

Modelación hidrológica de la cuenca urbana del río Bélico en la ciudad de Santa Clara, Cuba

(Hydrological modeling of the urban basin of the Bélico river in the city of Santa Clara, Cuba)

Carlos Lázaro Castillo García¹, Víctor Manuel Carvajal González²

Resumen

Las inundaciones urbanas son un fenómeno asociado a grandes precipitaciones, relativamente, en cortos períodos de tiempo, las causas que las provocan son disímiles y generalmente vienen acompañadas por una deficiente planificación urbana. La ciudad de Santa Clara, Cuba presenta graves problemas de inundaciones cercanas a los ríos Bélico y Cubanicay debido a la disminución de la sección de sus cauces por indisciplinas urbanísticas. La presente contribución obtiene los valores del caudal máximo de escurrimiento para varias secciones de control ubicadas a lo largo de dichos ríos, usando para ello el modelo TR-55 (Technical Report 55) del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de Estados Unidos. Se realizan tres modelaciones asociadas a lluvias convectivas Tipo I, II, III agrupadas a los picos de las tormentas y su ubicación temporal, con lo cual se pueden definir los gastos máximos relacionados a tormentas de configuración diferentes para una probabilidad del 1 %, 2 % y 10 %. Los resultados obtenidos demuestran que la situación más crítica ocurre para la lluvia Tipo III y el valor máximo de escurrimiento para una probabilidad del 1 % en el punto de cierre de la cuenca es de 170 m³/s.

Palabras clave

Escorrentía, lluvia, inundaciones urbanas, modelación hidrológica, número de curva.

Abstract

Urban floods are a phenomenon associated with heavy rainfall in relatively short periods of time, the causes that cause them are dissimilar and are generally accompanied by poor urban planning that reduces hydraulic sections of rivers, streams, and any drainage channel. The city of Santa Clara in Cuba presents serious flooding problems near the Bélico and Cubanicay rivers due to the decrease in the section of their channels due to urban indiscipline. This contribution obtains the values of the maximum runoff flow for various control sections located along these rivers, using the TR-55 model (Technical Report 55) of the United States Natural Resources Conservation Service (NRCS), for its acronym in English, formerly named Soil Conservation Service). Three models associated with convective rains Type I, II, III associated with the peaks of the storms and their temporal location will be carried out, with which the maximum expenses associated with storms of different configuration can be defined for a probability of 1 %, 2 % and 10 %. The results obtained show that the most critical situation occurs for Type III rain and the maximum runoff value for a 1 % probability at the basin closure point is 170 m³/s.

Keywords

Rainfall; runoff; hydrological modeling; urban flooding; curve number.

1. Introducción

El constante aumento de la población y la acelerada urbanización de las ciudades incrementa el riesgo de inundaciones, que pueden ocasionar la pérdida de vidas humanas y daños a la propiedad (Hettiarachchi et al., 2019). Los problemas de planificación espacial se vuelven muy importantes para la proyección de los recursos hídricos, y los cálculos para obtener un equilibrio hi-

1 Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba [ccgarcia@uclv.cu, <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>].
2 Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba [vicarvajal@uclv.cu, <https://orcid.org/0000-0001-7533-5858>].

drológico urbano preciso aparecen como una de las disyuntivas más complejas de resolver para los ingenieros que se dedican al estudio de la hidrología urbana (Stella y Anagnostou, 2018).

Nardi et al. (2018), cita trabajos de Hollis (1975) y Leopold (1968) en los que explican que el impacto de la urbanización en la hidrología asociada a eventos máximos contiene una estrecha relación con el área impermeable y el intervalo de recurrencia de los mismos, demostrando además que el cambio de muchos parámetros hidrológicos está relacionado con el grado de urbanización de la cuenca. Las características de un hidrograma en este tipo de suelo suelen tener rasgos muy comunes como, una rama ascendente más empinada, cortos tiempos de concentración y base, aumento tanto del pico del gasto como del volumen de escorrentía, todos estos comparados con hidrogramas similares en cuencas rurales (Miller et al., 2021).

