

Simulación numérica del drenaje pluvial de la CUJAE. Soluciones propuestas.

Patricia Ruth de Horta Brito email: patricia@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Marianao, La Habana

Luis Fermín Córdova López email: cordova@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Marianao, La Habana.

RESUMEN

La Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE) presenta serios problemas de inundaciones causadas por lluvias, afectando con relativa frecuencia tanto la zona docente como la residencia estudiantil (beca). Debido a estos problemas se presenta un estudio del comportamiento hidráulico de la residencia estudiantil mediante el uso de modelos numéricos. La simulación de ambas redes dio paso a la propuesta de varias soluciones, luego de haber sido analizados los resultados para así minimizar los problemas existentes en las zonas críticas.

Palabras clave: drenaje, inundaciones, modelación numérica, soluciones estructurales

Numerical simulation of the storm drain network of the CUJAE. Solution proposal.

ABSTRACT

The Theological University of Havana present flood problem due to the sever rains. All zone of the university have flooding problems. In this study is showed the hydraulic behavior of the drain network by mean numerical model. The simulations of network allow obtain several solutions in order to reduce the flooding problems.

Keywords: drainage, floods, numerical modeling, structural solutions

INTRODUCCION

Las redes de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial son una parte esencial en el sistema de manejo integral del agua, la ausencia de estos sistemas, su mal diseño y/o concepción, como la falta de mantenimiento afecta a muchas zonas urbanas en todo el mundo. La Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE) presenta serios problemas de inundación causada por lluvias, que afectan el buen desarrollo de las actividades propias de este tipo de institución, la aplicación de la simulación numérica para el estudio de redes hidráulicas, y en particular de las redes de alcantarillado y drenaje pluvial permiten conocer los problemas que se generarán durante su explotación. Sañudo (2020), Sánchez (2012), Murcia (2011), Concha (2009). En el caso de las redes de drenaje pluvial se estudia el comportamiento de la misma para diferentes períodos de retornos de la intensidad de la lluvia detectándose los problemas de inundación debido a la falta de capacidad del sistema, y la necesidad de tomar acciones de tipo estructural y no estructural.

LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Universidad Tecnológica de La Habana Jose Antonio Echeverría, (CUJAE) se encuentra ubicada en el municipio Marianao, calle 114 No.11901 entre Ciclo-Vía y Rotonda, en el sur de La Habana; entre las coordenadas Lambert N: 358 000 a 359 300 y E: 345 000 a 355 300 y ocupa un área de 52,56 ha. La CUJAE se encuentra dividida en dos zonas, la zona docente y la residencia estudiantil. El área de estudio la cruzan pequeños arroyuelos que son afluentes del río Almendares.

La zona de la Residencia Estudiantil (en lo adelante se nombrará “beca”), comprende los edificios de alojamiento de los estudiantes, la cafetería central, la administración, la posta médica y los laboratorios de computación. Esta zona presenta un terreno accidentado, el cual desciende hasta una zanja de drenaje que la atraviesa aproximadamente por la zona central. La mayor parte del terreno está compuesto por superficies cubiertas de césped, ya que el nivel de urbanización es menor que en la zona docente.

Características del sistema de drenaje pluvial de la CUJAE

Para este sistema las características del terreno hace que se cuente con dos sistemas de drenaje independientes, uno en la zona de la beca y otro en la zona docente. En este trabajo se presentan los resultados del estudio, y propuesta de solución de la zona de la beca o residencia estudiantil, la cual sufre fuertes inundaciones durante la ocurrencia de intensas lluvias.

Drenaje pluvial de la zona de la beca

El sistema de drenaje de la beca está compuesto por varias redes de tuberías que drenan el escurrimiento al canal, desde donde se vierte a un afluente del río Almendares, el sistema responde a un modelo de trazado perpendicular de Horta (2018). Hacia este canal drena toda el área limitada por los siguientes parte aguas (ver figura 1). Calle 114 desde el límite de la CUJAE con el Centro de Cooperación Médica hasta el terreno de softbol. Calle del DEDER hasta la zona de atrás del CITI y el inicio del edificio 300. Límite con Centro de Cooperación Médica desde 114 hasta el edificio 100.

No obstante de la existencia del parte aguas de la calle 114, el canal central recibe además el agua proveniente del sistema de drenaje existente en la rotonda de la calle 114 a través de dos alcantarillas. En esta zona ocurren frecuentes inundaciones, sobre todo en el área del edificio 500-A, donde el agua ha alcanzado una altura de 50cm sobre el nivel del piso López (2014).

A partir de un recorrido por la zona se pudieron detectar los siguientes problemas:

- ✓ El canal que conecta las alcantarillas del sistema de drenaje de la rotonda, esta erosionado y en la zona cercana al terreno de fútbol, prácticamente no existe.
- ✓ El tramo de canal comprendido entre el terreno de fútbol y el edificio 500-A esta enyerbado y no conserva una sección uniforme.
- ✓ La unión del canal con la tubería de 1000 mm frente a los edificios 500-A y 600 está totalmente obstruida.
- ✓ El sistema de rejillas a ambos laterales del edificio 500 esta obstruido.
- ✓ El canal de salida después del edificio 100 se encuentra erosionado y enyerbado.
- ✓ En la zona de descarga después del edificio 100, el alcantarillado se encuentra vertiendo libremente al canal de drenaje.



