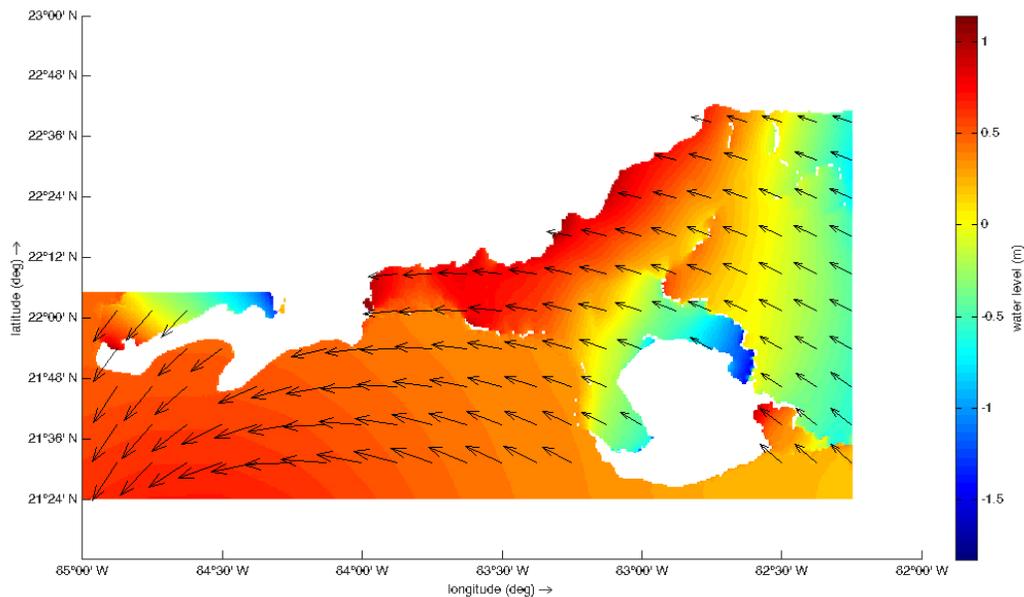


Figura 13 Magnitud de la elevación del mar a la hora de máxima (18:00 del 13 de septiembre de 2004, GTM) y los vectores de dirección del viento del huracán Iván (2004)

En esta última figura es evidente la fuerte relación entre la dirección del viento y la surgencia.

Mientras, para el paso del huracán Gustav se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación (figuras de la 14 a la 18)

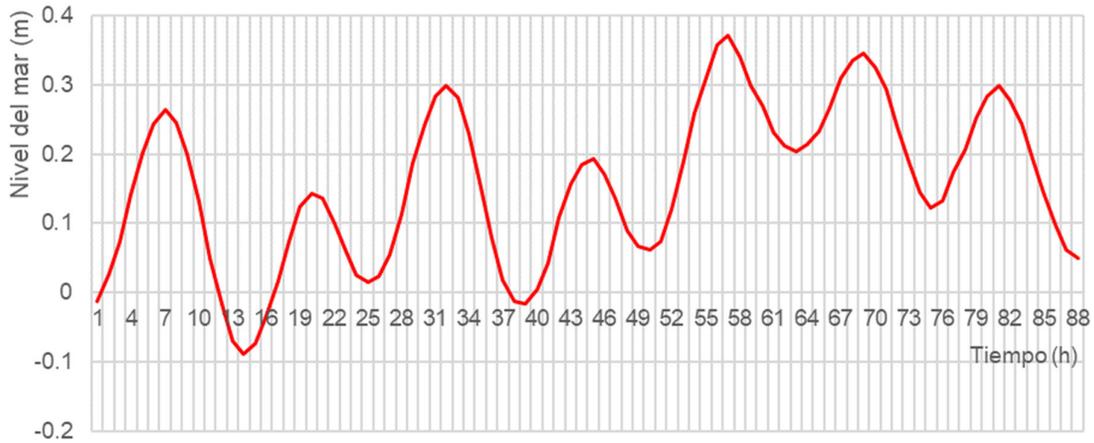


Figura 14 Niveles del mar calculados en el Cabo de San Antonio al paso del huracán Gustav (2008)