Según Boyd et al. (1993), citado en Schoener (2018), las superficies impermeables pueden ser divididas en dos categorías, las áreas impermeables directamente conectadas (DCIA, por sus siglas en inglés) que comprenden todas las superficies con una conexión directa al sistema de drenaje; y las áreas impermeables que drenan sobre superficies permeables, como por ejemplo, techos que drenan hacia patios o parcelas paisajísticas con alto grado de infiltración, son consideradas áreas impermeables desconectadas (UIA, por sus siglas en inglés). Esta clasificación es muy importante durante eventos lluviosos cortos puesto que muchas UIA pueden propagarse por superficies permeables e infiltrarse antes de llegar al sistema de drenaje. El propio Schoener (2018), citando a Lee y Heaney (2003) afirma que el 70 % del escurrimiento provocado por varios eventos lluviosos estudiados en el área residencial de Miami, provenían de DCIA.

La respuesta hidrológica de una cuenca es generalmente estimada usando un modelo hidrológico con un dato de entrada que por lo general es la lluvia. Según Wheeler et al. (2007), citado en Joshi et al. (2019), un modelo es una representación simplificada del mundo real. Los modelos hidrológicos (usualmente conocidos como modelos de lluvia-escorrentía) tienen una amplia gama de aplicabilidad que van desde el planeamiento y desarrollo de estructuras hidráulicas, defensas ante inundaciones, evaluación de la disponibilidad del agua, pronósticos climáticos y de cambio de usos del suelo y su impacto en la hidrología, estimación de flujo en cuencas no aforadas, entre otros (Deb y Kiem, 2020).

Usualmente la comunidad investigadora distingue tres tipos de modelos hidrológicos, conceptuales, físicos-basados y caja negra (Hu et al., 2018). Los modelos conceptuales, son aquellos que representan un sistema hecho por una composición de conceptos, que permiten estudiar, conocer, entender o simular un objeto que el mismo representa (Hu et al., 2018) (Fraga et al., 2019). Los modelos basados en las propiedades físicas de la cuenca son una pequeña o gran copia de las características físicas del objeto para el estudio de los procesos hidrológicos que ocurren dentro (Deb et al., 2019). Los modelos de caja negra son útiles cuando se conocen datos de entrada y algunos datos de salida que permitan calibrar el proceso sin adentrarse internamente en las complejidades del proceso hidrológico que ocurre internamente (Hu et al., 2018).

El método de Número de Curva del NRCS (NC-SCS) es ampliamente utilizado en aplicaciones de ingeniería de drenaje urbano desde 1975 (K. N, 2021) (Ross et al., 2018), desde que se expandió el método original a la aparición del TR-55 (Ormsbee et al., 2020). Según Mishra et al. (2018) la amplia aplicabilidad de los modelos asociados a la metodología NC-SCS puede ser atribuida a su sencillez, fácil uso, mayor producción de escorrentía en correspondencia con los usos del suelo y aceptación generalizada (Valle Junior et al., 2019).

Otro de los problemas comunes en la elaboración de un modelo de lluvia-escorrentía es el análisis del tiempo de concentración. Beven (2020) realiza un análisis de varias definiciones

aportadas por autores como Richards (1944), Chow (1964), Haan et al. (1994), Maidment (1993), Viessman y Lewis (1995), Musy y Higy (2004) donde se presenta que esta variable es el tiempo que demora la escorrentía superficial de una cuenca en atravesarla, desde su punto más alejado hasta su punto de cierre. Sin embargo, autores como Castillo et al. (2021) proponen con base en la Norma cubana 1239-2018 que se considere que el tiempo de concentración puede definirse a partir de la observación de la escorrentía superficial. Si se aplica una lluvia uniforme a una cuenca, las zonas más cercanas a la salida contribuyen a la escorrentía casi de inmediato. Mientras la lluvia continúa, los aportes de las zonas de aguas arriba llegan posteriormente, hasta que el flujo de todos los puntos de la cuenca se concentra en la zona baja. Por lo tanto, el tiempo de concentración se corresponde con la duración necesaria, con lluvia uniforme, para que el total de la cuenca contribuya a la escorrentía directa en el tramo final del cauce.

El estudio realizado por Castillo et al. (2021) considera fórmulas empíricas para la obtención del valor del tiempo de concentración en la Cuenca del río Bélico, sin embargo, un análisis más profundo evidencia de que las condiciones de la cuenca de estudio permite usar herramientas matemáticas más complejas para mejorar ese resultado son los casos de la utilización de las Ecuaciones de Saint Venant en 1D ya usadas por Roohi et al. (2020) en la estimación de las áreas de inundación del río Mehrian y Kader et al. (2020) en el análisis de inundaciones mediante una topografía controlada por ecuaciones.