Figura 1. Zonas con problemas de inundación.

Modelo matemático para la simulación del sistema de drenaje pluvial

El modelo AUTODESK SSA fue desarrollado por la empresa Autodesk.Inc., el mismo es una recopilación de varios modelos existentes, sobre todo el SWMM con capacidad para compartir datos con los software tipo CAD (diseño asistido por ordenador, por sus siglas en inglés) y con los sistemas de información geográfica (SIG). Es un potente conjunto de herramientas para el análisis y manejo de sistemas de drenaje urbanos, alcantarillados pluviales y sanitarios Autodesk SSA (2013).

Básicamente el SSA tiene un funcionamiento y una interfaz de usuario semejante al SWMM, EPA (2005), compartiendo con este la misma filosofía de trabajo. A su vez que incorpora nuevas potencialidades como la importación de planos de la red y el uso de modelos digitales del terreno como base para el análisis de la red. El SSA permite la importación de ficheros creados en SWMM y su adaptación al nuevo entorno de trabajo. No obstante se mantienen los módulos para la modelación hidrológica – hidráulica del SWMM.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN. SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL

Implementación de los modelos hidráulicos del Autodesk SSA

A continuación, se detallan los principales datos y variables a introducir en el software durante la implementación del modelo, para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- 1- Topografía y trazado de las redes.
- 2- Datos para el cálculo de la infiltración y el escurrimiento.
- 3- Introducción de las principales variables del modelo.
- 4- Escenarios a modelar.

Topografía y trazado de las redes

Para las redes de la beca y la docente se contó con la información topográfica brindada por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana, perteneciente al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

Datos para el cálculo de la infiltración y el escurrimiento

Siguiendo las recomendaciones de Sánchez 2012, el modelo de infiltración usado para la transformación lluvia-escurrimiento más conveniente en zonas urbanas es el de la Curva Número Suelo 1: relleno de areniscas y margas areno-arcillosas. K (conductividad hidráulica saturada) $\approx 3,8$ mm/h. Tipo hidrológico de suelo: B. Predominante en zona Docente. Suelo 2: Arcilla K $\approx 0,3$ mm/h. Tipo hidrológico de suelo: D. Predominante en zona de la residencia estudiantil.

Los valores del número de curva se tomaron en correspondencia con el tipo hidrológico de suelo y las características específicas de cada subcuenca. Los valores más comunes en ambas zonas de estudio son:

- 1- Para áreas pavimentadas, parqueos y techos: 98 (para ambos suelos)
- 2- Para áreas cubiertas de césped: 79 para suelos tipo B y 89 para suelos tipo D
- 3- Para áreas boscosas: 66 para suelos tipo B y 83 para suelos tipo D
- 4- Para áreas residenciales: 85 para suelos tipo B y 92 para suelos tipo D
- 5- Para áreas pantanosas y de vegetación densa: 58 para suelos tipo B y 78 para suelos tipo D

Datos de intensidad de la lluvia

La intensidad de la lluvia a usar en las modelaciones se toma de la curva I-F-D del pluviómetro de Plaza de la Revolución. En la tabla 1 se pueden observar los parámetros de la curva usada:

Tabla 1 Curva I-F-D

Equipo CH - 171			
Tr (años)	A	B	n
5	6813,63	45	0,99
10	7486,78	43	1
25	8873,41	43	1,01
50	9455,71	41,5	1,01

En la figura 2 se grafican las curvas I-F-D para distintos tiempos de retorno.

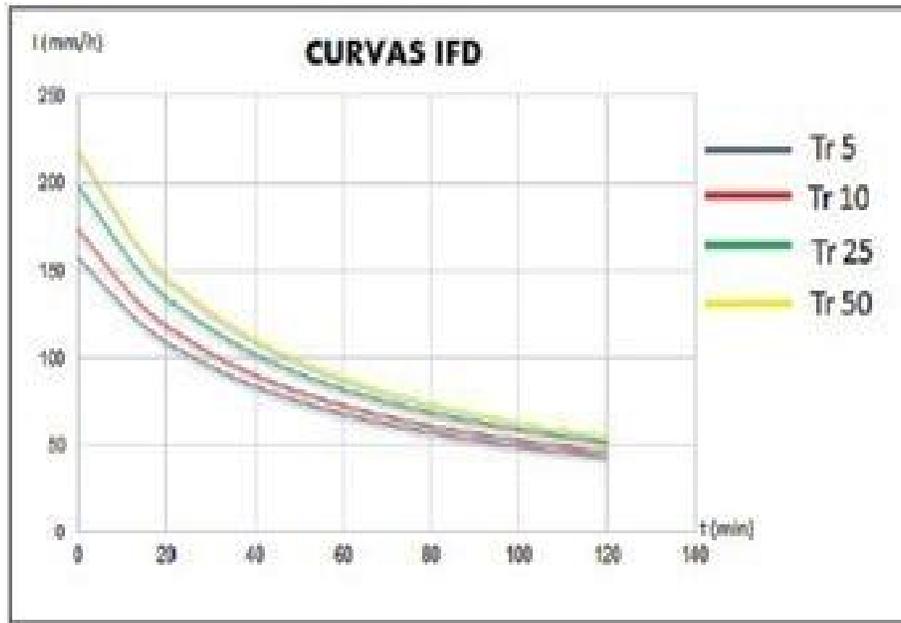


Figura 2. Curvas IFD para distintos períodos de retorno

Escenarios a simular

Los escenarios a simular se definen según la probabilidad de ocurrencia de la lluvia y el tiempo de duración de la misma.

