

Simulación numérica de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Malecón Tradicional de La Habana

Jidel Antonio Del Sol Díaz

E-MAIL:

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

Bryan Pérez LeónE-MAIL: perezleonbryan856@gmail.com

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

Patricia Ruth de Horta Brito

E-MAIL:

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

RESUMEN

El aumento de la urbanización conlleva a que los sistemas de drenaje pluvial sean insuficientes a la hora de evacuar intensas lluvias, provocando recurrentes inundaciones pluviales. Ante esta situación surgen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como una solución innovadora que imita el ciclo hidrológico y embellece el entorno urbano. La investigación aborda la simulación numérica de la red de drenaje pluvial en dos zonas del Malecón Tradicional de La Habana, evaluándose el comportamiento hidráulico de la misma con un período de retorno de 5 y 50 años, para las condiciones actuales y con propuesta de solución basándose en la implementación de los SUDS.

PALABRAS CLAVE: *urbanización, inundaciones, SUDS*

Numerical Simulation of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). Havana's Traditional Malecón

ABSTRACT

The increase in urbanization leads to stormwater drainage systems being insufficient for evacuating intense rainfall, causing recurrent pluvial flooding. In response to this situation, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) emerge as an innovative solution that mimics the hydrological cycle and enhances the urban environment. The research addresses the numerical simulation of the stormwater drainage network in two areas of the Traditional Malecón in Havana, evaluating its hydraulic performance of the network for return periods of 5 and 50 years, considering both current conditions and a proposed solution based on the implementation of SUDS.

KEYWORDS: *urbanization, floods, SUDS*

01 INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) emergen como una respuesta fundamental a la mitigación de inundaciones. Lejos de ser una solución meramente infraestructural, los SUDS no solo brindan control de la cantidad de agua, sino que también mejoran su calidad y aumentan el confort y la biodiversidad de las ciudades como pilares fundamentales. Estos nuevos enfoques se presentan como soluciones de bajo impacto ambiental, que buscan incrementar la capacidad de las ciudades de gestionar el agua de lluvia e imitar lo más posible el ciclo hidrológico natural de la región antes de su urbanización, mediante la implementación de infraestructuras

ecológicamente sostenibles (Pérez Hurtado, 2020).

Se evalúa el uso de los SUDS con el fin de mitigar los episodios de inundación, mejorar la gestión de las aguas de escorrentía y contribuir a la resiliencia urbana. Para cuantificar con precisión el alcance y efectividad de las soluciones propuestas, la investigación emplea el modelo matemático Iber-SWMM. Este software permite analizar el comportamiento hidráulico de la red de drenaje existente y con la inclusión de los SUDS para iguales precipitaciones y períodos de retorno.

El caso de estudio se centra en el Malecón Tradicional de La Habana, enmarcado en el tramo comprendido entre las calles Marina y Paseo del Prado. En esta área se van a estudiar dos zonas específicas, identificadas como críticas por la recurrencia de inundaciones pluviales.

02 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Malecón Tradicional de La Habana, enmarcado en el tramo comprendido entre las calles Marina y Paseo del Prado ocupa un área de 3,42 km² y su superficie se encuentra totalmente urbanizada con pocos espacios libres. Presenta una población aproximada de 160 000 habitantes para una densidad de 47174 hab/km² y constituye uno de los más antiguos centros urbanos que se desarrolló desde la época colonial (Córdova López, 2020).

Debido a que en esta área se presentan puntos de inundación, se escogen dos zonas de estudio, con el objetivo de analizar estos fenómenos. Estas zonas se salen un poco del área del Malecón Tradicional para poder estudiar el comportamiento de las pendientes aguas arriba a los puntos de inundación. La primera zona tiene un área de 0,998 km² y está comprendida entre las calles Infanta (al este), Zanja (al sur), Escobar (al oeste) y el Malecón de La Habana (al norte). La segunda zona de estudio tiene un área de 0,81 km² y está comprendida entre las calles Galeano (al este), Dragones (al sur), Avenida Bélgica (al oeste) y el Malecón de La Habana (al norte).

03 DETERMINACIÓN DEL HIETOGRAMA A PARTIR DEL MÉTODO DE BLOQUE ALTERNOS

En la figura 3.1 se muestran las curvas IFD (Intensidad-Frecuencia-Duración) para periodos de retorno de 5 y 50 años. Estas curvas están asociadas a probabilidades de ocurrencia del 20 % y el 2 % respectivamente. Los valores de intensidad se representan en función del tiempo, considerando una duración de lluvia de 6 horas con intervalos de 5 minutos.

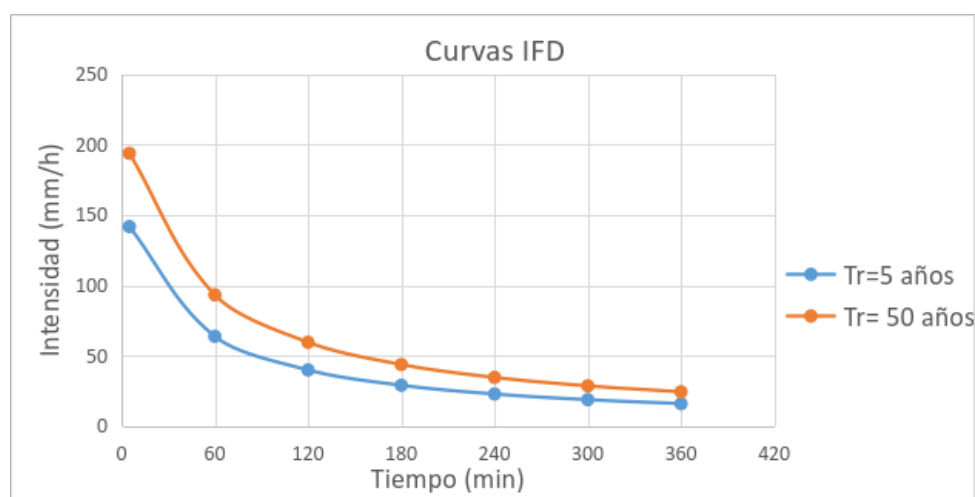


Figure 3.1. Curvas IFD para periodos de retorno de 5 y 50 años.