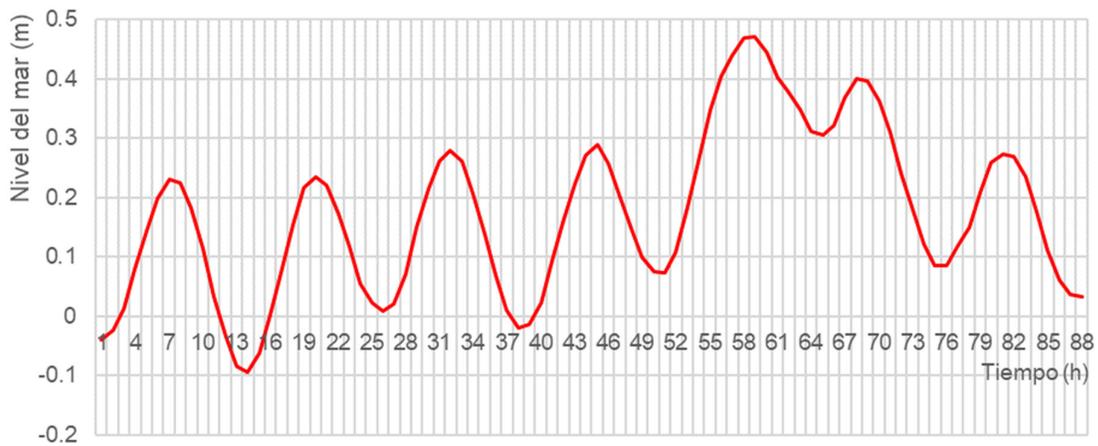


Figura 15 Niveles del mar calculados en Carapachibey al paso del huracán Gustav (2008)

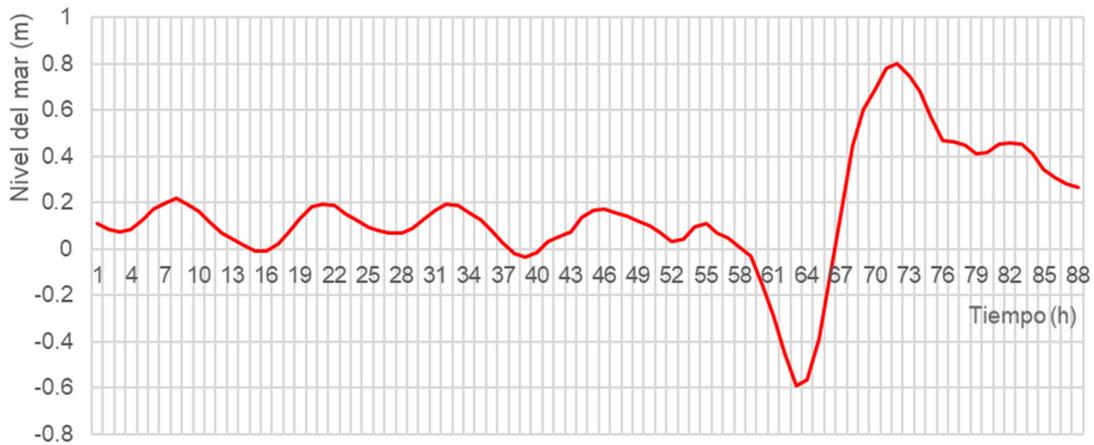


Figura 16 Niveles del mar calculados en La Coloma al paso del huracán Gustav (2008)

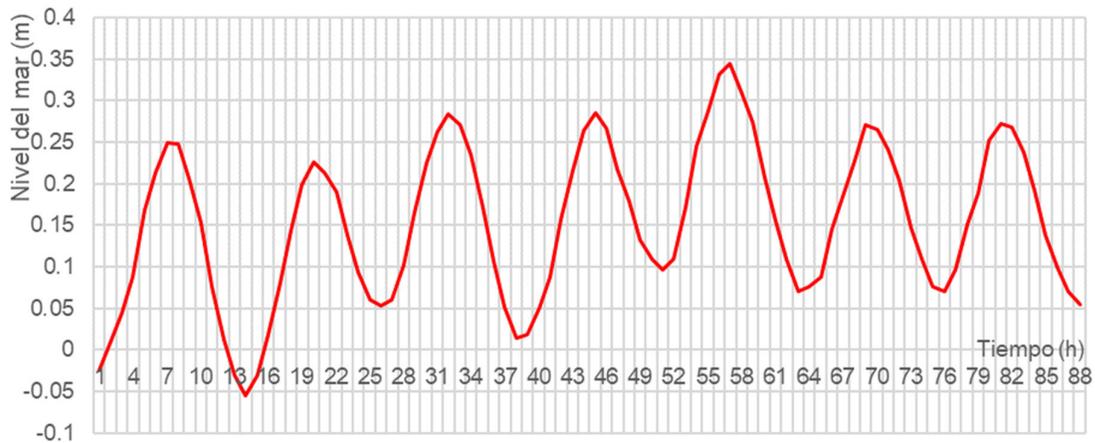


Figura 17 Niveles del mar calculados en Playa Bailen al paso del huracán Gustav (2008)