Probabilidad de ocurrencia de la lluvia

La Norma Cubana NC 48-26 Drenaje Urbano, establece que para el diseño de sistemas de drenaje en zonas urbanas con edificios multiplantas, de importancia media o alta y zonas de almacenes menores, la probabilidad de la precipitación a tomar debe estar entre 10 y 20 % (tiempos de retorno de 5 a 10 años), como no se tiene conocimiento de la probabilidad que se usó en el diseño de la red, se propone considerar ambas en la modelación con el objetivo de comprobar el funcionamiento del sistema para las condiciones de diseño. Se propone además usar una probabilidad de 4% (tiempo de retorno de 25 años) para evaluar la respuesta de las redes ante la ocurrencia de un evento extremo.

Tiempo de duración de la lluvia

Para el diseño se recomienda usar una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca de aporte, para el caso de la modelación, puede, teóricamente usarse cualquier duración, no obstante, los tiempos de concentración calculados para el área de estudio, son siempre menores que dos horas, por lo que se decide tomar este tiempo para la modelación. Por tanto, los escenarios a modelar para ambas redes son:

Escenario #1-Lluvia de dos horas de duración con tiempo de retorno de cinco años (posible condición de diseño).

Escenario #2-Lluvia de dos horas de duración con tiempo de retorno de diez años (posible condición de diseño).

Escenario #3-Lluvia de dos horas de duración con tiempo de retorno de 25 años (ocurrencia de evento extremo).

Escenario #4- Lluvia de cuatro horas de duración con tiempo de retorno de 25 años (ocurrencia de evento extremo).

En las figuras de la 3 a la 6 se muestran los hietogramas de estas lluvias:

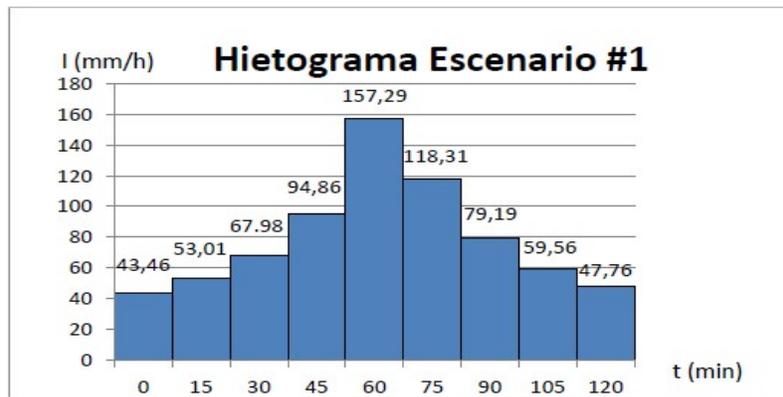


Figura 3. Lluvia para el escenario # 1

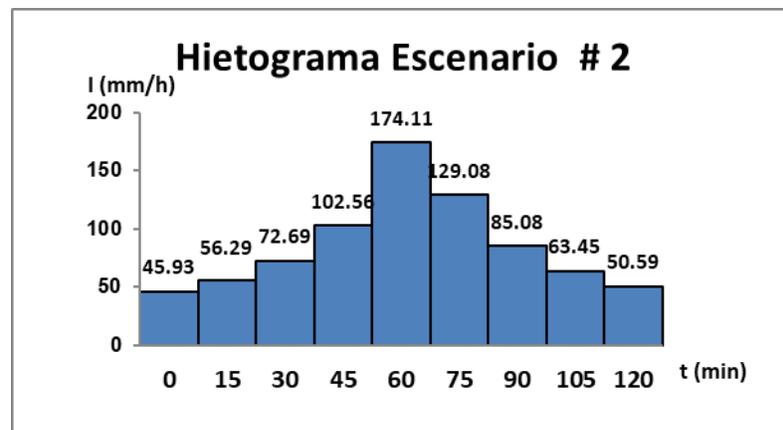


Figura 4. Lluvia para el escenario # 2

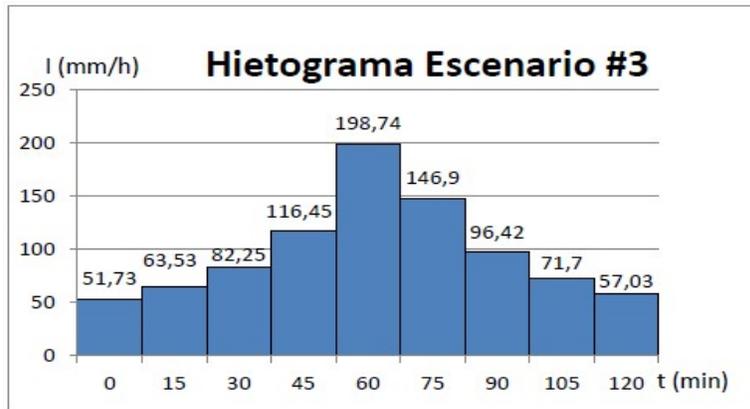


Figura 5. Lluvia para el escenario # 3

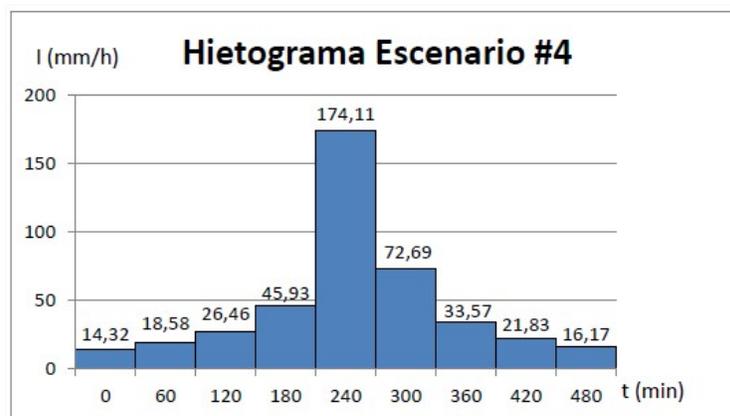


Figura 6. Lluvia para el escenario # 4

Es importante destacar que, para las dos redes, la simulación se realizará considerando que el funcionamiento de la misma es óptimo, o sea, que no existen obstrucciones en sumideros, conductos o canales, ni otros problemas que afecten el funcionamiento hidráulico del sistema, esto permitirá definir, si los problemas existentes se deben a un diseño deficiente o a la falta de mantenimiento.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE LA BECA

Nodos del sistema

Para el modelo de la beca se define un total de 61 nodos

Sumideros

Se tiene un total de 36 sumideros

Sistema de tuberías

El sistema cuenta con un total de 47 tramos de tubería (se consideran las tuberías entre dos registros y entre dos rejillas), todas de sección transversal circular y de asbesto cemento, de estas tuberías

Secciones de canales

En realidad, el sistema cuenta con un único canal central, las divisiones en el mismo se realizaron tomando en cuenta los cambios de geometría del mismo, se definieron 21 tramos diferentes.

Delimitación de las subcuencas

A partir de la base topográfica se delimitaron las áreas de aporte a los nodos y sumideros de interés. Se definieron un total de 96 subcuencas, para un área total de 19,36 ha. A continuación, se muestra la figura 7 con el trazado de la red.

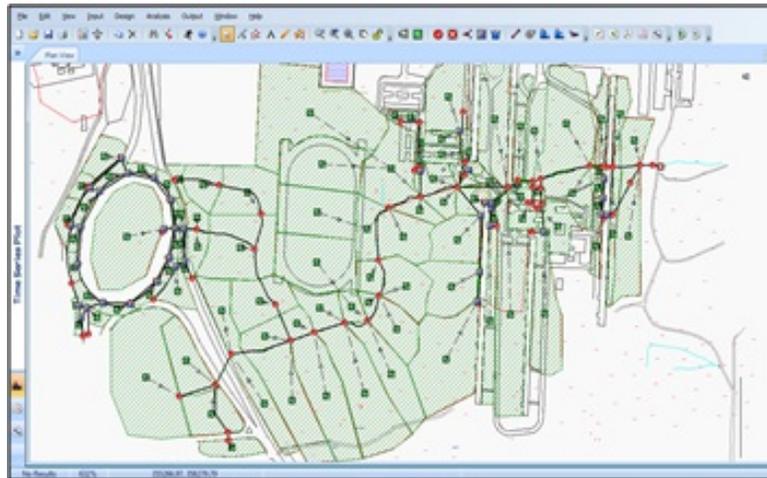


Figura 7. Trazado de la red de la beca en SSA

Simulación para la red de la beca

Se toman los siguientes puntos de interés para el análisis de los resultados:

- **Nodo 08** (inicio de los canales, recibe el agua de la rotonda y la zona del Oro Negro).
- **Nodo 39** (unión del canal con la tubería de 1000 mm frente al edificio 500-A).
- **Nodo 48** (unión de tres tuberías de 1000 mm con zanja frente al edificio 300-B).
- **Nodo 52** (paso bajo el edificio 100).
- **Nodo 58** (unión del canal principal con el sistema de junta abierta del edificio 100).
- Punto de descarga final.

Se toman estos nodos, los cuales están ubicados en el canal central, debido a que son puntos críticos del sistema, en la mayoría de los cuales, se tiene conocimiento que es donde ocurren los problemas de inundación. En la figura 8 se muestra la ubicación de dichos nodos en la red de beca.