Para la construcción del hietograma se procede colocando en el centro la mayor precipitación registrada en los 5 minutos más lluviosos. A su derecha, se coloca la precipitación registrada en el segundo intervalo más lluvioso. A la izquierda, la registrada en el tercer intervalo más lluvioso, a la derecha la cuarta y así alternando con los demás intervalos, como se esboza en las figuras 3.2 y 3.3:

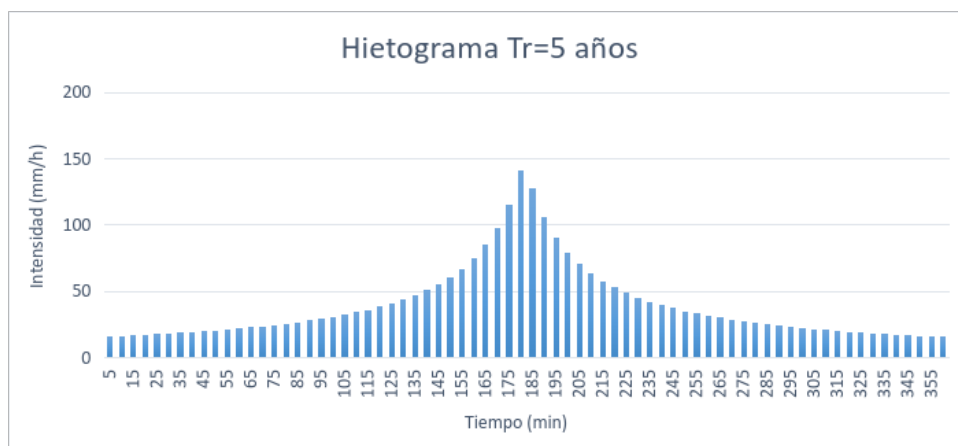


Figure 3.2. Hietograma para período de retorno de 5 años.

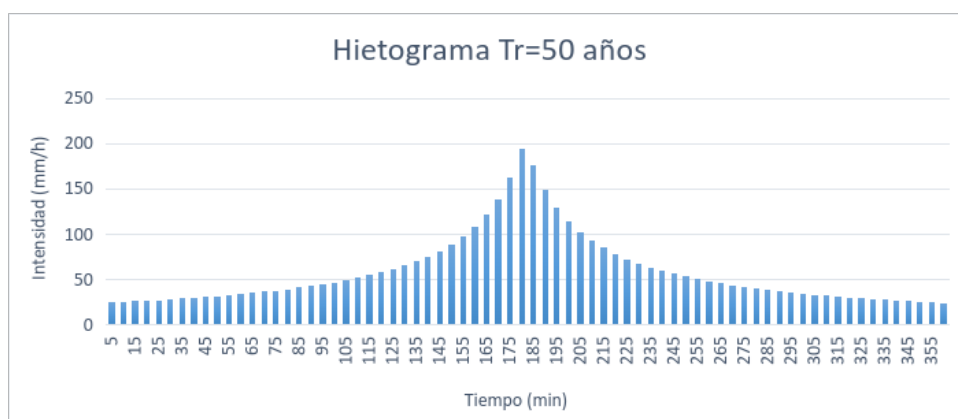


Figure 3.3. Hietograma para período de retorno de 50 años.

04 APLICACIÓN DE LOS SUDS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO

Los SUDS son reconocidos como sistemas para la gestión alternativa del agua de escorrentía superficial, que permiten, mediante estrategias e infraestructura complementaria, reproducir, de la manera más aproximada posible, el ciclo hidrológico natural, mitigando así los efectos negativos que, tanto las variaciones de factores climatológicos como los procesos de urbanización, tienen sobre las características morfológicas de la cuenca y sobre el comportamiento hidrológico (Carrazana Ruiz, 2025). Partiendo de los diversos tipos de SUDS que existen y de un estudio de las zonas, se van a utilizar específicamente los techos verdes, los pavimentos permeables y los alcorques.

4.1. Definición de los escenarios de estudio

El análisis de los SUDS en el Malecón Tradicional se lleva a cabo mediante una evaluación exhaustiva del drenaje de sus aguas pluviales. Para esto se establecen y modelan diferentes propuestas, teniendo en cuenta el comportamiento de la red de drenaje actual, así como, la implementación de los SUDS. En la Tabla 4.1 se describen los escenarios de estudios utilizando 5 y 50 años de período de retorno de evento de lluvia, simulándose cuatro escenarios con tiempo de corrida de 8 horas para un hietograma de 6 horas, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema en cuanto a los niveles de intensidad y frecuencia de precipitación.

Table 4.1. Descripción de los escenarios de estudio.

