

Modelación numérica de inundaciones compuestas en el malecón tradicional de La Habana

Daniela Córdova de Horta

E-MAIL: danielitach096@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría"

Luis Fermín Córdova López

E-MAIL: cordovalopez1962@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría"

RESUMEN

Las inundaciones compuestas en zonas costeras urbanas han aumentado debido al cambio climático y a la combinación de eventos extremos como lluvias intensas y sobreelvaciones del mar. Este estudio presenta la modelación numérica de inundaciones compuestas en el malecón tradicional de La Habana utilizando los modelos Iber v3.2, SWMM v5.1 e Iber-SWMM. Se evaluaron tres escenarios: inundación pluvial, costera y compuesta, identificando su impacto en la red de drenaje urbano. Los resultados indican que las inundaciones compuestas no son una suma lineal de los efectos individuales, sino que intensifican los niveles de agua y el colapso del drenaje. La modelación numérica permite identificar zonas críticas y optimizar estrategias de mitigación ante eventos extremos en ciudades costeras.

PALABRAS CLAVES:

Drenaje urbano, Iber-SWMM, inundaciones compuestas, modelación numérica.

Numerical modeling of compound flooding in the traditional Malecón of Havana

ABSTRACT

Compound flooding in urban coastal areas has increased due to climate change and the combination of extreme events such as heavy rainfall and sea level surges. This study presents the numerical modeling of compound flooding in the traditional Malecón of Havana using the Iber v3.2, SWMM v5.1, and Iber-SWMM models. Three scenarios were evaluated: pluvial, coastal, and compound flooding, identifying their impact on the urban drainage network. The results indicate that compound flooding is not a linear sum of individual effects but intensifies water levels and drainage system collapse. Numerical modeling enables the identification of critical areas and optimization of mitigation strategies against extreme events in coastal cities.

KEYWORDS: Compound flooding, Iber-SWMM, numerical modeling, urban drainage.

01 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en zonas costeras urbanas representan un desafío creciente debido a la combinación de factores hidrometeorológicos extremos y la vulnerabilidad de la infraestructura. El concepto de inundaciones compuestas surge de la interacción entre precipitaciones intensas y la sobreelevación del nivel del mar, lo que genera efectos no lineales que intensifican la magnitud del evento y afectan los sistemas de drenaje pluvial.

A nivel internacional, diversos estudios han abordado las inundaciones compuestas en ciudades costeras.(Wahl, Jain, Bender, Meyers, & Luther, 2015) identificaron la ocurrencia conjunta de marejadas ciclónicas y precipitaciones extremas como un factor crítico en la planificación urbana.(Moghimi, Myers, Pe'eri, Zhang, & Yi, 2021) destacaron la importancia de la modelación numérica para evaluar la interacción de estos eventos y su impacto en la infraestructura de drenaje. En el contexto latinoamericano, investigaciones han demostrado que las ciudades con drenaje pluvial insuficiente presentan una mayor susceptibilidad a eventos extremos, especialmente en áreas de alta densidad poblacional.

El malecón tradicional de La Habana es una zona altamente vulnerable a las inundaciones compuestas. La combinación de intensas lluvias y marejadas ciclónicas ha generado recurrentes eventos de anegamiento, afectando la movilidad urbana y la seguridad de la población. La necesidad de mejorar la capacidad de predicción y gestión del riesgo en esta zona motiva la presente investigación, que busca evaluar el comportamiento de estos fenómenos mediante modelación numérica.

El objetivo principal del estudio es simular y analizar la dinámica de las inundaciones compuestas en el malecón de La Habana utilizando los modelos Iber v3.2, SWMM v5.1 e Iber-SWMM. Se comparan distintos escenarios de inundación con el fin de identificar zonas críticas y evaluar el impacto de la red de drenaje urbano bajo condiciones extremas.

02 METODOLOGÍA

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al Malecón Tradicional de La Habana, ubicado en la zona costera norte de la ciudad de La Habana, Cuba. Este sector es una de las áreas urbanas más expuestas a eventos de inundación, debido a su proximidad al mar y a la topografía relativamente plana del territorio (Figura 1).



