

## Simulación del drenaje dual urbano con Iber-SWMM 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.

**Bryan Pérez León**

E-MAIL: perezleonbryan856@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

Este trabajo tiene como objetivo la simulación dinámica de las inundaciones pluviales causadas por eventos meteorológicos extremos, centrándose en el drenaje dual en zonas costeras mediante modelación numérica. Se analiza el Malecón Tradicional de La Habana a través de tres escenarios diferentes. En el primero, solo se considera el escurrimiento superficial provocado por la inundación pluvial. En el segundo, además del escurrimiento superficial, se incorpora el volumen de agua captado por los sumideros. Finalmente, en el tercer escenario se incluye también el funcionamiento de la red de drenaje pluvial. La comparación de estos escenarios permite evaluar la eficiencia del sistema de drenaje y su capacidad para mitigar inundaciones, proporcionando información clave para la planificación y gestión del drenaje urbano en entornos costeros vulnerables.

**PALABRAS CLAVES:** eventos meteorológicos extremos, drenaje dual, inundaciones pluviales, simulación dinámica.

## Simulation of urban dual drainage with Iber-SWMM on the Traditional Malecón in Havana

### ABSTRACT

This work aims to dynamically simulate pluvial flooding caused by extreme meteorological events, focusing on dual drainage in coastal areas through numerical modeling. The study analyzes the Traditional Malecón of Havana under three different scenarios. The first scenario considers only surface runoff generated by pluvial flooding. In the second, in addition to surface runoff, the volume of water captured by the inlets is included. Finally, the third scenario also incorporates the functioning of the storm drainage network. Comparing these scenarios allows for the evaluation of the drainage system's efficiency and its capacity to mitigate flooding, providing key information for the planning and management of urban drainage in vulnerable coastal environments.

**KEYWORDS:** extreme weather events, dual drainage, pluvial flooding, dynamic simulation.

## 01 INTRODUCCIÓN

Las fuertes precipitaciones han incrementado la frecuencia e intensidad de las inundaciones en los últimos años (Sánchez Román, 2012), representando un riesgo significativo en las zonas costeras de Cuba, especialmente durante la temporada de huracanes (Mitrani, 2006).

Las inundaciones pueden clasificarse según su origen: pluviales, causadas por precipitaciones intensas que generan escorrentía superficial y sobrepasan la capacidad de los canales (Mendiondo, 2023); fluviales, derivadas del desbordamiento de ríos, exacerbadas en áreas urbanas y planicies costeras (CENAPRED, 2004; Cruz, 2009); y costeras, provocadas por la elevación del nivel del mar y marejadas ciclónicas (Vellón, 2023).

En zonas costeras, las inundaciones pluviales pueden ser intensificadas por eventos como lluvias extremas, marejadas ciclónicas, huracanes, el aumento del nivel del mar y el derretimiento de glaciares (Mérida, 2023). Ejemplos recientes incluyen las inundaciones severas causadas por los huracanes Irma y María en 2017 y la tormenta tropical Laura en 2020, que afectaron gravemente varias provincias cubanas.

El cambio climático ha intensificado estas inundaciones en áreas urbanas costeras, lo que hace necesario mejorar la simulación de los sistemas de drenaje pluvial urbano, incorporando el drenaje dual. Este trabajo busca simular dinámicamente inundaciones pluviales generadas por eventos meteorológicos extremos mediante modelos matemáticos, enfatizando el drenaje dual urbano.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El municipio Centro Habana, en la provincia de La Habana, Cuba, se ubica en la zona centro-norte de la capital, limitando al norte con el litoral habanero, al este con Habana Vieja, al sur con Cerro y al oeste con Plaza de la Revolución. En su área norte, las inundaciones por penetraciones del mar ocurren eventualmente cuando el nivel del agua supera la altura del muro del Malecón, provocando que los colectores de drenaje pluvial trabajen sobrecargados y dificulten la evacuación del agua. Además, el sistema de alcantarillado colapsa, generando un funcionamiento a presión que levanta las tapas de los registros y obstaculiza los drenes secundarios (Gutiérrez, 2012). Estas inundaciones afectan principalmente el tramo comprendido entre la calle 23 y Prado, desde el Malecón hasta casi llegar a San Lázaro.

Debido a su vulnerabilidad ante eventos meteorológicos extremos y su relevancia histórica, arquitectónica y económica, la zona de estudio abarca parte de este municipio, delimitada entre las calles Hospital y Villegas, con el muro del Malecón como límite norte y la calle Enrique Barnet (Estrella) al sur, como se muestra en la figura 1.

El Modelo Digital del Terreno (MDT) se obtuvo mediante levantamiento topográfico con tecnología LIDAR, con una resolución de 0,25 m. Para su elaboración, se recopilieron datos topográficos, curvas de nivel y capas descriptivas de edificaciones y manzanas, en el sistema de proyección UTM Zona 17N. Este modelo fue perfeccionado en conjunto por el Departamento de Geociencias de la Facultad de Ingeniería Civil y el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) figura 2.

La ortofoto, con una resolución de 0,25 m, es una imagen fotográfica corregida para eliminar distorsiones planimétricas causadas por la inclinación de la cámara aérea y el desplazamiento del relieve. La ortofoto utilizada se presenta en la figura 3.