Escenarios	Descripción	Objetivos
1- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 5 años (drenaje dual)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio para las condiciones actuales
2- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 5 años (drenaje dual + SUDS)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, con la implementación de los SUDS
3- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 50 años (drenaje dual)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, para las condiciones actuales
4- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 50 años (drenaje dual + SUDS)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, con la implementación de los SUDS

4.2. Puntos de observación

Para el análisis de los resultados de la simulación, se expresan en la Tabla 4.2 distintos puntos ubicados en las zonas de alto riesgo de inundación, según datos históricos, con el objetivo de analizar el comportamiento de red de drenaje existente y con la implementación de los SUDS.

Table 4.2. Localización de los puntos de observación.

Puntos	Localización de los puntos
1	Marina y Jovellar
2	Oquendo y Ánimas
3	Águila y Trocadero
4	Prado y Geníos

4.3. Análisis y comparación del comportamiento de la inundación en los puntos de observación

El resultado de la simulación se analiza en intervalos de 5 minutos para el tiempo de simulación planteado. En la figura 4.1, se puede ver cómo se comportan los calados en cada punto de observación para los diferentes escenarios.

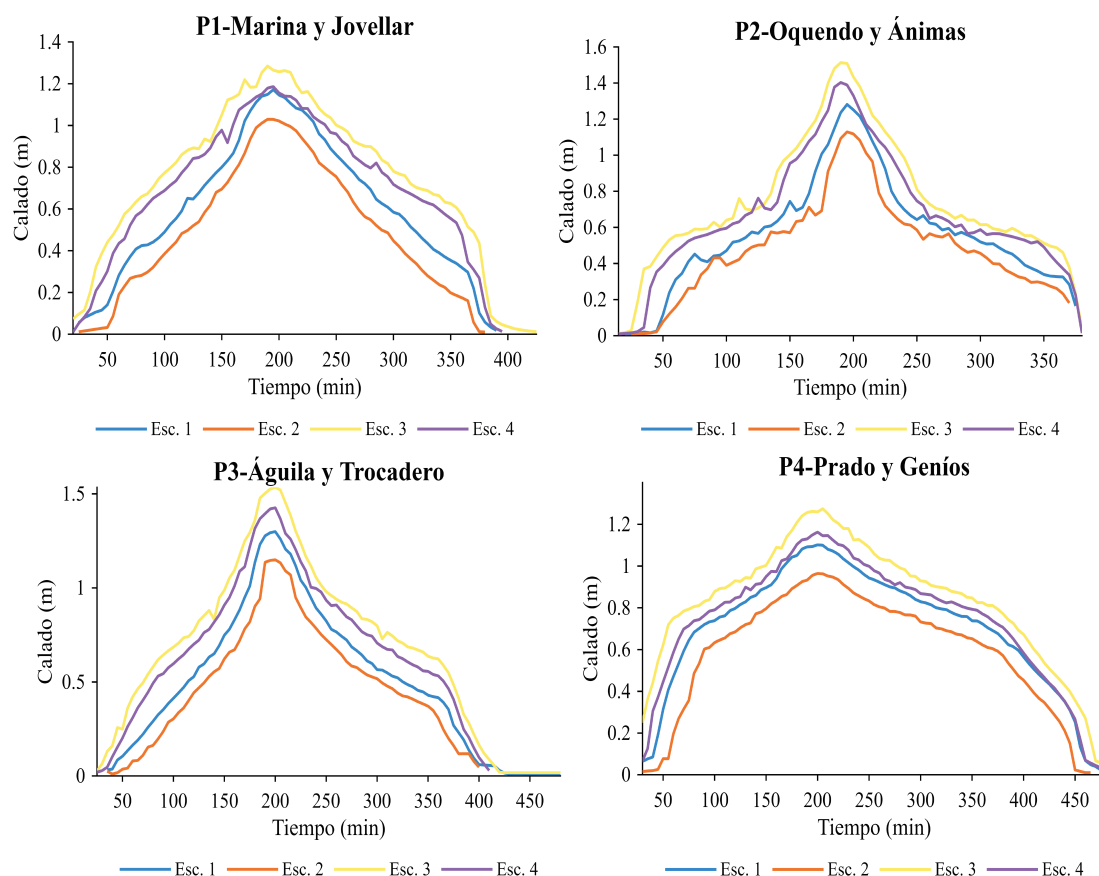


Figure 4.1. Gráficos de calado en cada punto de observación.

Se puede observar en cada punto que la diferencia entre los calados de los escenarios 3 y 4 es menor que la diferencia entre los calados de los escenarios 1 y 2, debido a que aumenta la lluvia para un período de retorno de 50 años con respecto a la de 5 años, pero la cantidad de SUDS sigue siendo la misma.

En la Tabla 4.3 se presentan los valores de máximos calados, los cuales ocurren entre los 190 y los 200 minutos, es decir entre las 3,17 y las 3,33 horas del comienzo de la lluvia, en todos los puntos de observación, lo que muestra un comportamiento uniforme del escurrimiento en toda la cuenca debido a la similitud de la topografía. Los puntos de mayor calado son P-2 (Oquendo y Ánimas) y el P-3 (Águila y Trocadero), siendo los de menor calado P-1 (Marina y Jovellar) y P-4 (Prado y Geníos).

4.4. Análisis y comparación del comportamiento de los caudales en los puntos de observación

En la figura 4.2 se pueden ver cómo se comportan los caudales en cada punto de observación para los diferentes escenarios simulados.

En la Tabla 4.4 se presentan los valores de máximos caudales, ocurriendo estos entre los 175 y los 205 minutos, es decir entre las 2,92 y 3,42 horas del comienzo de la lluvia. Los puntos de mayor caudal pico son P-1 (Marina y Jovellar) y P-2 (Oquendo y Ánimas). Los puntos de menor caudal pico son P-3 (Águila y Trocadero) y P-4 (Prado y Geníos).