Figura 1. Límites de la zona de estudio

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS

La Habana es la capital de Cuba y la ciudad más poblada del país, con una población de más de dos millones de habitantes. Se encuentra en la región occidental de la isla, entre los paralelos 22°58' y 23°10' de latitud norte y los meridianos 82°30' y 82°06' de longitud oeste. Sus costas están limitadas por el Estrecho de la Florida, lo que la hace vulnerable a los efectos de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, frentes fríos y tormentas tropicales.

El Malecón Tradicional de La Habana abarca aproximadamente 2,7 km² y se encuentra en el municipio de Centro Habana. Limita al norte con el litoral habanero, al este con el municipio Habana Vieja, al sur con el municipio Cerro, y al oeste con Plaza de la Revolución. La topografía del área es predominantemente llana, con elevaciones menores a los tres metros sobre el nivel del mar en algunos sectores próximos al malecón (Fallas, 2007).

VULNERABILIDAD A INUNDACIONES

El área de estudio se caracteriza por una alta frecuencia de inundaciones costeras y pluviales. Durante eventos de marejadas ciclónicas, el nivel del mar supera la altura del muro del malecón, provocando penetraciones del mar que afectan la movilidad urbana y la infraestructura. Simultáneamente, el sistema de drenaje pluvial trabaja a presión, lo que ocasiona el colapso de la red de alcantarillado en varios puntos críticos (Gutierrez, 2012).

Históricamente, se han registrado múltiples eventos de inundaciones extremas en el Malecón de La Habana, siendo el huracán Wilma en octubre de 2005 uno de los más severos. Este fenómeno generó una marejada ciclónica con olas de hasta 6 metros de altura, provocando la penetración del mar en un tramo de aproximadamente 400 metros tierra adentro (Figura 2) (González-Vázquez, 2008). Estos eventos ponen en evidencia la necesidad de desarrollar metodologías de modelación numérica para evaluar y mitigar el impacto de futuras inundaciones.



Figura 2. Estragos ocasionados por el huracán Wilma en la zona del Malecón de La Habana

INFRAESTRUCTURA DE DRENAJE PLUVIAL

La red de drenaje pluvial del Malecón Tradicional de La Habana es de tipo drenaje dual, compuesta por un sistema superficial de escorrentía y un sistema soterrado de alcantarillado. Sin embargo, debido a la antigüedad de la infraestructura y la acumulación de sedimentos, la eficiencia del drenaje se ve reducida, especialmente cuando la sobre elevación del mar impide la descarga natural del agua de lluvia.

El estudio del drenaje pluvial en este sector es fundamental para comprender el comportamiento de las inundaciones compuestas, ya que la interacción entre las lluvias intensas y la marejada ciclónica puede generar colapsos hidráulicos en la red. En este sentido, la modelación numérica mediante Iber-SWMM permitirá analizar en detalle cómo estos factores afectan la capacidad de drenaje y qué medidas pueden implementarse para optimizar su funcionamiento.

03 MODELOS NUMÉRICOS UTILIZADOS

Para la modelación de las inundaciones compuestas en el Malecón Tradicional de La Habana, se emplearon modelos numéricos ampliamente utilizados en estudios de hidrodinámica e hidrología urbana. Se seleccionaron tres modelos principales: Iber v3.2, SWMM v5.1 e Iber-SWMM, los cuales fueron utilizados en conjunto para evaluar la interacción entre la escorrentía superficial y el drenaje pluvial.

MODELO IBER V3.2

Iber v3.2 es un modelo bidimensional (2D) de flujo en lámina libre, utilizado para la simulación de flujos turbulentos en régimen no permanente. Está basado en las ecuaciones de aguas someras (Saint-Venant 2D), permitiendo la representación detallada del comportamiento de las inundaciones pluviales y costeras (Bladé Castellet, Cea, & Corestein, 2014).

Para este estudio, Iber v3.2 se utilizó para modelar:

- La evolución de los calados durante los eventos de inundación.
- La propagación del agua en la zona urbana del malecón.
- La identificación de zonas de mayor riesgo de anegamiento.