Figura 1. Límites de la zona de estudio

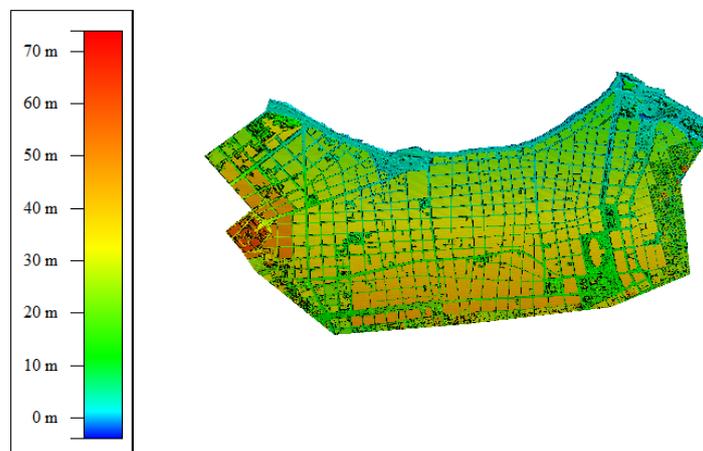


Figura 2. Vista en planta del MDT

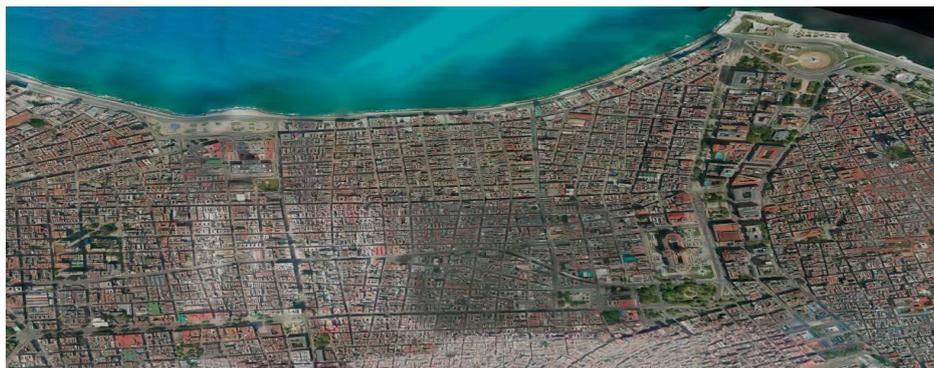


Figura 3. Ortofoto

## RED DE DRENAJE PLUVIAL.

Los datos de la red de drenaje se obtienen mediante un levantamiento topográfico realizado por la empresa GEODESA para el proyecto de INVESTIGACIÓN DE CUENCAS DE DRENAJE PLUVIAL DE LA HABANA del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), y Grupo Malecón (ESIHO).

La red, como se muestra en la Figura 4 está conformada por:

420 conductos de sección circular con diámetros desde 0,25 m hasta 1,20 m.

1334 sumideros de tipo rejilla de piso con dimensiones 1,00 m x 0,55 m.  
422 nodos o registros.

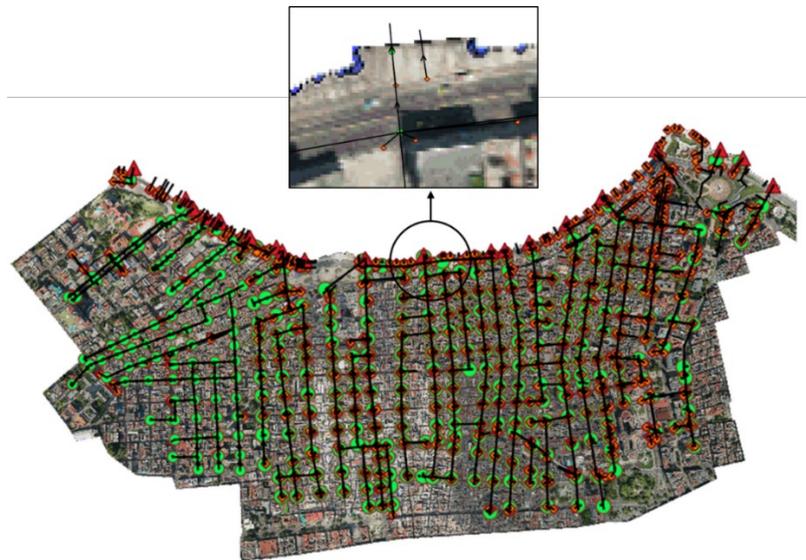


Figura 4. Red de drenaje pluvial

En la Tabla 1 se aprecia un resumen del estado técnico de la red de la zona de estudio.

Tabla 3. Resumen estado técnico de la red

Resumen del estado técnico de la red de drenaje pluvial de la zona de estudio		
	Cantidad	Observación
Conductos	420	Los conductos un 90% están buen estado
Sumideros	1334	El 58% de los sumideros están limpios, 38% tupidos y el 4% inutilizable
Nodos o Registros	422	Los nodos un 90% están buen estado

## HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN SWMMV5.1

El Storm Water Management Model (SWMM), desarrollado por la Agencia de Protección del Medioambiente de EE. UU. en 1971, es un software de cálculo de drenaje urbano ampliamente utilizado debido a su acceso gratuito. Integra un modelo hidrológico e hidráulico, permitiendo analizar la evolución de la cantidad y calidad del agua de escorrentía en la cuenca. Su modelado incluye procesos hidrológicos como precipitación variable, evaporación de agua superficial y escorrentía, además de capacidades hidráulicas para enrutar el flujo a través de redes de drenaje (tuberías, canales y colectores).

### IBER V3.3

Iber es un modelo numérico 2D de flujo turbulento en superficie libre y transporte en aguas poco profundas. Su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras en 2D, distinguiéndose de modelos más simples (Sañudo et al., 2020). Para esta investigación, se empleará su módulo de procesos hidrológicos, que permite modelar la transformación lluvia-escorrentía en cuencas de pequeño y mediano tamaño. Además, se utilizará Iber-SWMM, una integración entre Iber (flujo terrestre 2D) y SWMM (red de alcantarillado 1D).

## DETERMINACIÓN DEL HIETOGRAMA MEDIANTE EL MÉTODO DE BLOQUES ALTERNOS

El hietograma se obtuvo mediante el método de bloques alternos, basado en la curva Intensidad-Frecuencia-Duración (I-F-D) de La Habana (Tabla 2). Su determinación sigue la ecuación (1):

Tabla 4. Curva I-F-D

Tr (años)	Probabilidad (%)	A	B
5	20	6 375	40
10	10	7 569	42
25	4	8 839	45
50	2	9 881	46

Para determinarla se utiliza la siguiente ecuación (1):

$$I=A/(t+B) \quad (1)$$

Donde:

$A$ ,  $B$ : son parámetros que dependen de la probabilidad de ocurrencia de la lluvia y de las características climáticas de la zona.

$t$ : tiempo de concentración (min).

Para el estudio, se construyó un hietograma de 1 hora con incrementos de 5 minutos, utilizando la curva I-F-D para un período de retorno de 50 años y una probabilidad de 2% (Figura 5). Su construcción sigue el procedimiento de bloques alternos, ubicando la precipitación más intensa en el centro y distribuyendo los valores decrecientes en intervalos alternos a derecha e izquierda (Figura 6).