A partir de los estudios e investigaciones realizadas en las últimas décadas y debido a la compleja situación de inundaciones que provoca la escorrentía, resultado de las intensas lluvias, de los ríos Bélico y Cubanicy en la ciudad de Santa Clara, Cuba este trabajo tiene como objetivos la obtención de los valores de caudal máximo de escurrimiento en varios puntos del cauce urbano de dichos ríos y comparar los resultados obtenidos con las aproximaciones empíricas iniciales obtenidas en Castillo et al. (2021). El estudio se elaborará con dos modelos de escorrentía, el Racional Modificado, que está normado en Cuba para cuencas pequeñas lo cual permitirá calibrar otro modelo, con la metodología del TR-55, para obtener los valores finales en una simulación con hietogramas para distintas probabilidades.

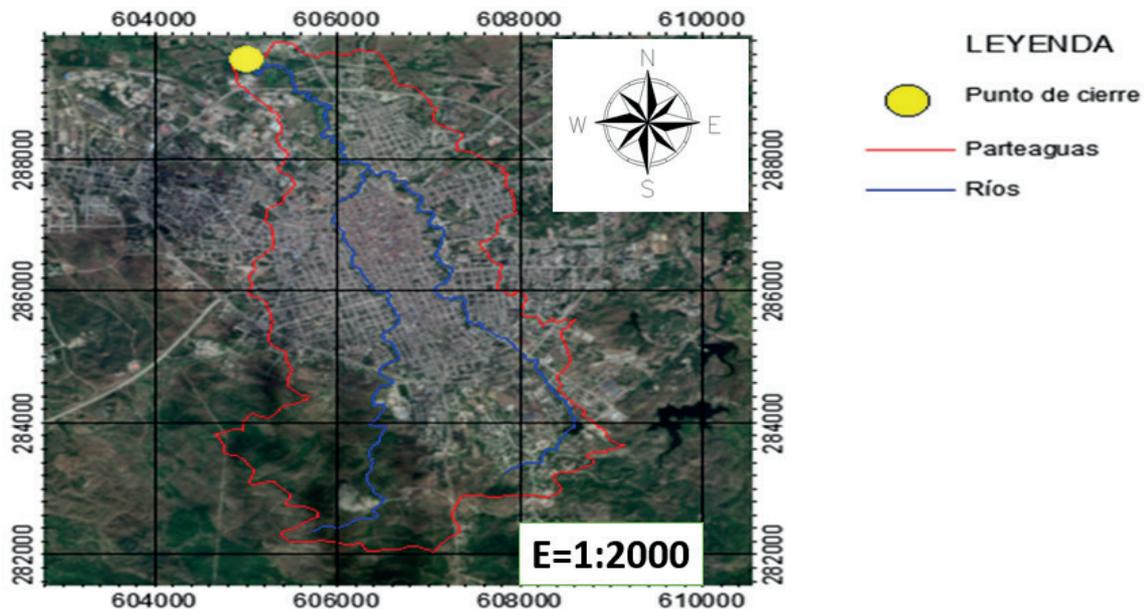
2. Materiales y métodos

La cuenca urbana del río Bélico es predominantemente llana, típica de la zona hidrológica central de Cuba y ha sido seleccionada como cuenca experimental dada su cercanía a la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, su ubicación en la ciudad de Santa Clara y a la situación actual del drenaje deficiente debido a las incorrectas políticas urbanísticas de la ciudad que han provocado la disminución de los cauces de los afluentes y ríos principales. El punto de cierre de la cuenca se define en la Circunvalación Norte, hasta este lugar la cuenca posee dos ríos o afluentes principales, el Bélico y el Cubanicy que nacen en las cercanías de la Circunvalación Sur y atraviesan el centro urbano de sur a norte como se observa en la figura 1.

Algunas de las características fundamentales de la cuenca con punto de cierre en Este: 604990 y N: 289575 de acuerdo al sistema de proyección NAD 27 Cuba Norte, del Sistema de Coordenadas Cónicas de Lambert, se presentan en la tabla 1.

A partir de la relevancia del factor Área de Aporte en la fórmula Racional; combinando la definición de microcuenca, de la cual es necesario tomar los parámetros fundamentales para la obtención de la lluvia de proyecto; además de la intervención del hombre con infraestructuras que cambian el curso del drenaje natural; surge el concepto de Área Hidrológica Urbana (AHU).