MODELO SWMM V5.1

El Storm Water Management Model (SWMM v5.1) es un modelo desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) para la simulación de redes de drenaje urbano. Su aplicación

en este estudio permite analizar el comportamiento de la red de drenaje pluvial en respuesta a eventos de precipitación extrema y evaluar su capacidad para gestionar la escorrentía superficial(Rossman, 2005).

Las principales características de SWMM v5.1 incluyen:

- Modelación detallada de la red de alcantarillado y su capacidad de drenaje.
- Evaluación del flujo en el sistema de drenaje dual, considerando interacciones entre la escorrentía superficial y el alcantarillado.
- Simulación de diferentes escenarios de precipitación y su efecto en el sistema de drenaje urbano.

MODELO ACOPLADO IBER-SWMM

Dado que las inundaciones compuestas implican la interacción entre la escorrentía superficial y la red de drenaje, se utilizó una versión acoplada de Iber y SWMM. Este acoplamiento permite una representación más precisa de los procesos hidrodinámicos y su influencia en el sistema de drenaje urbano(Bladé Castellet et al., 2014).

El acoplamiento de Iber-SWMM se basa en la transferencia bidireccional de información entre los dos modelos:

- Iber proporciona datos sobre el nivel de agua en la superficie, lo que permite evaluar el impacto de la inundación en zonas urbanas.
- SWMM modela el flujo en la red de alcantarillado y su capacidad de captación, determinando si el sistema es capaz de evacuar el agua de lluvia o si ocurre un retorno de flujo debido a la sobreelevación del mar.

04 DISEÑO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Para evaluar el impacto de las inundaciones en el Malecón Tradicional de La Habana, se definieron tres escenarios principales de simulación, considerando distintos mecanismos de generación del evento y su interacción con el sistema de drenaje urbano.

Los tres escenarios fueron diseñados con base en datos históricos y modelaciones previas de eventos extremos en la zona de estudio. Se establecieron valores de precipitación y niveles de sobreelevación del mar, correspondientes a distintos períodos de retorno, asegurando una representación realista de las condiciones hidrometeorológicas adversas.

ESCENARIO 1: INUNDACIÓN PLUVIAL

Este escenario modela el efecto de una lluvia extrema sin considerar la influencia del mar. Se analizó la capacidad de la red de drenaje pluvial para gestionar el escurrimiento superficial.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN:

- Evento de precipitación con un período de retorno de 100 años.
- Consideración exclusiva del escurrimiento superficial.

- Simulación con una duración de 5 horas.

OBJETIVO DEL ESCENARIO:

- Determinar los niveles máximos de inundación en distintos puntos de observación.
- Generar un mapa de máxima peligrosidad en la zona de estudio.

ESCENARIO 2: INUNDACIÓN COSTERA

Este escenario modela el impacto de la marejada ciclónica generada por el huracán Wilma en 2005, sin considerar precipitación extrema. Se evalúa el efecto de la sobreelevación del mar en la infraestructura urbana y el sistema de drenaje.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN:

- Definición del sobrepaso del oleaje en la zona de estudio.
- Simulación con una duración de 5 horas.

OBJETIVO DEL ESCENARIO:

- Obtener el mapa de máxima peligrosidad asociado al impacto de la marejada ciclónica.
- Definir los niveles de inundación en distintos puntos de observación.

ESCENARIO 3: INUNDACIÓN COMPUESTA

Este escenario combina la precipitación extrema con el efecto de la marejada ciclónica, simulando una situación crítica en la que ambos fenómenos ocurren simultáneamente.

CONDICIONES DE SIMULACIÓN:

- Combinación de los escenarios anteriores (pluvial y costero).
- Evaluación del efecto de la interacción entre ambos eventos.
- Simulación con una duración de 5 horas.

OBJETIVO DEL ESCENARIO:

- Evaluar la interacción de la precipitación y la marejada ciclónica en el sistema de drenaje.
- Identificar zonas críticas con mayores niveles de inundación.