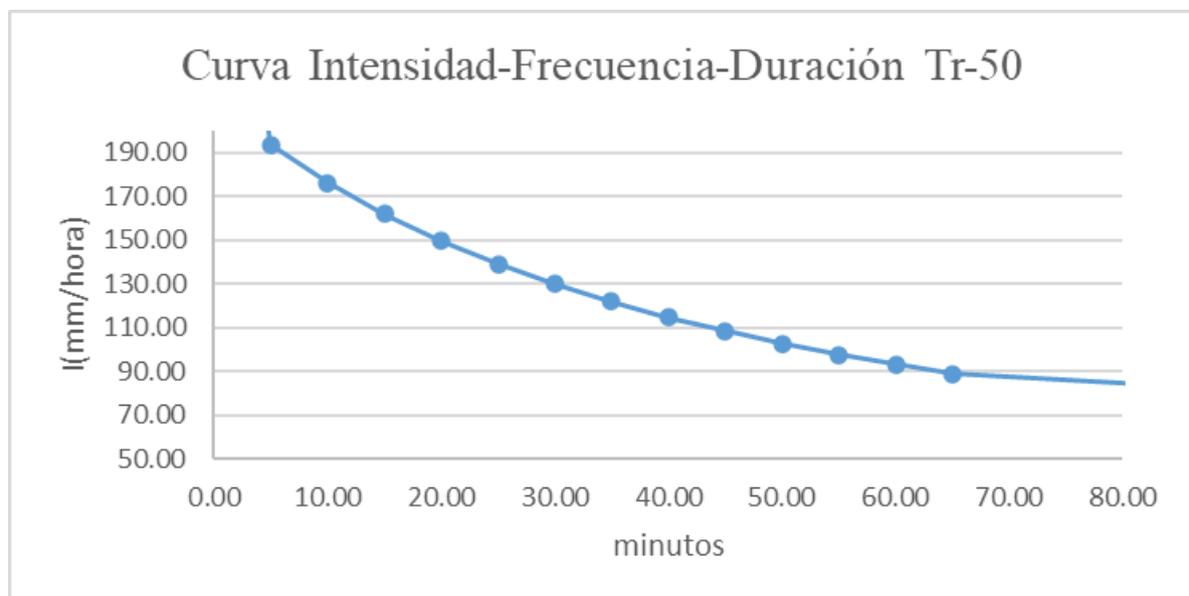


Figura 5. Curva I-F-D obtenida para 50 años de período de retorno

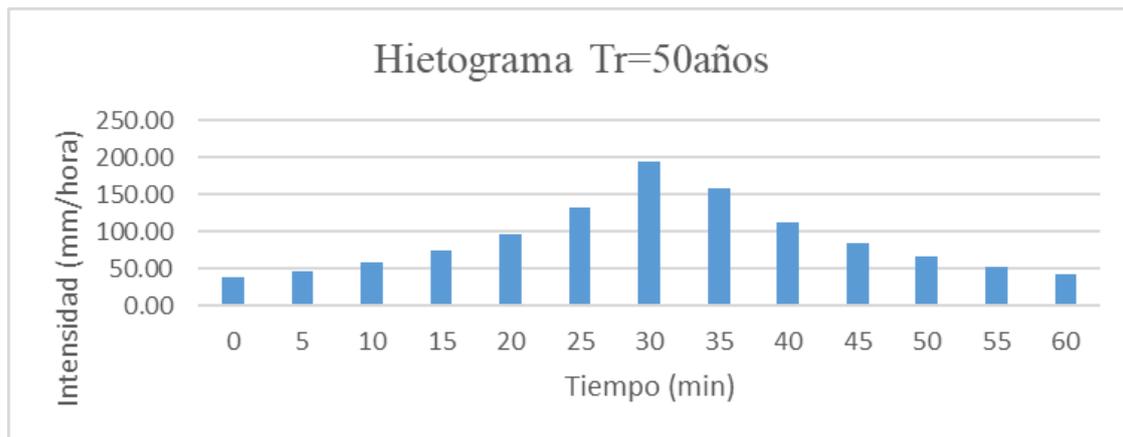


Figura 6. Hietograma para 1 hora de duración de la lluvia y período de retorno 50 años

## ESCENARIOS DE ESTUDIO.

Para evaluar el impacto de la lluvia en la zona de estudio, se han planteado tres escenarios diferentes. En el primero, se considera únicamente el escurrimiento superficial, lo que permite identificar los niveles de inundación sin la intervención de ningún sistema de drenaje. Luego, en el segundo escenario, además del escurrimiento superficial, se tiene en cuenta el agua captada por los sumideros, lo que permite comparar los niveles de inundación y analizar la eficiencia del drenaje mayor. Finalmente, el tercer escenario incorpora un enfoque de drenaje dual, incluyendo el escurrimiento superficial, la captación por sumideros y el funcionamiento de la red de drenaje pluvial. Este último permite evaluar el desempeño del sistema en condiciones más realistas y compararlo con los otros casos.

## 02 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En este apartado se realiza el análisis y discusión de los resultados de los escenarios descritos anteriormente, así como la comparación entre los mismos.

Los escenarios se simulan para un tiempo de dos horas (2 h), con un hietograma de lluvia de una hora (1 h) de duración y un período de retorno de 50 años. El análisis de los resultados se basa en los mapas de máximos niveles de inundación y las curvas de calado en los puntos de observación o control (Tabla 4), colocados estratégicamente en zonas de alto riesgo de inundaciones basados en datos históricos.

Tabla 5. Ubicación de los puntos de observación

Punto de observación	
1	calle Marina y Vapor
2	calle Marina y Jovellar
3	calle San Lázaro y Márques Gonzáles
4	Ave. Malecón y calle Belascoaín
5	calle Paseo del Prado y Ave. Malecón
6	calle Ánimas y Blanco
7	calle Blanco y Trocadero
8	calle Paseo del Prado y Genios

## ESCENARIO N.º1.

En la Figura 7 se muestra el mapa de máxima inundación obtenido para este escenario, la misma nos permite ver el calado en metros (m) en toda la zona del Malecón Tradicional de La Habana.