Table 4.3. Máximos calados en los puntos de observación para cada escenario.

		Calados (m)			
Puntos	Tiempo (min)	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
1	190	1,1483	1,0294	1,2847	1,1787
	195	1,1716	1,0293	1,2646	1,1861
	200	1,1456	1,0213	1,2574	1,1557
2	190	1,2359	1,0927	1,5129	1,4027
	195	1,2813	1,1292	1,5084	1,3891
	200	1,2512	1,1180	1,4331	1,3298
3	190	1,2770	1,1365	1,5028	1,3945
	195	1,2934	1,1493	1,5254	1,4198
	200	1,2993	1,1460	1,5347	1,4259
4	190	1,0923	0,9333	1,2570	1,1303
	195	1,0937	0,9558	1,2617	1,1495
	200	1,1015	0,9646	1,2593	1,1625

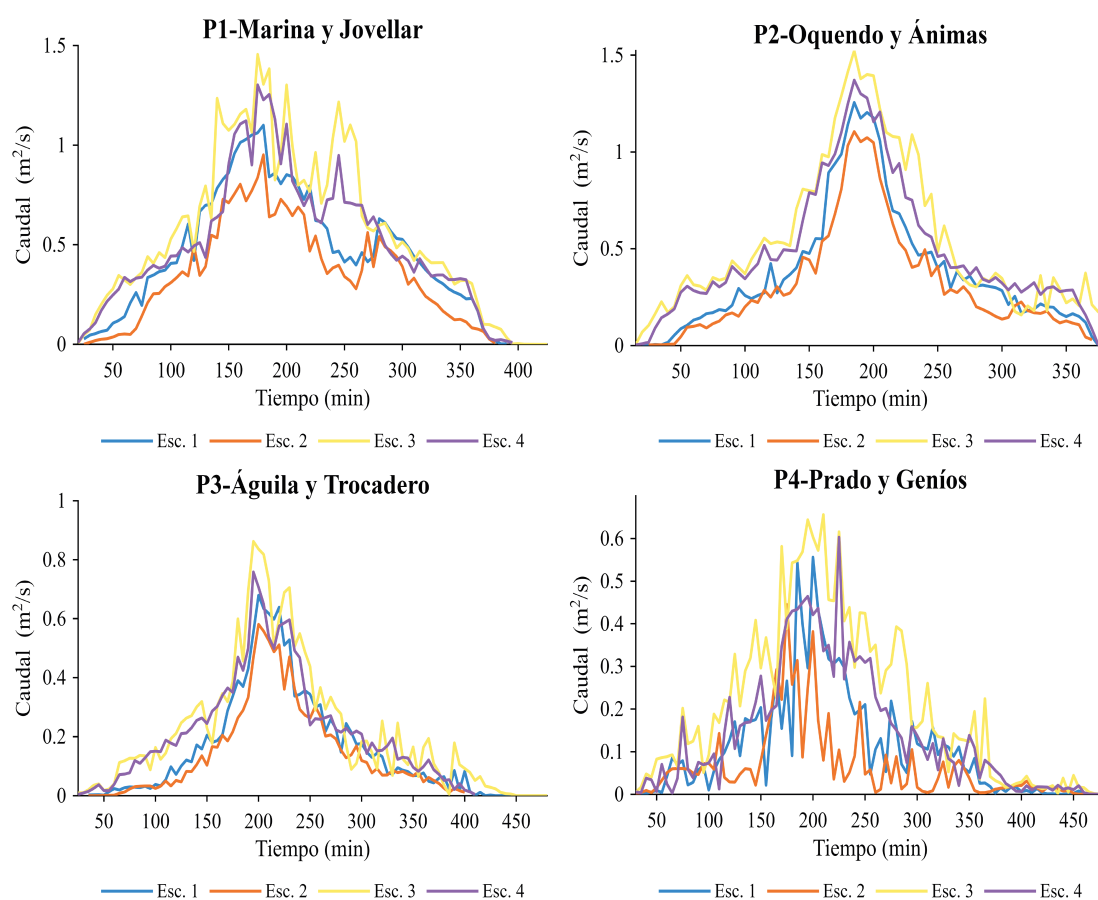
**Figure 4.2.** Gráficos de caudales en cada punto de observación.

Table 4.4. Máximos caudales en los puntos de observación para cada escenario.

Caudales (m ³ /s)					
Puntos	Tiempo (min)	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
1	175	1,0620	0,8373	1,4561	1,3027
	180	1,1004	0,9518	1,3057	1,2272
	185	0,8406	0,6392	1,3838	1,2546
2	185	1,2561	1,1056	1,5234	1,3714
	190	1,1743	1,0526	1,3778	1,3004
	195	1,2043	1,0740	1,3999	1,2787
3	195	0,5528	0,4676	0,8623	0,7589
	200	0,6793	0,5808	0,8363	0,7066
	205	0,6334	0,5572	0,8180	0,6491
4	195	0,2962	0,2494	0,6441	0,4642
	200	0,5564	0,3817	0,6037	0,4210
	205	0,4320	0,1736	0,5720	0,4365

Se puede apreciar que los máximos calados ocurren a la misma hora o hasta 15 minutos después de generarse los máximos caudales, por tanto, hasta que no se producen los caudales picos no llega a ocurrir la máxima inundación.