05 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la modelación numérica permitieron evaluar la magnitud y el comportamiento de las inundaciones en el Malecón Tradicional de La Habana, comparando los tres escenarios simulados. En el caso de la inundación pluvial, se observó que la acumulación de agua en ciertas zonas superó los 1.90 m, lo que evidencia la insuficiencia del drenaje pluvial para manejar eventos de alta intensidad. En particular, la Figura 3 muestra el mapa de inundación generado con el hidrograma original, destacando la extensión de las áreas afectadas.



Figura 3. Mapa de inundación para el Hidrograma original

Posteriormente, se realizó un ajuste en la simulación reduciendo el hidrograma en un 50%, lo que permitió modelar con mayor precisión el alcance de la inundación, como se observa en la Figura 4. Sin embargo, incluso con este ajuste, en los puntos de observación 2 (Calle Marina y Jovellar), 11 (Paseo del Prado y Genios) y 10 (Calle Blanco y Trocadero), los niveles de calado alcanzaron 1.94 m, 1.64 m y 1.36 m, respectivamente. La Figura 5 muestra el mapa con la ubicación de estos puntos de observación dentro del Malecón Tradicional de La Habana. Estos resultados sugieren que, bajo condiciones extremas, el sistema de drenaje no tiene la capacidad de evacuar completamente el agua de lluvia, provocando acumulaciones significativas en zonas bajas.

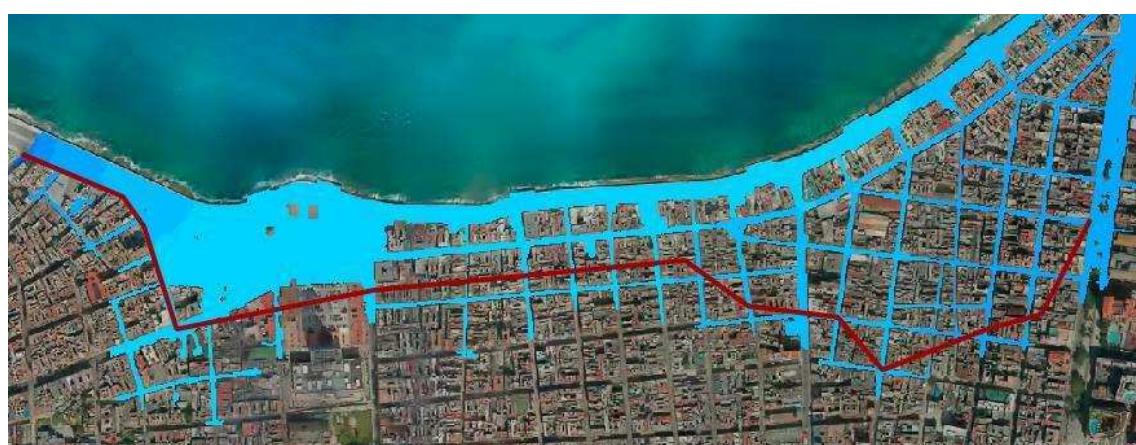


Figura 4. Mapa de inundación para el Hidrograma reducido un 50%.