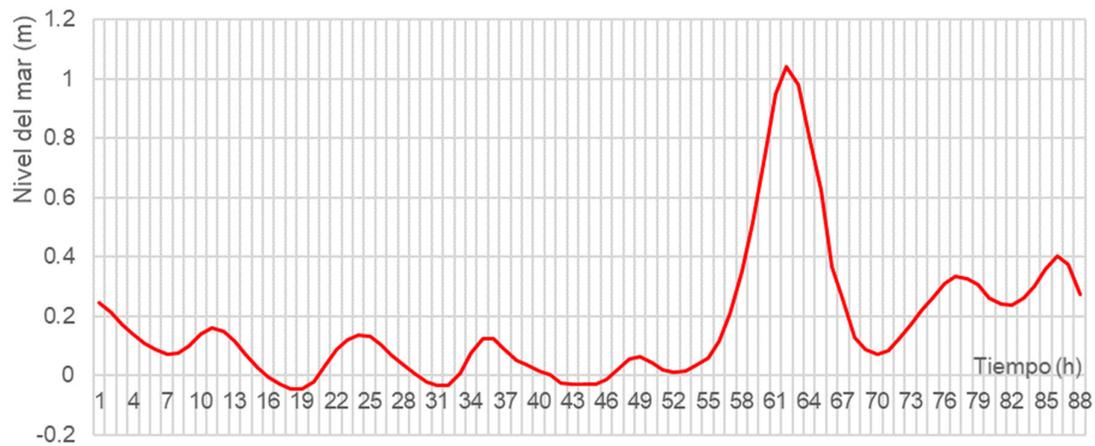


Figura 18 Niveles del mar calculados en Playa Bibijagua al paso del huracán Gustav (2008)

Estos últimos resultados, en comparación a los del huracán Iván, permiten afirmar que la sobrelevación del mar por surgencia al paso Gustav fue menor que la ocurrida al paso de Iván.

La elevación del mar y los vectores de dirección del viento también fueron graficados para este huracán a la hora de máxima surgencia, a las 19:00 horas GTM del 30 de agosto de 2008. Los resultados se muestran en la figura 19.

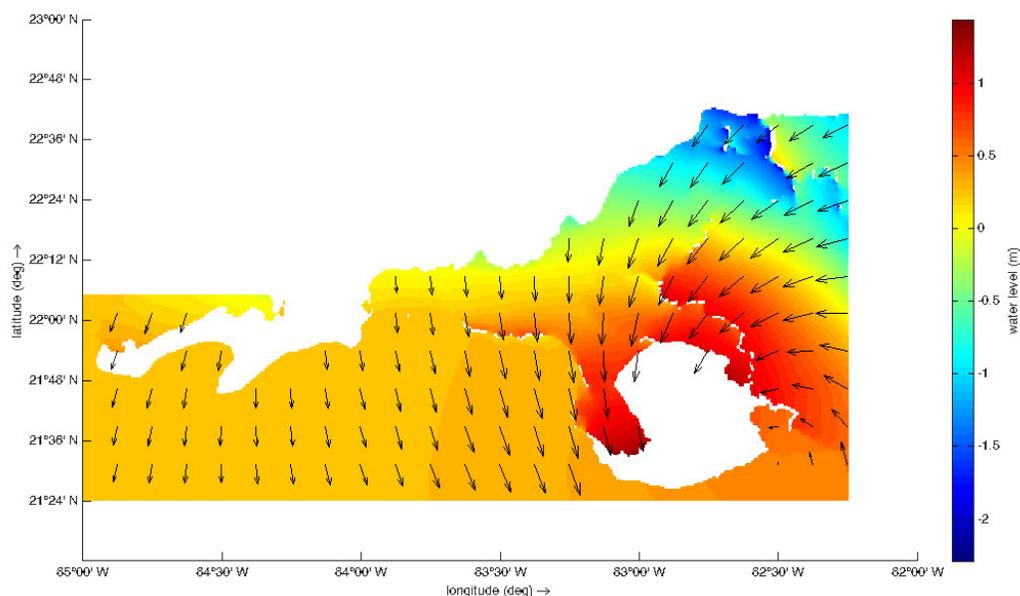


Figura 19 Magnitud de la elevación del mar a la hora de máxima (19:00 del 30 de agosto de 2008, GTM) y los vectores de dirección del viento del huracán Gustav (2008)