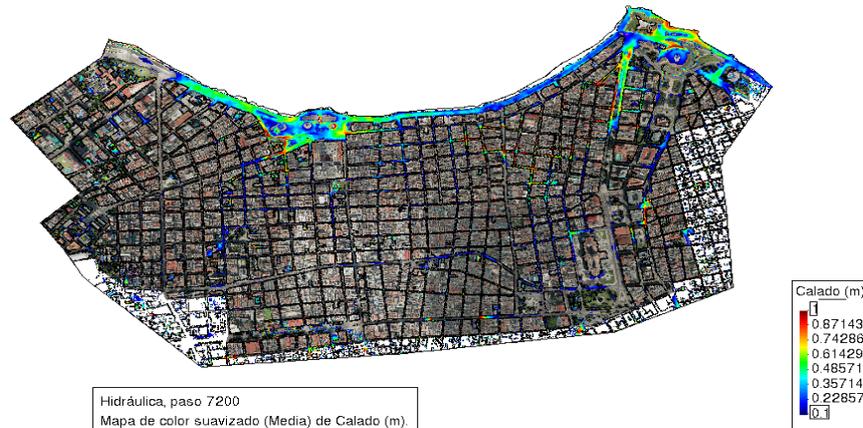


Figura 7. Mapa de máxima inundación (Escenario N.º1)

A continuación, se presentan las zonas críticas de peligro de inundación pluvial obtenidas del mapa de máximo calado y teniendo en cuenta el análisis de los puntos de observación presentado en el acápite anterior. La zona número uno de alto riesgo (A), figura 8, está ubicada en la intercepción de las calles Marina y Vapor, dicha zona corresponde al punto de observación número uno, en dicha figura también se aprecia una zona de moderado riesgo (B). La zona número dos, figura 9, abarca desde la calle Galiano hasta la calle Paseo del Prado, teniendo como límite norte la calle San Lázaro y al sur la calle Ánimas.



Figura 8. Zona 1: Inundación (A), calle Marina y Jovellar; Inundación (B), Avenida malecón y calle San Lázaro / Belascoáin y Gervasio

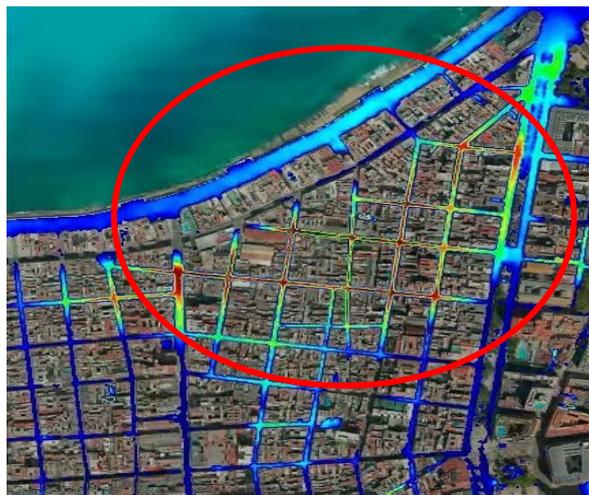


Figura 9. Zona 2: calle Galiano hasta Paseo del Prado

En la figura 10 se ve el comportamiento de los niveles de agua en los puntos de control, de la misma podemos señalar que.

- Los máximos ocurren alrededor de los 3900 segundos.
- En el punto 7 (calle Blanco y Trocadero) es donde ocurre el máximo calado, 1,65 m.
- El punto 2 (calle Marina y Jovellar), es el segundo con mayor calado, siendo 1,52 m, y el tercer punto con mayor calado es el punto 6 (calle Ánimas y Blanco), con 1,33 m.
- Los puntos con menor calado son el 3 (calle San Lázaro y Márques Gonzáles); 4 (Ave. Malecón y calle Belascoaín) y 5 (Ave. Malecón y calle Belascoaín) con 0,69 m; 0,37 m y 0,17 m respectivamente.

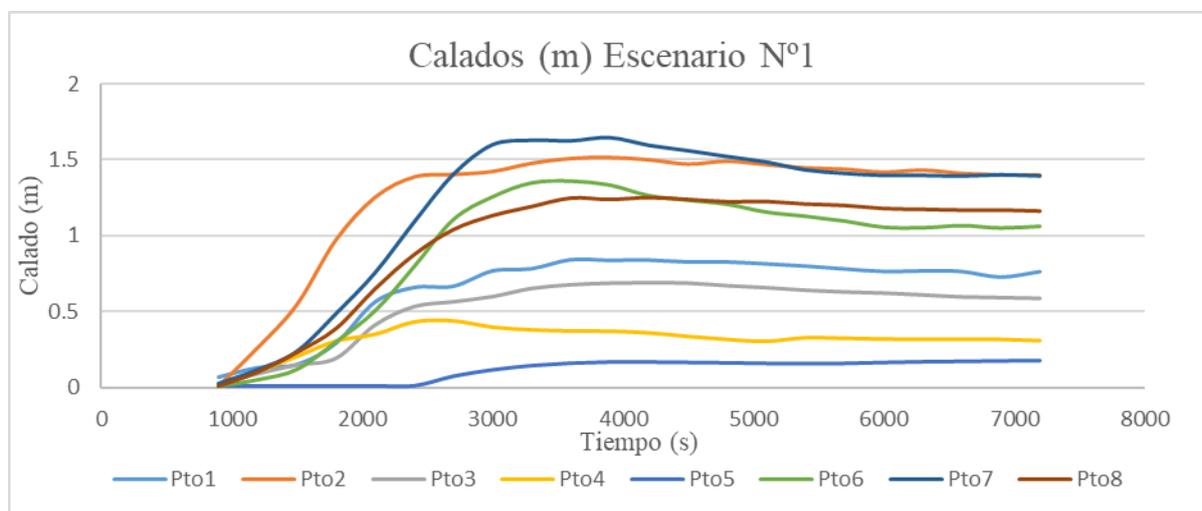


Figura 10. Calados en los puntos de observación (EscenarioN°1)

## ESCENARIO N°2.

En la figura 11 se muestra el mapa de máxima inundación simulada, esta nos permite observar el calado (m) en toda la zona del Malecón tradicional de La Habana. Las zonas A, B y C son zonas de altos calados (Figura 12) aumentando así los niveles de inundación.



Figura 11. Mapa de máxima inundación (Escenario N°2)



Figura 12. Zona A: calle Marina y Jovellar; zona B: calle Blanco y Trocadero; zona C: calle Paseo del Prado y Genios

En la figura 13 se muestra el comportamiento de los niveles de agua en los puntos de control, de la misma podemos destacar que.