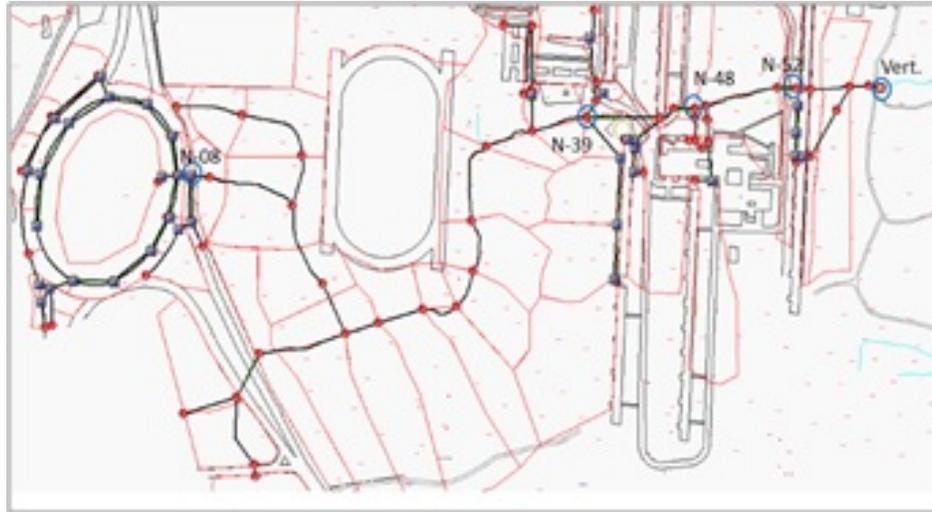


Figura 8. Ubicación de los nodos de interés en el análisis

Simulación del escenario 1

Durante la simulación de este escenario, el momento crítico ocurre aproximadamente a una hora y 30 minutos después de comenzar la lluvia, instante en el cual se producen los valores máximos de escurrimiento y flujo en los nodos, a continuación, se muestra la figura 9 con el comportamiento de la red para dicho intervalo de tiempo, en esta se muestra el comportamiento del escurrimiento en las subcuencas, el flujo de entrada a cada nodo y el caudal de circulación en cada conducto. En azul se resaltan los nodos donde ocurre inundación, igualmente se señalan en líneas azules gruesas los canales que se encuentran inundados. En líneas rojas gruesas se señalan las tuberías que están trabajando a sección llena. Las subcuencas que están ralladas en rojo son las de mayor aporte de escurrimiento.

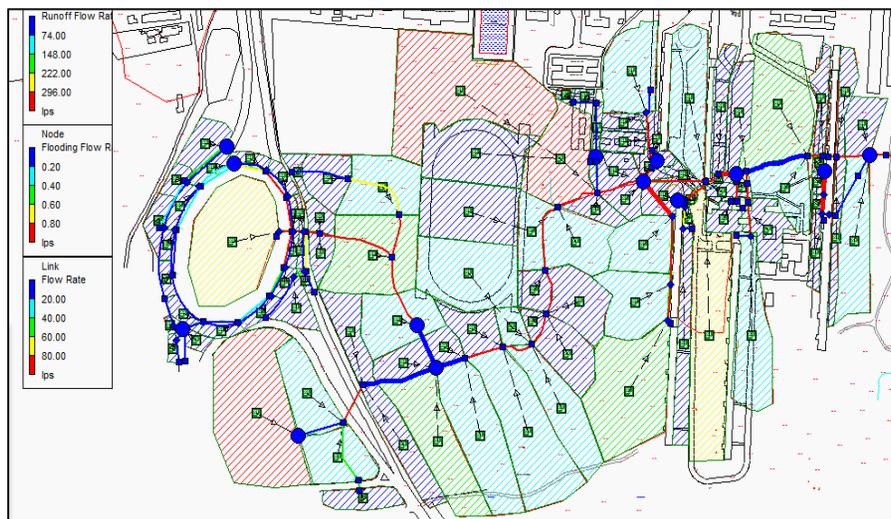


Figura 9. Comportamiento de la red para t=1h 30 min, escenario 1

A continuación, se muestra la figura 10 en la cual se observa el hidrograma de entrada a los nodos de interés, para todos los nodos el gasto pico ocurre para un tiempo de 1h 30 min como se explicó anteriormente.