## 04 CONCLUSIONES

Del trabajo se concluye que:

Para el modelo empleado en los puntos estudiados se obtuvo el nivel máximo de elevación del mar para el huracán Iván, en La Coloma, alcanzando 1,45m. Mientras, para el huracán Gustav, se obtuvo la mayor elevación en Playa Bibijagua, de 1m.

La aplicación del modelo Delft3D-FLOW con la metodología empleada, describieron correctamente la elevación del nivel del mar debido a la surgencia en la zona de estudio al paso de los huracanes Iván (2004) y Gustav (2008).

La aplicación de coeficientes estadísticos de relación de datos y el error cuadrático medio entre las estaciones de observación y los datos calculados, permitió comprobar los buenos resultados del modelo durante la validación.

Para la misma zona la surgencia puede tener una distribución diferente para diferentes Huracanes, al estar fuertemente asociada a las velocidades y direcciones del viento, propio de cada huracán.

La surgencia al paso del huracán Iván fue mayor que al paso del huracán Gustav.

## 05 REFERENCIAS

- Deltares** (2018). Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. In. Holland.
- Emanuel K. A.** (2013). Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(30), 12219-12224. ISSN:0027-8424. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1301293110>. Estados Unidos

- Fernández G.** (2019). Generación de una malla de cómputo no estructurada de alta resolución asociada a un sistema de alerta temprana para la predicción de la surgencia en ciclones tropicales. Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.
- Hidalgo-Mayo A., Mitrani-Arenal I. y Pérez-Rivas G.** (2017). Cronología y clasificación de las inundaciones costeras en Cuba. Paper presented at the IX Congreso Cubano de Meteorología, La Habana, Cuba. <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/2307>
- INSMET** (2022a). Resumen Sinóptico Mensual (Agosto 2008)- Influencia de Fay y Gustav. extraído de <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TBO=PLANTILLAS&TB1=MES&TB2=/Mes/AGOSTO2008.HTM&TB3=2008>. Cuba
- INSMET** (2022b). Resumen Sinóptico Mensual (septiembre 2004)-Azote del huracán Ivan. extraído de <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TBO=PLANTILLAS&TB1=MES&TB2=/Mes/SEPTIEMBRE2004.HTM&TB3=2004>. Cuba
- IPCC-WGI** (2021). AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Retrieved from Cambridge University Press, Reino Unido: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- Mitrani I., Parrado R. P., Concepción O. G., García I. S., Allen Y. J., Pérez M. B., Padrón P. B., Hernández A. L. P. y Otero C. R.** (2000). Las zonas más expuestas a las inundaciones costeras en el territorio cubano y su sensibilidad al posterior incremento del nivel medio del mar por cambio climático. Revista Cubana de Meteorología, 7(1). ISSN:2664-0880. Extraído de <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/385>. Cuba
- Morejón B. I.** (2020). Estudio del sobrepaso del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Irma 2017 aplicando el modelo Delft3D. (Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Hidráulico). Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.
- Orta C.** (2020). Estudio del fenómeno del rebase promedio del oleaje en el malecón de La Habana durante la ocurrencia del huracán Wilma 2005 aplicando el modelo Delft 3D. (Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Hidráulico). Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, Cuba.
- Portela M. P. y López L. F. C.** (2016). Simulación hidrodinámica del malecón habanero y la bahía de la Habana. Ingeniería hidráulica y ambiental, XXXVII(3), 59-73. ISSN:2788-6050. Cuba Extraído de <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/346>
- Rodríguez J. y Córdova L. F.** (2020). Hidrodinámica costera durante el huracán Wilma (2005) en Artemisa, Mayabeque y La Habana Ingeniería hidráulica y ambiental, XLI(2), 3-17. ISSN:2788-6050. Extraído de <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/513>. Cuba

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Edgar Stefano** <https://orcid.org/0000-0001-8548-2149>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, modelación, redacción del documento y análisis y discusión de los resultados.

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

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, redacción del documento y análisis y discusión de los resultados