- Los máximos ocurren al cabo de los 2400 segundos.
- En el punto 8 (calle Paseo del Prado y Genios) es donde ocurre el máximo calado, 0,44 m
- El punto 7 (calle Blanco y Trocadero), es el segundo con mayor calado, siendo 0,38 m, y el tercer punto con mayor calado es el punto 2 (calle Marina y Jovellar), con 0,29 m.
- Los puntos con menor calado son el 1(calle Marina y Vapor); 4 (Ave. Malecón y calle Belascoaín) y 5 (calle Paseo del Prado y Ave. Malecón) con 0,108 m; 0,105 m y 0,02 m respectivamente.

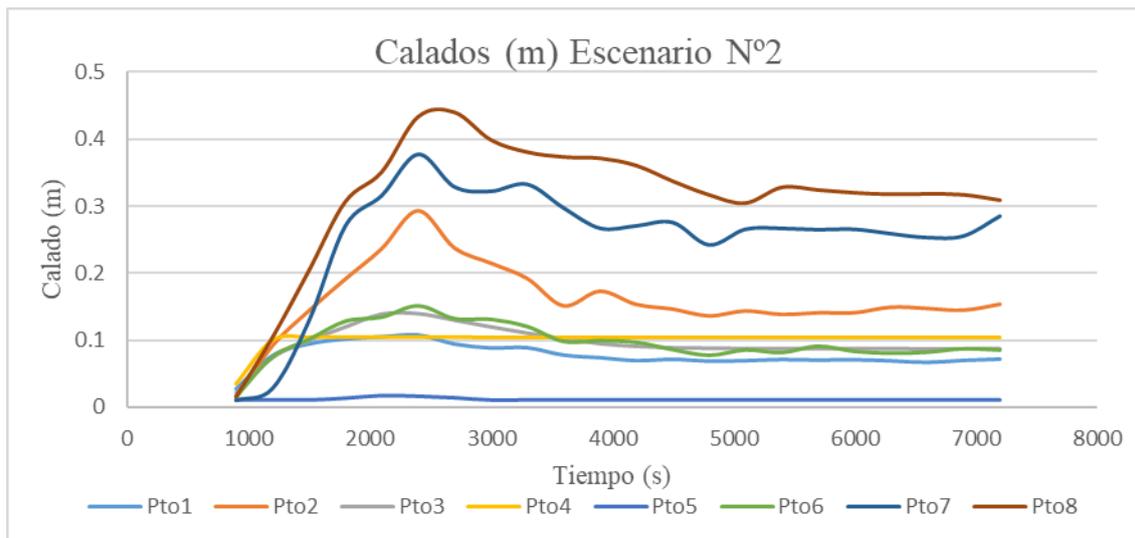


Figura 13. Calado en los puntos de observación (EscenarioN°2)

### ESCENARIO N°3.

El mapa de máxima inundación se muestra en la figura 14, esta nos permite visualizar el calado (m) en toda la zona del Malecón tradicional de La Habana. Las zonas A, B y C son zonas de altos calados (figura 15) aumentando así los niveles de inundación.



Figura 14. Mapa de máxima inundación para el escenario N°3

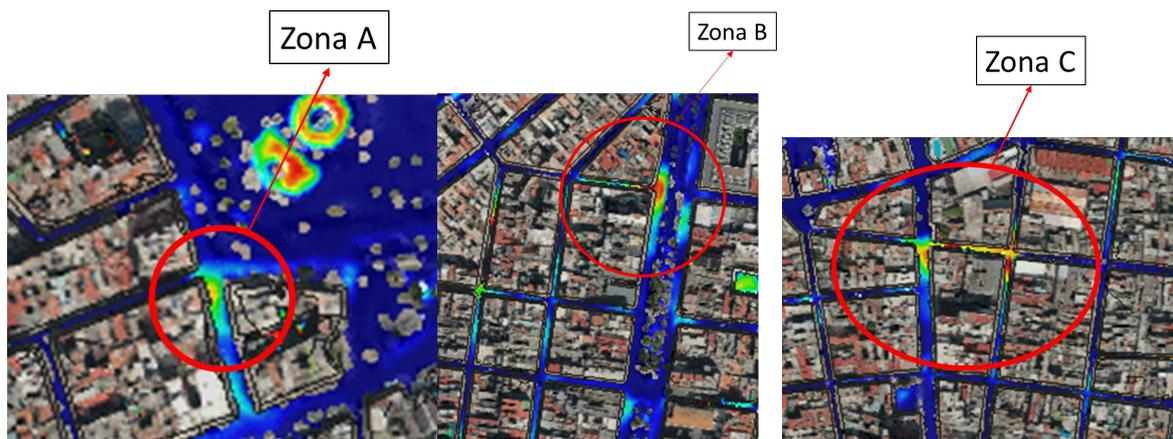


Figura 15. Zona A: calle Marina y Jovellar; zona B: calle Paseo del Prado y Genios; zona C: calle Blanco y Trocadero

En la Figura 16 se presenta el comportamiento de los niveles de agua en los puntos de control, de esta podemos decir que.

- Los máximos ocurren al cabo de los 2700 segundos.
- En el punto 8 (calle Paseo del Prado y Genios) es donde ocurre el máximo calado, 0,76 m
- El punto 2 (calle Marina y Jovellar), es el segundo con mayor calado, siendo 0,34 m, y el tercer punto con mayor calado es el punto 7 (calle Blanco y Trocadero), con 0,30 m.
- Los puntos con menor calado son el 3 (calle San Lázaro y Márques Gonzáles); 4 (Ave. Malecón y calle Belascoaín) y 5 (calle Paseo del Prado y Ave. Malecón) con 0,08 m; 0,004 m y 0,008 m respectivamente.