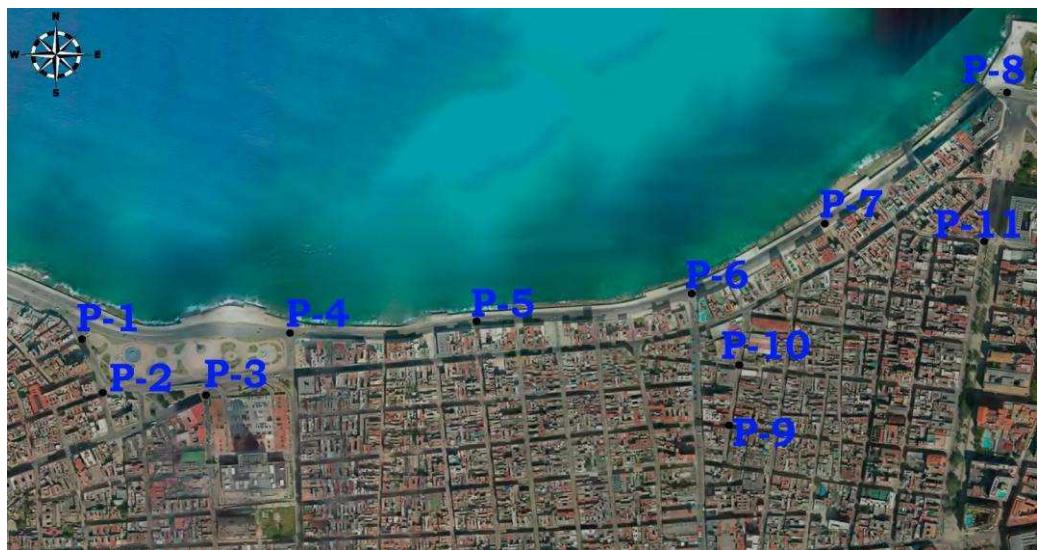


Figura 5. Puntos de observación.

Cuando se analizó la inundación costera, los resultados indicaron que la penetración del agua de mar tiene un impacto significativo en la infraestructura urbana y en el sistema de drenaje. La Figura 6 presenta el mapa de inundación generado por el huracán Wilma en el municipio de Centro Habana, mostrando que la marejada ciclónica provocó un incremento de los niveles de agua en las zonas más expuestas. En los puntos de observación 2 (Calle Marina y Jovellar), 11 (Paseo del Prado y Genios) y 10 (Calle Blanco y Trocadero), los niveles de calado aumentaron respecto al escenario pluvial, alcanzando 2.05 m, 1.92 m y 1.76 m, como se detalla en la Figura 7. Esto demuestra que la entrada del agua de mar no solo afecta la movilidad urbana, sino que también compromete la funcionalidad del sistema de drenaje pluvial, generando un agravamiento de la inundación en comparación con el escenario de lluvia extrema.



Figura 6. Mapa de inundación Municipio Centro Habana huracán Wilma.

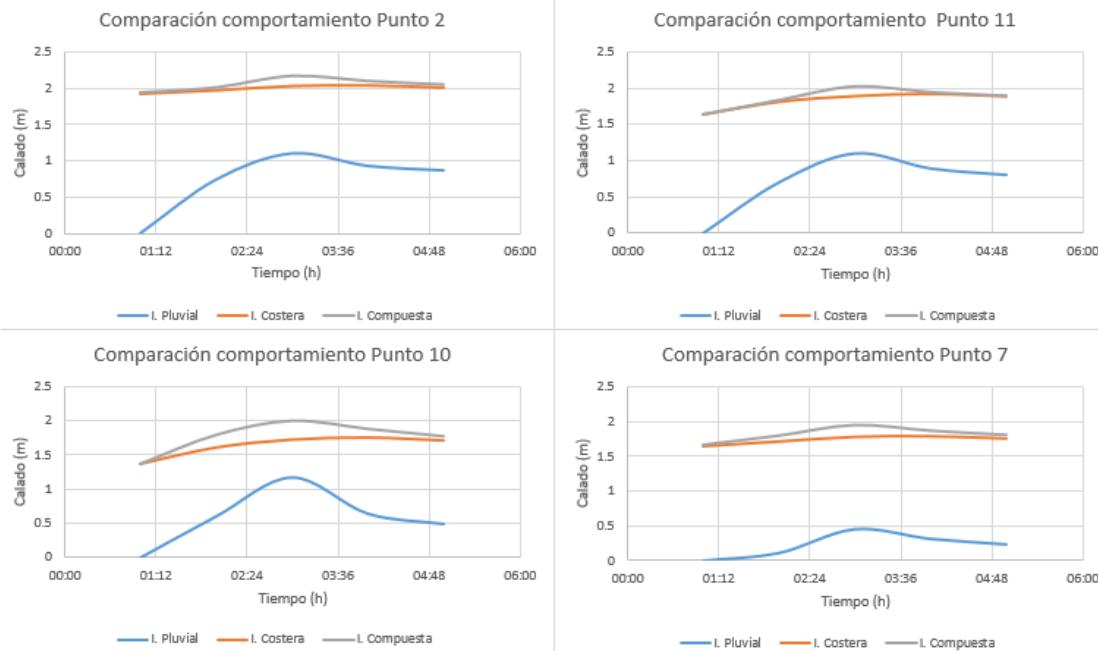


Figura 7. Gráficos de la comparación del calado en los puntos 2; 11; 10 y 7.