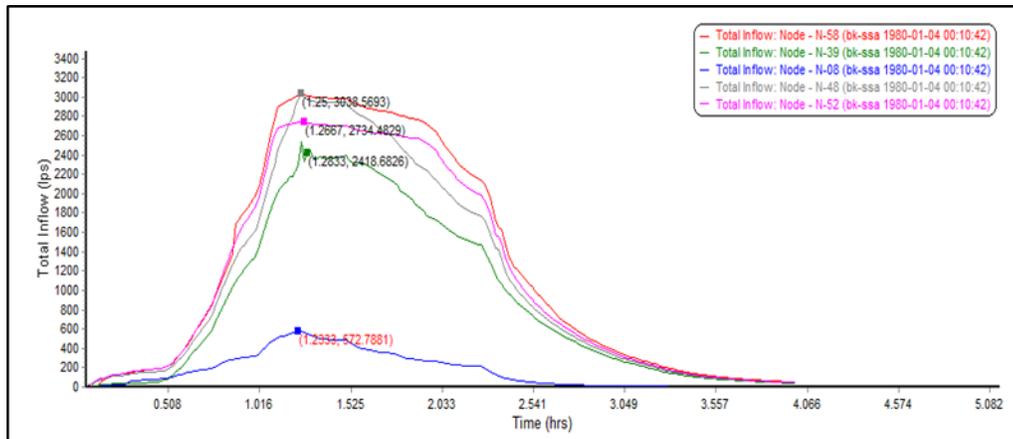


Figura 10. Hidrogramas en los nodos de interés

Simulación del Escenario 2

Para este escenario, la red responde de manera similar al anterior, llegándose al punto crítico en el mismo tiempo. En la figura 11 se muestra el comportamiento de la red para $t = 1h\ 15\ min$. Se mantienen los mismos problemas detectados en el escenario anterior, en este caso se incluye además el flujo a sección llena en la tubería 62 (salida de la batería de sumideros frente al edificio 200).



Figura 11. Comportamiento de la red para el escenario 2

Simulación de los Escenarios 3 y 4

La simulación de estos escenarios arrojó resultados similares a los que se han obtenido para los escenarios 1 y 2, se mantiene la inundación en los mismos registros y sumideros, así como las mismas tuberías trabajando a sección llena. La tendencia es al aumento de los caudales y el tiempo de inundación, lo cual es de esperar debido al aumento de la intensidad de la lluvia propuesta para estos escenarios.

Comparación de resultados

La tabla 2 resume los gastos picos que ocurren en el punto de disposición final para todos los escenarios mostrados. Es evidente que se mantiene el escenario # 3 como el más desfavorable.

Tabla 2. Resumen de gastos en la descarga

	Gasto pico (Lps)	T. Duración(min)
Escenario 1	1249,38	135
Escenario 2	1249,44	135
Escenario 3	1250,23	140
Escenario 4	1248,89	240

Del análisis de los resultados obtenidos con el modelo SSA se deducen las siguientes conclusiones sobre el comportamiento de la red:

1. Para todos los escenarios modelados, se produce inundación en nodos y canales y flujo a sección llena en tuberías, presentándose las condiciones más desfavorables en el escenario 3.
2. Los principales problemas de inundación se producen en la intercepción del canal principal con la tubería de 1000mm, estos resultados concuerdan con el comportamiento real de la red.
3. Se produce inundación en los canales que rodean el terreno de fútbol y en la zanja frente al edificio 100, en ambos casos producto de la poca capacidad de los mismos.

PROPUESTA DE SOLUCIONES PARA LA RED DE BECA

En base al análisis de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes soluciones, encaminadas primeramente a lograr la solución de la inundación frente al edificio 500 y en segundo lugar a resolver la situación en el terreno de fútbol y frente al edificio 100.

Soluciones propuestas para la inundación en el edificio 500

Se analizan tres variantes:

- Cambio de tubería de 1000 mm por dos del mismo diámetro en paralelo.
- Cambio de la tubería de 1000 mm por una de 1500 mm.
- Sustitución de la tubería de 1000 mm por alcantarilla rectangular de 1,50 m por 1,50 m.

La primera variante se descarta debido a que la capacidad de evacuación que se logra es menor que el gasto pico. A continuación, se hace un análisis de las otras variantes.

Colocación de conducto de 1500 mm de diámetro

Con esta solución se logra aumentar la capacidad del conducto de 1 439,70 L/s a 4 244,71 L/s, la cual es superior que el gasto pico de 3 443,4 L/s. Esto da además una capacidad adicional de 784,8 L/s los cuales brindan un margen de seguridad frente a los posibles problemas de tупición que se puedan presentar. Se logra que la relación tirante- diámetro de 0,90.

En la figura 12 se puede ver como la nueva sección es capaz de asumir el gasto pico que se produce en el nodo aguas arriba.