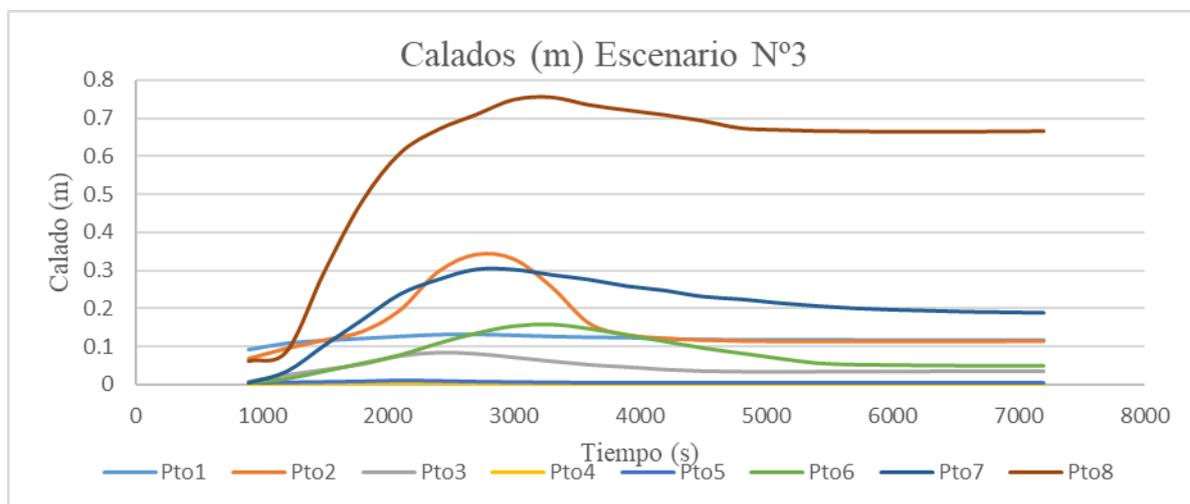


Figura 16. Calados en los puntos de observación (EscenarioN°3)

## COMPARACIÓN ENTRE LOS ESCENARIOS.

Con el objetivo de estudiar, el drenaje mayor (Escorrentía superficial), el drenaje mayor junto con las obras de captación (sumideros) y el drenaje dual, se comparan los escenarios estudiados, para esto se seleccionaron los puntos 2 (calle Marina y Jovellar) y 8 (calle Paseo del Prado y Genios). En las figura 17 y figura 18 se muestran las comparaciones entre los calados para cada escenario donde se refleja que los calados registrados difieren notoriamente para cada escenario, siendo mayores los

volúmenes de agua acumulados en el escenario 1 con respecto a los escenarios 2 y 3, en los cuales se tiene en cuenta obras de captación y elementos de la red.

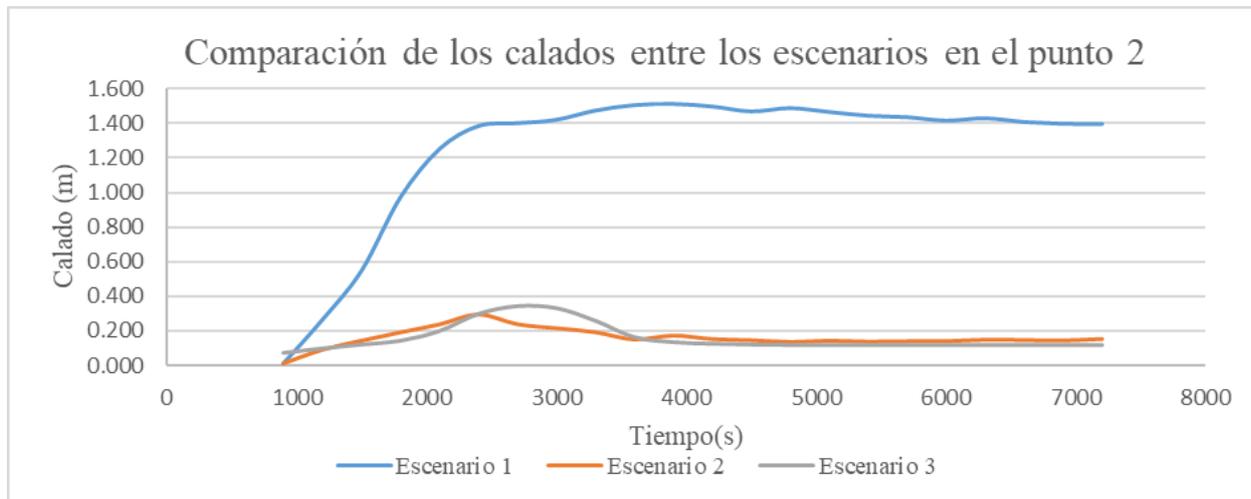


Figura 17. Comparación de calados entre los escenarios en el punto 2

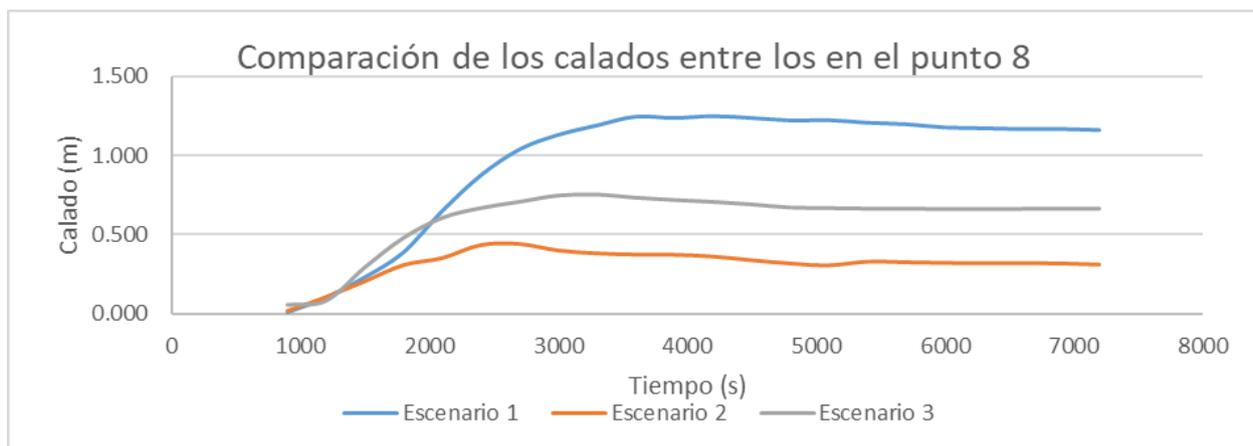


Figura 18. Comparación de calados entre los escenarios en el punto 8

Con los resultados obtenidos anteriormente se demostró que los niveles de calado en los puntos 2 (calle Marina y Jovellar) y 8 (calle Paseo del Prado y Genios) del escenario 2 difieren con los del escenario 3, siendo mayores los del escenario 3. A continuación, se realiza un análisis de los resultados obtenidos de cada simulación, comparando los calados de inundación de los puntos mencionados anteriormente.