La zona de estudio se encuentra totalmente urbanizada con pocos espacios libres sin pavimentar y desde el punto de vista estructural, las edificaciones no cuentan en su totalidad con un óptimo estado técnico, por lo que no se puede utilizar el 100 % de todos los espacios para implementar los SUDS. Por tanto, la reducción de los valores picos de inundación del escenario 1 con respecto al escenario 2, se encuentran entre el 11 y el 13 % y en el caso del escenario 3 con respecto al escenario 4, se encuentran entre el 7 y el 8 %. En el caso de los caudales, la reducción de los valores picos del escenario 1 con respecto al escenario 2, se encuentra entre el 32 y el 12 % y en el caso del escenario 3 con respecto al 4 se encuentra entre el 28 y el 10 %.

4.5. Análisis y comparación de la red de drenaje pluvial

El análisis de la red de drenaje pluvial se hace en los registros correspondientes a cada punto de observación y en todos los escenarios de estudios planteados. La Tabla 4.5 muestra el nodo correspondiente a cada punto.

Table 4.5. Localización de los nodos.

Nodos	Localización de los nodos
RG11_C13	Marina y Jovellar
RG40_C13	Oquendo y Ánimas
RG13_C17	Águila y Trocadero
RG35_C18	Prado y Geníos

A continuación se presenta el comportamiento temporal de la inundación en cada registro para cada uno de los escenarios de estudio y el perfil longitudinal correspondiente al tramo donde se localizan los registros, representado en el instante en que se alcanza el pico de inundación.

En la figura 4.3 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG11_C13 que corresponde a Marina y Jovellar. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre 5,2 m³/s y 10,5 m³/s con un tiempo de duración de 3,50 horas para el escenario 1 y entre 6,3 m³/s y 15,2 m³/s con un tiempo de duración de 3 horas para el escenario 2.

En la figura 4.4 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG11_C13 que corresponde a Marina y Jovellar. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre 5 m³/s y 17,7

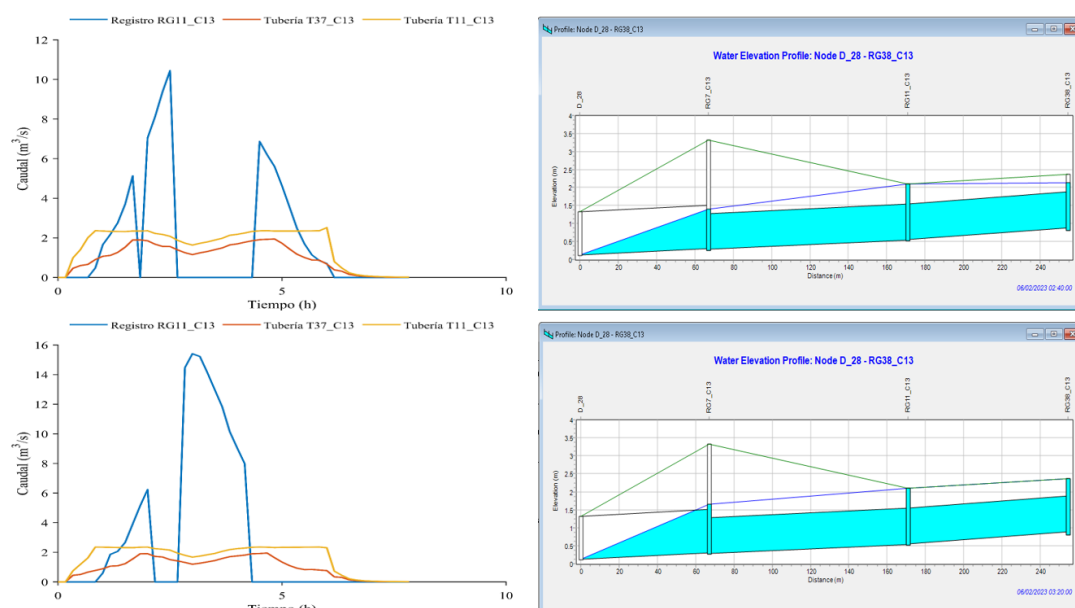


Figure 4.3. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG11_C13 (escenario 1 y 2).

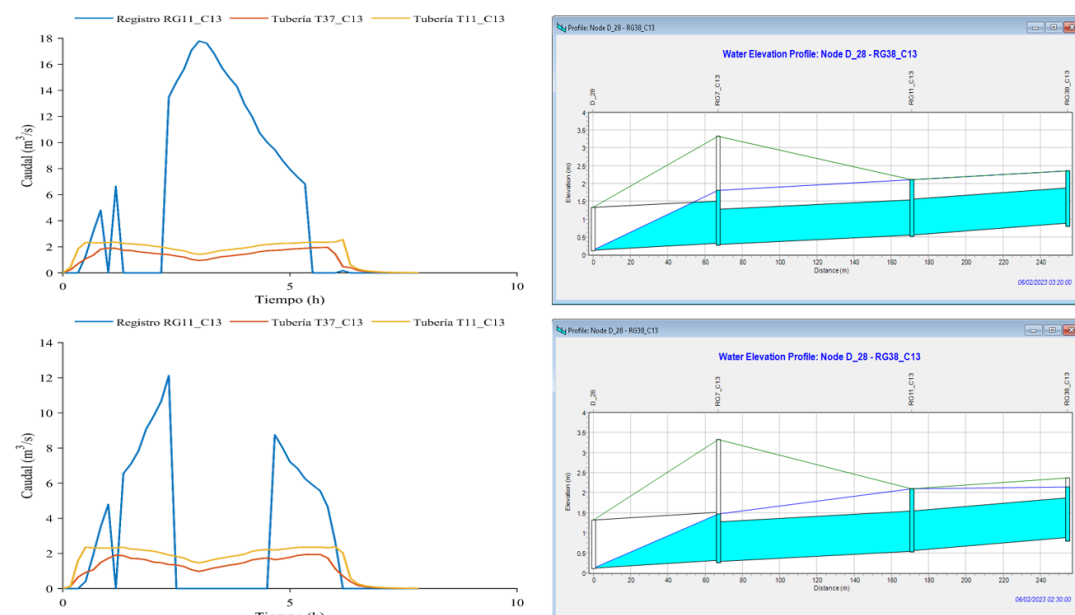


Figure 4.4. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG11_C13 (escenario 3 y 4).

m^3/s y un tiempo de duración de 4,20 horas para el escenario 3 y entre $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12,2 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 3,50 horas para el escenario 4.