El tercer escenario, correspondiente a la inundación compuesta, mostró que la combinación de lluvias intensas con la marejada ciclónica genera efectos amplificados que no pueden explicarse simplemente como la suma de los dos fenómenos. En la Tabla 1 se observa que los niveles de calado en este escenario fueron los más altos, con valores de 2.17 m en el punto 2 (Calle Marina y Jovelluar), 2.03 m en el punto 11 (Paseo del Prado y Genios) y 2.00 m en el punto 10 (Calle Blanco y Trocadero), lo que confirma la no linealidad del fenómeno. Además, el análisis de los mapas de peligro de inundación (Figura 8) reveló que dos zonas dentro del área de estudio pasaron de tener un nivel de peligro bajo a un nivel medio, lo que indica un aumento significativo del riesgo para la población y la infraestructura. La evaluación de estos resultados sugiere que la planificación del drenaje y la gestión de riesgos en el Malecón de La Habana no pueden basarse exclusivamente en la evaluación de eventos individuales, sino que deben considerar escenarios compuestos donde la interacción de distintos factores hidrometeorológicos puede intensificar las condiciones de anegamiento.

Tabla 1. Comparación de los resultados de los tres tipos de inundaciones estudiadas.

Puntos de control		Calado (m)				
		1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
I. Pluvial	2	0	0,75	1,11	0,93	0,87
	11	0	0,70	1,10	0,89	0,81
	10	0	0,60	1,17	0,64	0,49
	7	0	0,11	0,45	0,31	0,23
I. Costera	2	1,93	1,98	2,04	2,05	2,02
	11	1,64	1,81	1,89	1,92	1,88
	10	1,36	1,61	1,73	1,76	1,71
	7	1,65	1,72	1,79	1,80	1,76

Puntos de control Escenario T(s)		Calado (m)				
		1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
I.Compuesta	2	1,94	2,01	2,17	2,10	2,05
	11	1,64	1,84	2,03	1,95	1,90
	10	1,36	1,79	2,00	1,88	1,77
	7	1,67	1,80	1,95	1,87	1,81



Figura 8. Mapa de peligro de la inundación compuesta.

Uno de los aspectos más relevantes del estudio fue la evaluación del sistema de drenaje urbano en la mitigación de estos eventos. La Figura 9 muestra la evolución de los calados en los puntos de observación cuando se incorpora el drenaje dual en la simulación. En algunos sectores, como el punto 2 (Calle Marina y Jovellar), el drenaje pluvial logró reducir el nivel de agua en 0.93 m, lo que representa una disminución del 48% respecto al escenario sin drenaje. Sin embargo, en otros puntos críticos, como el punto 10 (Calle Blanco y Trocadero), la capacidad del sistema de drenaje fue insuficiente, registrando un calado final de 1.64 m a pesar de la operación del sistema pluvial. Esto sugiere que, si bien el drenaje urbano tiene un impacto positivo en la reducción del nivel de inundación, su capacidad sigue siendo limitada frente a eventos de gran magnitud, lo que resalta la necesidad de estrategias adicionales para mitigar el impacto de las inundaciones en la ciudad.