Para el punto 2 las curvas de calado en los escenarios 2 y 3 mantienen un comportamiento similar (Figura 19), con la diferencia que en el escenario 3 el nodo RC\_13-45 (nodo correspondiente al punto 2) a partir de aproximadamente los 35 minutos comienza a incorporar agua a la escorrentía superficial, como se observa en la figura 20.

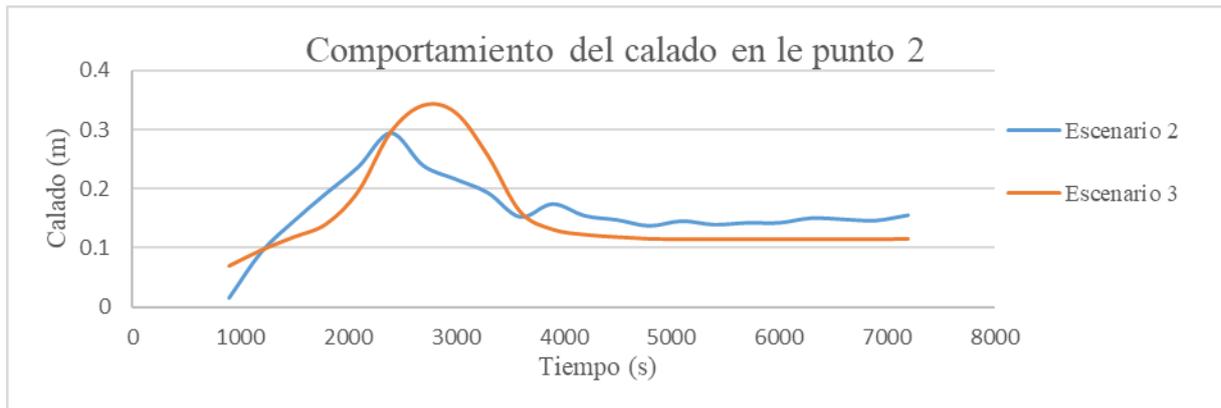


Figura 19. Comportamiento de los calados durante la simulación en el punto 2

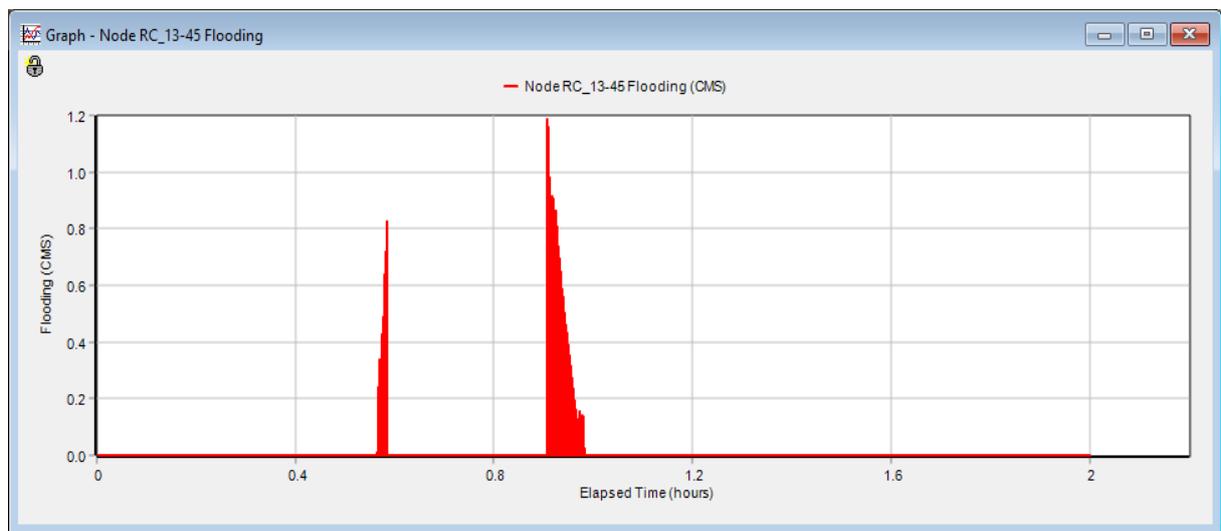


Figura 20. Inundación en el nodo RC\_13-45

Para el punto 8 las curvas de calado en los escenarios 2 y 3 difieren notablemente (Figura 21) puesto que en el escenario 3 el nodo RE\_18-3 (nodo correspondiente al punto 8) a partir de aproximadamente los 31 minutos comienza a incorporar gran cantidad de agua (aproximadamente  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a la escorrentía superficial por lo que se provoca una inundación en este nodo, como se puede ilustrar en las figura 22 y figura 23.