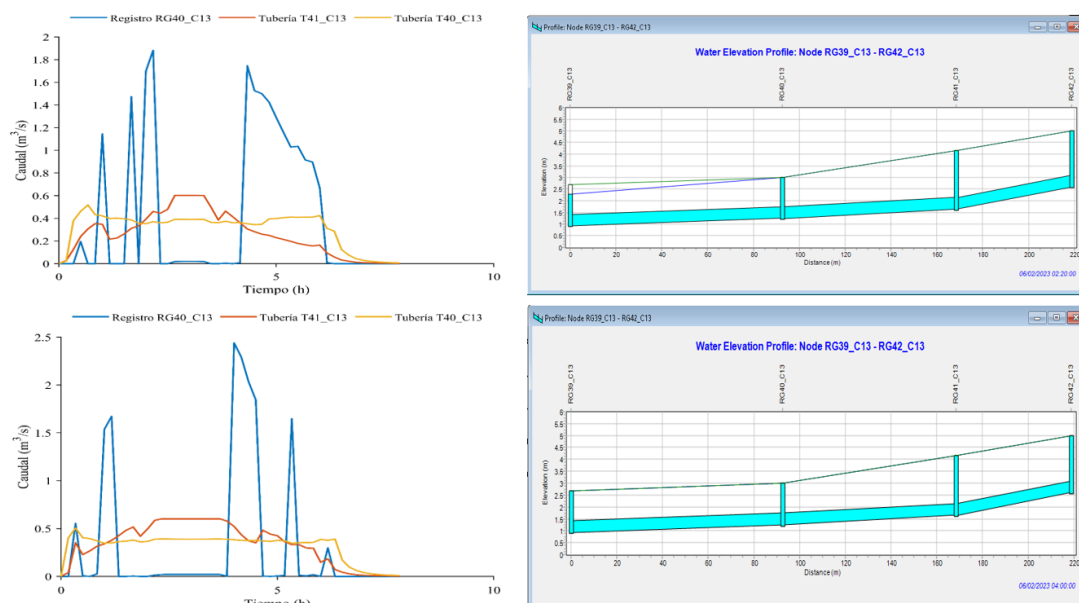


Figure 4.5. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG40_C13 (escenario 1 y 2).

En la figura 4.5 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG40_C13 que corresponde a Oquendo y Ánimas. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 3,30 horas para el escenario 1 y entre $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 2,30 horas para el escenario 2.

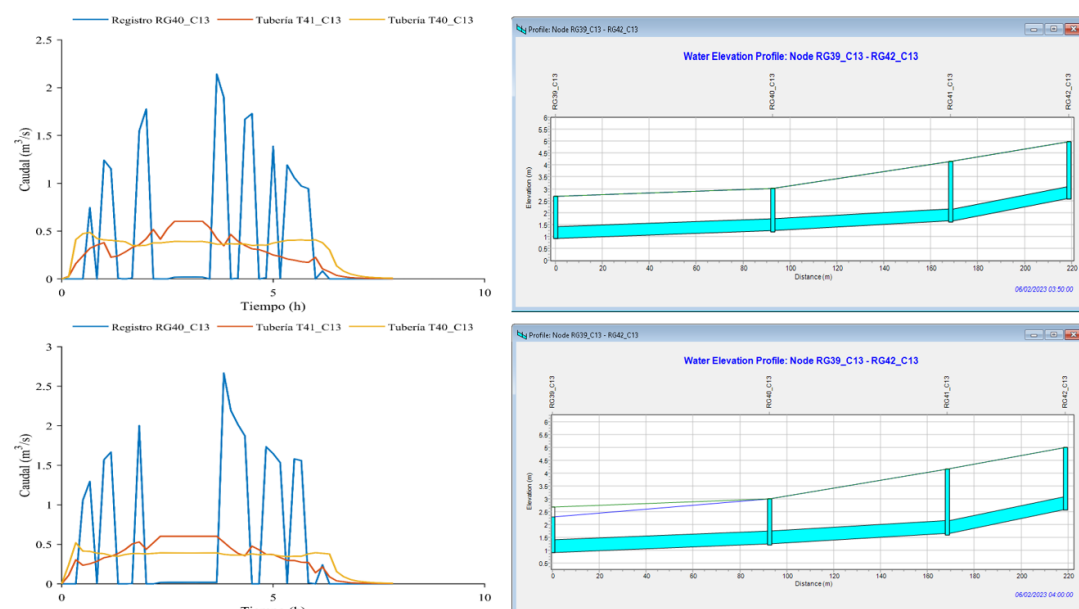


Figure 4.6. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG40_C13 (escenario 3 y 4).

En la figura 4.6 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG40_C13 que corresponde a Oquendo y Ánimas. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 4 horas para el escenario 3 y entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo

de duración de 3,30 horas para el escenario 4.