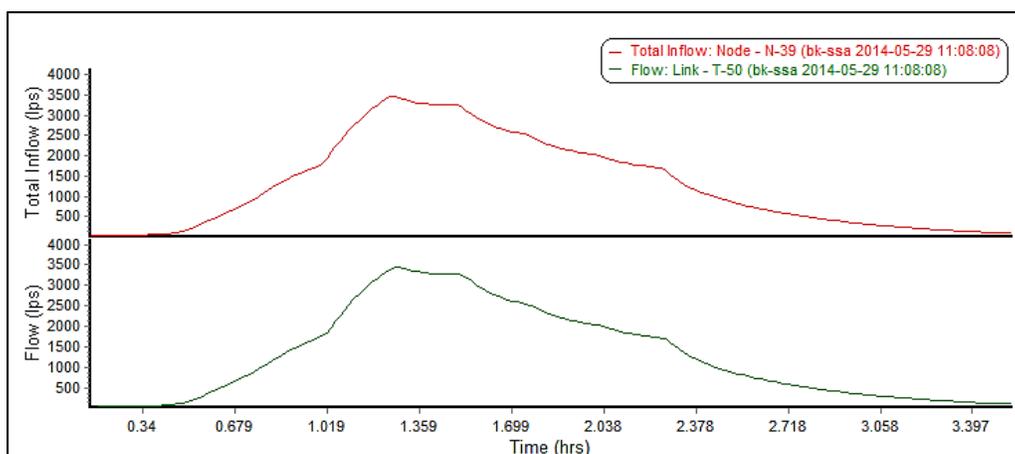


Figura 12. Gastos pico en el nodo aguas arriba y en el nuevo conducto

Colocación de cajones rectangulares de hormigón

Con la selección de un conducto de sección rectangular, se facilita el tránsito entre el canal y el propio conducto. El gasto de diseño para dicha sección (manteniendo la pendiente de fondo) es de 5 404,54 L/s, lo cual deja un margen de seguridad de 1 933,57 L/s frente a posibles tупiciones en el conducto. Con esta variante se elimina la inundación de manera satisfactoria, tiene la misma desventaja de la solución anterior, al requerir de excavación, movimiento de tierra y otros trabajos para la colocación de los cajones.

A manera de resumen se muestra la figura 13 con los perfiles transversales de ambas variantes, en la parte superior se muestra la primera variante y en la inferior la segunda. Se puede ver que los tirantes son menores en el conducto por cajones.

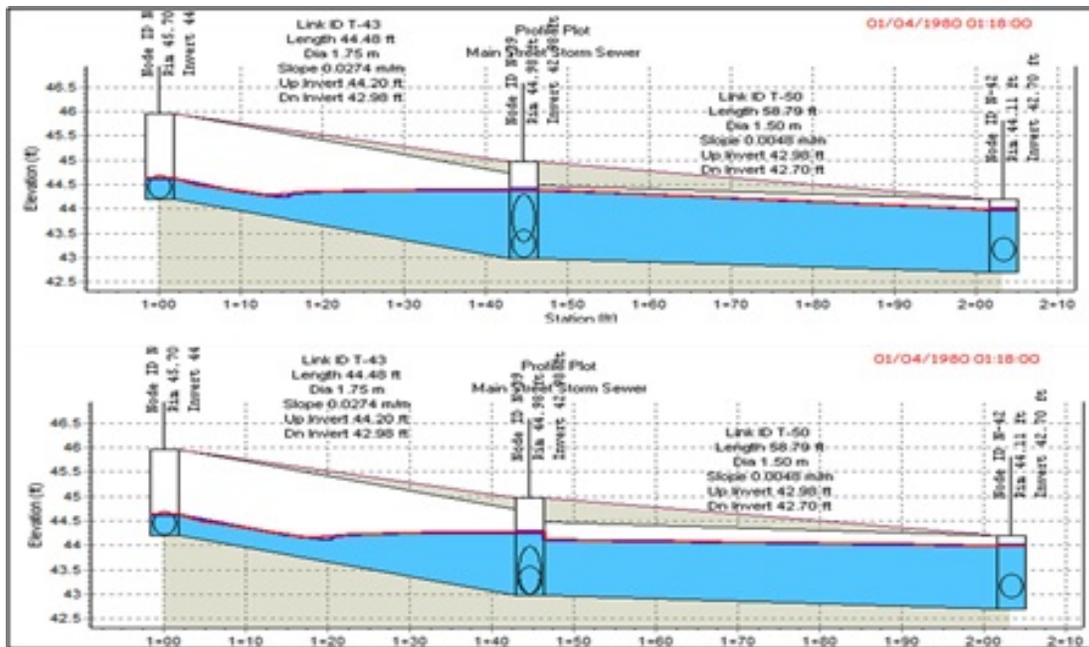


Figura 13. Comparación de tirantes para ambas variantes

Soluciones propuestas para las inundaciones en los canales.

Canales detrás del terreno de fútbol

Se propone la rectificación de esta zanja y la construcción de un canal de sección trapezoidal de 1,50 m de plato y 1,0 m de altura, con taludes a ambos lados de 1:0,5, dicho canal se mantendrá con esta sección hasta llegar al borde del terreno, desde este punto se propone subir la altura a 1,50 m y manteniendo el plato y los taludes hasta la intercepción con la tubería de descarga del canal del edificio 700, desde este punto hasta la entrada del conducto, se tendrá una altura de 2,0 m.

Canal frente al edificio 100

Se propone la rectificación de la zanja existente, cambiando la sección irregular de la misma, por una sección trapezoidal revestida con césped y taludes 1:2 en la zona aguas arriba y 1:1 para la zona aguas abajo.