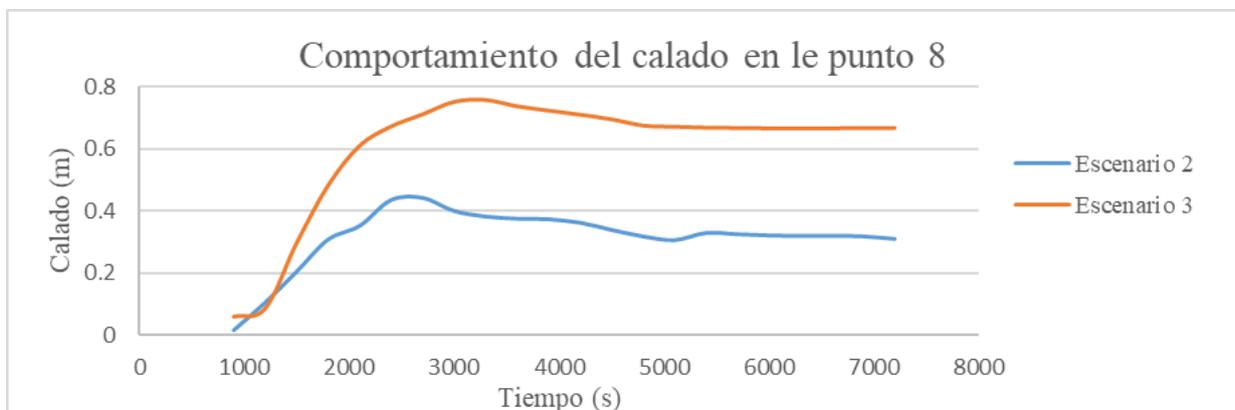


Figura 21. Comportamiento de los calados durante la simulación en el punto 8

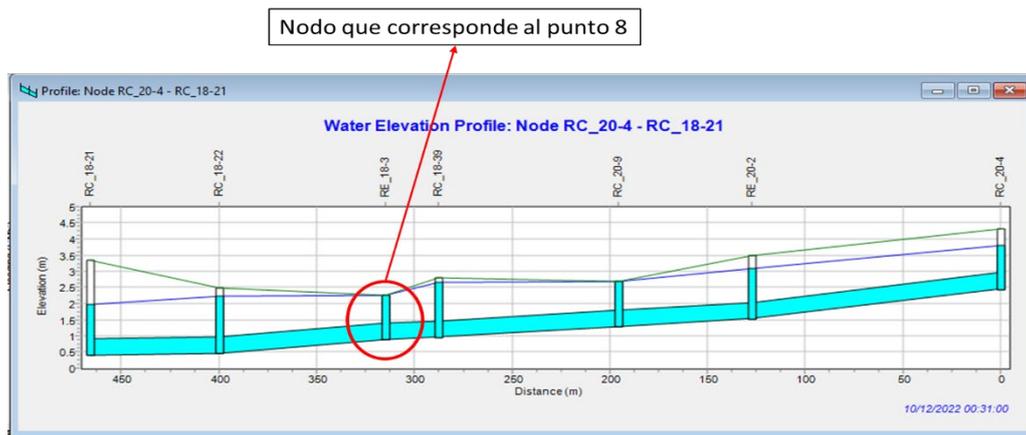


Figura 22. Perfil longitudinal de calle Paseo del Prado

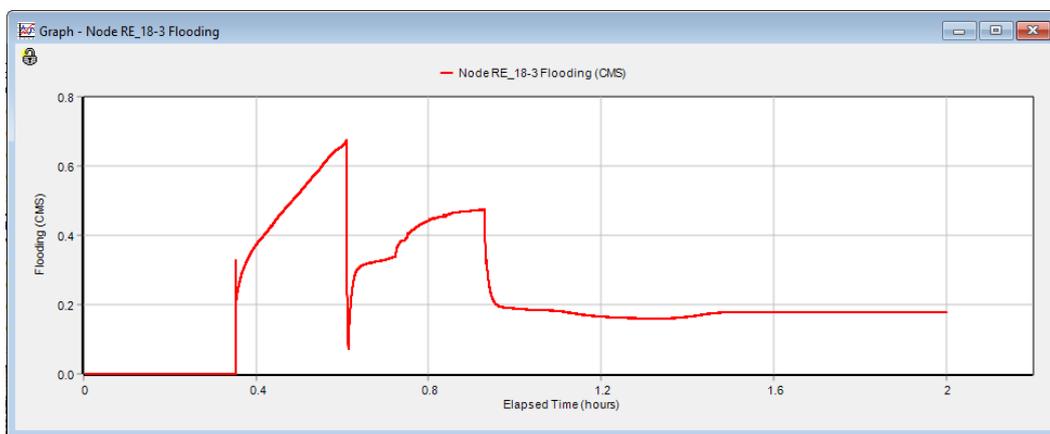


Figura 23. Gráfica de inundación del nodo RE\_18-3

### 03 CONCLUSIONES

En los últimos años han aumentado el número de inundaciones pluviales debido al efecto de cambio climático, de ahí la necesidad de aplicar herramientas matemáticas capaz de simular todos los fenómenos que se presentan en las zonas urbanas.

Se aplica el modelo Iber v3.3 para el estudio de inundaciones provocadas por intensas lluvias, aplicando los modelos acoplados Iber-SWMM.

La simulación dinámica de las inundaciones pluviales 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.

En la zona del Malecón Tradicional las áreas más críticas a señalar son: zona número 1, esquina de calle Marina y Jovellar; zona número 2 que comprende desde la calle Galiano hasta la calle Paseo del Prado, teniendo como límite norte la calle San Lázaro y límite sur la calle Ánimas.

### 06 REFERENCIAS

- CENAPRED.** (2004). Fascículo de inundaciones. Distrito Federal México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Mexico.
- Cruz B.** (2009). Formulación del riesgo conjunto, inundación-sequia, bajo un esquema probabilístico, aplicado en la región hidrológica Nazas-Aguanaval (RH-36) [Tesis de maestría en ingeniería hidráulica.]. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Gutiérrez 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 Ingeniero)]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Mendiondo Afá I.** (2023). Simulación de inundaciones compuestas en zonas urbanas costeras, huracán Irma 2017. Malecón Tradicional de La Habana. [Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero)]. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.
- Mérida Rodríguez N. M.** (2023). Simulación del Drenaje Dual Urbano aplicando el modelo IBER-SWMM. Caso de estudio Malecón Tradicional de La Habana. [Trabajo de Diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Mitrani Arenal I.** (2006). Las inundaciones costeras en cuba y su repercusión social. Bioética. <http://cbioetica.org/revista/63/630410.pdf>
- Sánchez Román L. A.** (2012). Inundaciones pluviales en una cuenca urbana.
- Sañudo E., Cea L. and Puertas J.** (2020). Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2647>
- Vellón Ferrer R.** (2023). Modelación de inundaciones compuestas generadas por el huracán Wilma (2005) en el malecón Tradicional de La Habana. [Trabajo de Diploma (en opción al título de Ingeniero)]. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses,

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Daniela Córdova de Horta** <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>

Conceptualización y diseño del estudio, formulación del problema de investigación, desarrollo de la metodología, implementación y calibración del modelo numérico, análisis e interpretación de resultados, elaboración de figuras y tablas, redacción del manuscrito y revisión final.

**Bryan Pérez León** <https://orcid.org/0009-0000-5820-5234>

Apoyo en la implementación del modelo numérico, procesamiento y análisis de datos, validación de resultados, contribución en la revisión y edición del manuscrito.

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

Supervisión general del estudio, orientación en la selección y aplicación de metodologías, validación de los resultados obtenidos, discusión crítica del trabajo, revisión sustantiva del manuscrito y garantía del rigor científico.