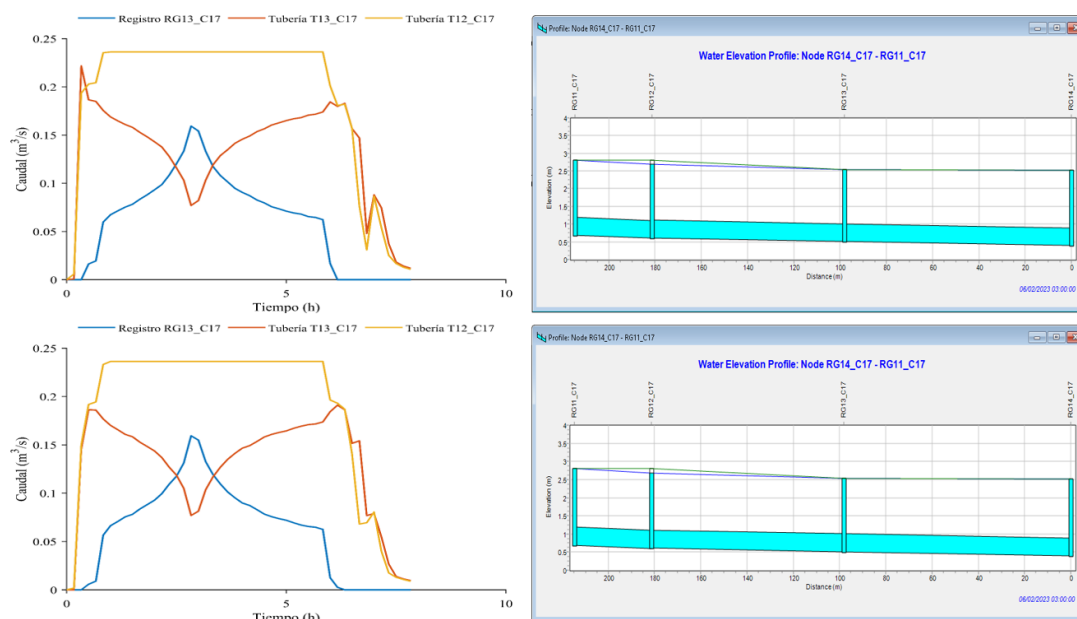


Figure 4.7. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG13_C17 (escenario 1 y 2).

En la figura 4.7 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG13_C17 que corresponde a Águila y Trocadero. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 5,50 horas para el escenario 1 y $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 5,50 horas y para el escenario 2.

En la figura 4.8 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG13_C17 que corresponde a Águila y Trocadero. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,10 horas para el escenario 3 y de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo de duración de 6 horas para el escenario 4.

En la figura 4.9 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG35_C18 que corresponde a Prado y Genios. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,50 horas para el escenario 1 y entre $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,30 horas para el escenario 2.

En la figura 4.10 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG35_C18 que corresponde a Prado y Genios. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo de duración de 7,40 horas para el escenario 3 y entre $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 7,20 horas para el escenario 4.

05 CONCLUSIONES

Se puede observar que debido al aumento de la urbanización el sistema de drenaje pluvial urbano diseñado es insuficiente para evacuar el volumen de escorrentía generado por las precipitaciones.

La simulación numérica con Iber-SWMM permite realizar una mejor comparación de los escenarios de estudio, ya que permite realizar el cálculo de flujo en la superficie y en la red durante episodios de lluvia.

Partiendo de los cuatro puntos de observación estudiados, la cota de máxima inundación ocurre en Águila y Trocadero con un valor de 1,30 m para 5 años y 1,53 m para 50 años de período de retorno.

Se comprueba que al implementar los SUDS se reducen tanto los picos de inundación como los tiempos de inundación.

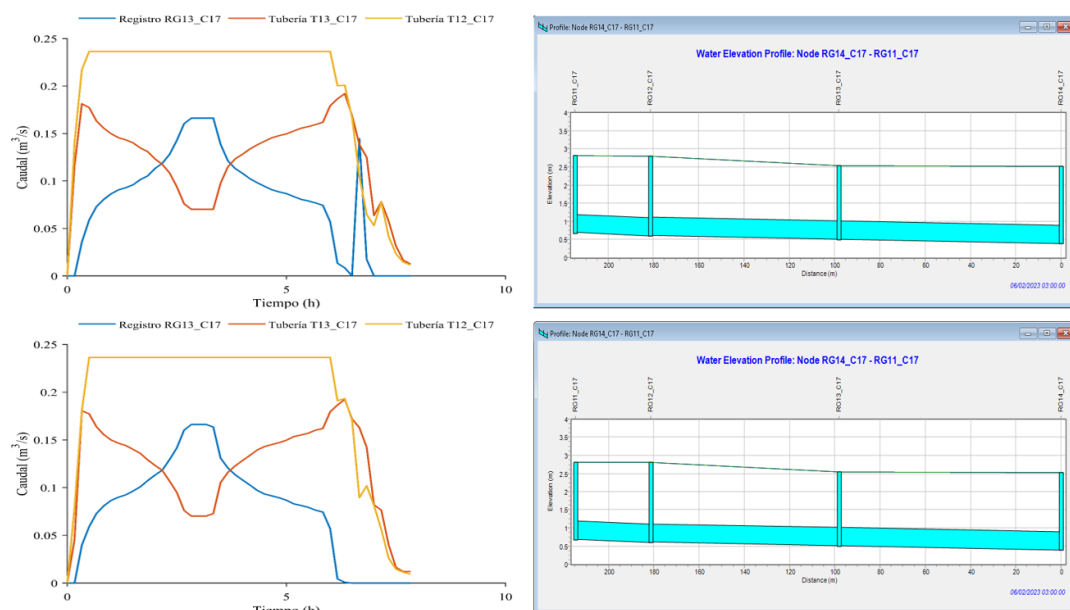


Figure 4.8. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG13_C17 (escenario 3 y 4).