En la figura 14 se muestra un perfil longitudinal de la zanja de beca, desde el terreno de futbol hasta el punto de descarga final, en la misma se aprecia que el nivel de agua en los conductos y canales nunca sobrepasa la altura de los mismos, por lo que no se producirá inundación

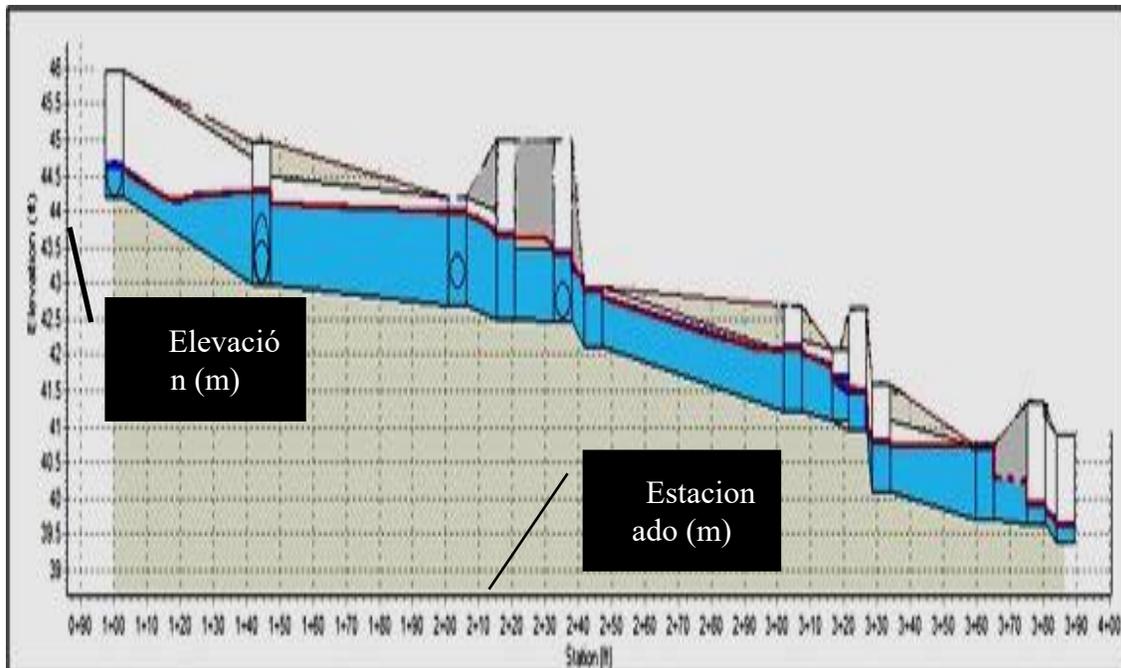


Figura 14. Perfil del canal de beca

CONCLUSIONES

Las modelaciones numéricas se han convertido en una potente herramienta de uso indispensable en los proyectos de construcción, evaluación, mantenimiento y explotación de las redes, tanto en sistemas de alcantarillado sanitario como drenaje pluvial.

Del análisis de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes conclusiones sobre el funcionamiento de la red de drenaje pluvial:

- Para todos los escenarios modelados, se produce inundación en nodos y canales y flujo a sección llena en tuberías.
- Los principales problemas de inundación se producen en la intercepción del canal principal con la tubería de 1000 mm (zona del edificio 500-A).
- Se produce inundación en los canales que rodean el terreno de fútbol y en la zanja frente al edificio 100, en ambos casos producto de la poca capacidad de los mismos.
- La situación presente en la red de la beca se debe fundamentalmente a problemas en el diseño de algunos elementos del sistema, situación que se ve agravada por el mal estado de la red y la falta de mantenimiento.

Se recomienda implementar las soluciones ingenieras propuestas para las redes de drenaje pluvial de la universidad, realizando para las mismas los análisis económicos pertinentes.

REFERENCIAS

- Autodesk SSA** (2013). (Autodesk Storm and Sanitary Analysis) “User’s Manual” 2013. ISBN 978-99974-60-00-4. USA.
- Concha R. y Gómez M.** (2009). “Una aproximación a la modelización del drenaje dual urbano mediante Epa SWMM 5.0”, Jornada de Ingeniería del agua 2009, pp 1654-166, ISBN 978-90-78046-09-7. Madrid, España.
- De Horta** (2018). “Simulación numéricas de las redes de alcantarillado y drenaje pluvial de la CUJAE. Soluciones propuestas”, Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones Hidráulicas. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- EPA** (2005). "User’s Manual, SWMM 5.0." E. Environmental Protection Agency. ISBN0-9683681-5-8. USA.
- López Y.** (2014). “Modelación del Sistema de Drenaje Pluvial del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.”, Trabajo de diploma, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Murcia A. y Gómez M.** (2011). “Estudio de la cuenca de La Riereta en Sant Boi de Llobregat mediante un modelo de drenaje dual utilizando SWMM 5.0”, Tesis de Maestría, Unibversitat politécnica de Cataluña, España.
- Sánchez L.** (2012). “Modelación integrada de sistemas de drenaje pluvial urbano en zonas predominantemente llanas”. Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Sañudo E. Cea L. and Puertas J.** (2020). “Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Model Iber and SWMM”. *Water*, 12(9), 2647. DOI: 10.3390/w12092647. EISSN 2073-4441, published by MDPI. Basel. Switzerland.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Patricia de Horta Brito

<https://orcid.org/0000-0001-6502-8205>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó el diseño de la investigación, desarrollos de los ensayos, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final.

Luis Fermín Córdova López

<https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó la interpretación de los datos, desarrollo de los ensayos y análisis de los resultados.