Finalmente, la identificación de zonas críticas dentro del área de estudio permitió reconocer dos sectores con alto riesgo de inundación. La primera zona comprende la intersección de Calle Marina y Jovellar (punto 2), donde se registró el mayor nivel de acumulación de agua en el escenario compuesto, con valores superiores a 1.90 m. La segunda zona abarca el tramo desde Galeano hasta el Paseo del Prado, donde la inundación se intensificó considerablemente debido a la combinación de los efectos pluviales y costeros. En la Figura 10, que presenta el mapa de peligrosidad según la norma ACA, se observa que la mayor parte del Malecón Tradicional de La Habana se encuentra dentro de una zona de alta peligrosidad, lo que confirma la vulnerabilidad de la infraestructura urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

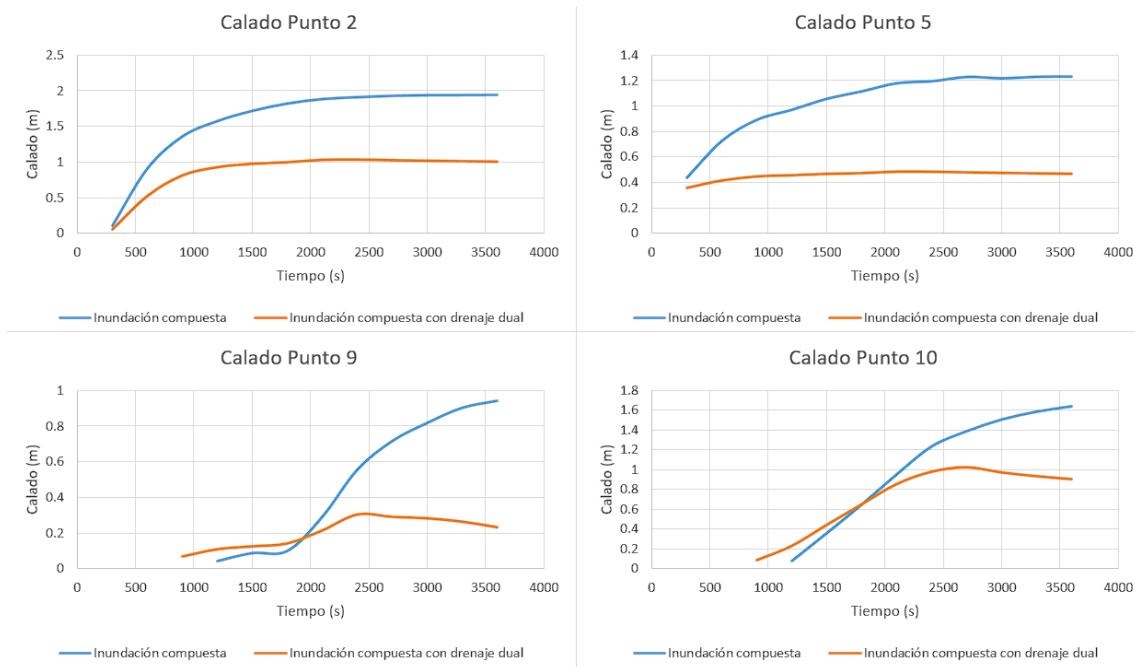


Figura 9. Comportamiento de los calados en los puntos de observación.

Peligro de la inundación	Rango de calado (m)
Bajo	< 0,5
Moderado	0,5 < X < 1
Alto	> 1