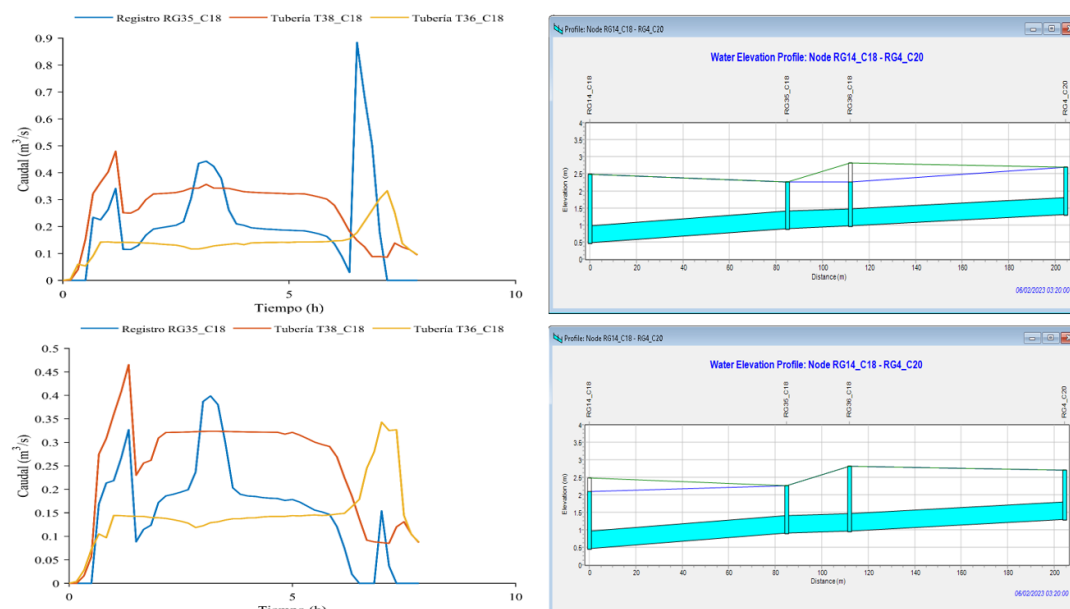


Figure 4.9. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG35_C18 (escenario 1 y 2).

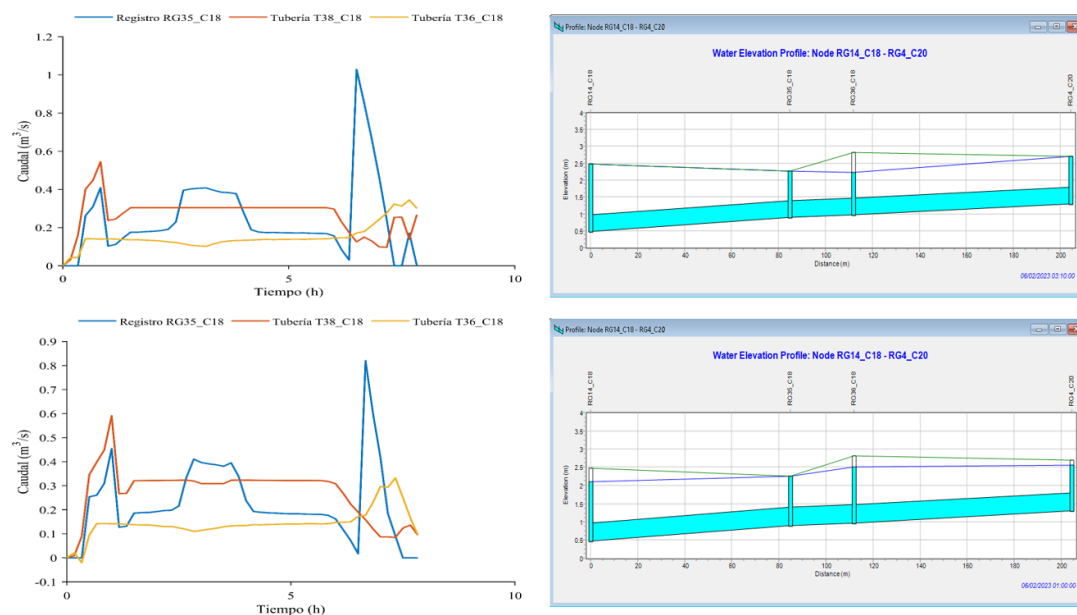


Figure 4.10. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG35_C18 (escenario 3 y 4).

06 REFERENCIAS

- Carrazana Ruiz, A.** (2025). Simulación numérica de sistemas de drenaje basados en la naturaleza. malecón de la habana.
- Córdova López, L.** (2020). Malecón tradicional de la habana. parte i: Análisis de las causas de la inundación costera. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(3), 25–39.
- Pérez Hurtado, O. F.** (2020). Sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Jidel Antonio Del Sol Díaz <https://orcid.org/0009-0004-8351-4724>
 Bryan Pérez León <https://orcid.org/0009-0000-5820-5234>
 Patricia Ruth de Horta Brito <https://orcid.org/0000-0001-6502-8205>