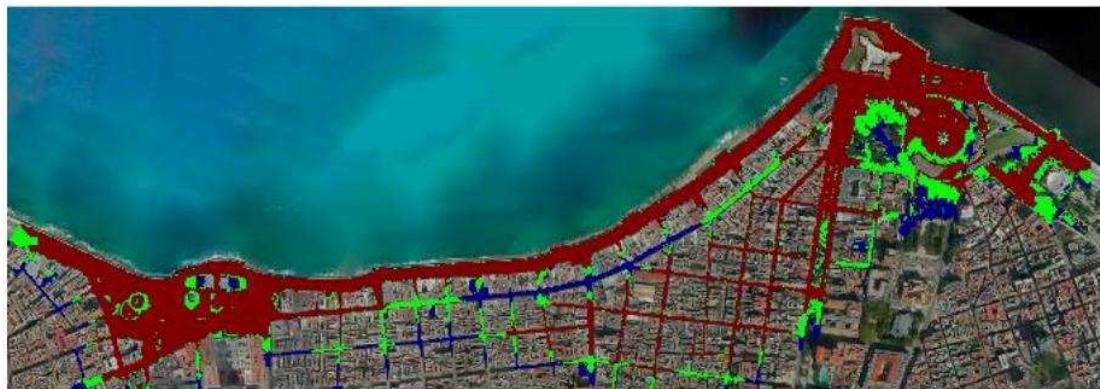


Figura 10. Mapa de peligrosidad norma ACA.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la inundación compuesta genera los mayores niveles de acumulación de agua y que el sistema de drenaje urbano, aunque funcional, no es suficiente para mitigar los efectos de estos eventos extremos. Se concluye que la planificación y gestión del riesgo en la zona deben incluir estrategias de adaptación más robustas, considerando la interacción de múltiples factores para evitar un agravamiento de las condiciones de anegamiento.

06 CONCLUSIONES

- En los últimos años han aumentado el número de eventos de inundaciones compuestas debido al cambio climático de ahí la necesidad de desarrollo de herramientas numéricas para la simulación de estos eventos meteorológicos y sus efectos.
- La urbanización trae consigo un incremento del volumen de escurrimiento, el caudal máximo y la velocidad de traslado del mismo. También disminuye el tiempo de concentración.
- Para la modelación de inundaciones compuestas se hace necesario el acoplado de uno o más modelos numéricos. Comúnmente puede ser la combinación de modelos hidrológicos, de circulación oceánica, e hidráulicos, los cuales se pueden acoplar de forma unidireccional, flexible y fijos.
- Se aplica por primera vez el modelo Iber-swmm para el estudio de inundaciones compuestas generadas por sobrepaso del oleaje, intensas lluvias y surgencia fenómenos asociados a la ocurrencia de huracanes con resultados satisfactorios.
- Los resultados obtenidos en el estudio de la inundación compuesta en el malecón Tradicional, demuestran la no linealidad que presenta este fenómeno, concluyendo que no puede asumirse como la suma de los calados generados por las inundaciones por separados.
- Se demuestra que las inundaciones compuestas incrementan los niveles de inundación, y generan el colapso de la red de drenaje pluvial por efecto combinado de las intensas lluvias, el rebase del oleaje y la marea de tormenta.
- La simulación dinámica de las inundaciones compuestas teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial (sistema menor) y la escorrentía superficial (sistema mayor), en zonas urbanas costeras es la mejor opción para el estudio de este fenómeno.
- Las zonas críticas a señalar son: zona número 1, esquina de calle Marina y Jovellar; zona número 2 que comprende desde la calle Galeano hasta la calle Paseo del Prado, teniendo como límite norte la calle San Lázaro e límite sur la calle Áimas.

07 REFERENCIAS

- Bladé Castellet, E., Cea, L., & Corestein, Y.** (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del Agua*, 18. doi:10.4995/ia.2014.3144
- Fallas, J.** (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. *Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica.*
- González-Vázquez, J.** (2008). Análisis de los efectos ocasionados por el huracán Wilma sobre la infraestructura portuaria de Cozumel y propuesta de parámetros de diseño para muelles en la zona. *Ingeniería Civil (Tesis de Licenciatura), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.*

Gutierrez, A. M. (2012). Simulación de las inundaciones costeras en la zona del Malecón tradicional. Propuesta de Solución. *Trabajo de Diploma (en opción al título de Ing. Hidráulico), Fac. de Ing. Civil, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.*

Moghimi, S., Myers, E. P., Pe'eri, S., Zhang, Y., & Yi, F. (2021). Forecasting Compound Floods in Complex Coastal Regions. *Eos.*

Rossman, L., Dickinson, R., Schade, T., Chan, C., Burgess, E. and Huber, W. . (2005). SWMM5: The USEPA's newest tool for urban drainage analysis'. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, 1-8.

Wahl, T., Jain, S., Bender, J., Meyers, S. D., & Luther, M. E. (2015). Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nature Climate Change*, 5, 1093-1097.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

[Daniela Córdova de Horta](#) <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>

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