Figura 1. Cuenca de los ríos Bélico y Cubanicay de la ciudad de Santa Clara, Cuba



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Características generales de la cuenca

Característica	Unidad de Medida	Valor
Macrocuenca o Cuenca Principal	S/U	Cuenca Sagua La Grande
Cuenca	S/U	Río Bélico
Subcuenca	S/U	Río Bélico
Área de Drenaje Total	km ²	19,55
Longitud Total del Río	km	11,37
Cota máxima de la vaguada	m	205,1
Cota del punto de cierre	m	99,50
Pendiente del cauce principal	m/km	6,250
Tiempo de Concentración	min	120,0

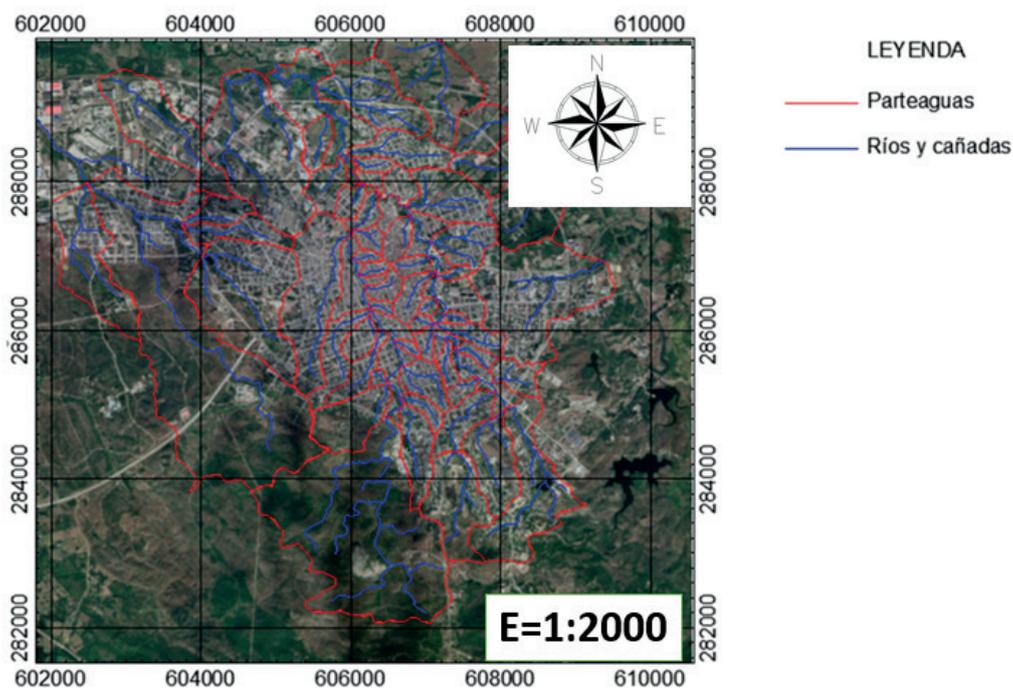
Fuente: Elaboración Propia.

Un Área Hidrológica Urbana es la adaptación del concepto de microcuenca en ambientes urbanos, se define como aquella área tributante a una vaguada principal cuyo vertimiento ocurre en el sistema fluvial primario de la cuenca o la subcuenca a la que pertenece. Se consideran AHU también a aquellas laderas de los sistemas fluviales sin presencia de vaguadas, ambas tipologías con una superficie superior a las 5 ha. La construcción del AHU tiene como premisas fundamentales que sus límites no dependen de los Consejos Populares ni de zonas específicas, su trazado se realiza a partir de la vaguada principal objeto de estudio y las obras lineales como

carreteras, autopistas y redes ferroviarias con presencia de drenajes, pueden ser consideradas límites de sectores dentro de una propia AHU.

La figura 2 muestra la discretización de la cuenca urbana del río Bético en AHU cada una con características propias relacionadas a su topología.

Figura 2. Límites de las Áreas Hidrológicas Urbanas y vaguadas tributantes a los sistemas fluviales Bético y Cubanicay



Fuente: Elaboración propia

El método racional es el más común y es utilizado por ingenieros para la obtención de los gastos máximos de escurrimiento en una cuenca urbana (Chin David, 2019). Según Dhakal et al. (2014) citados en Hasan et al. (2019) el método racional modificado ha sido aplicado para obtener valores picos de escorrentía en más de 1400 en 80 cuencas distintas en Texas.

El principio básico del método racional consiste en que el flujo máximo de escurrimiento ocurre cuando la duración de la lluvia se iguala al tiempo de concentración de la cuenca, el cual denota el tiempo que demora el flujo en moverse desde el punto más alejado de la cuenca al punto de cierre (Wang y Wang, 2018). El método computa el gasto máximo de escurrimiento de la siguiente forma:

$$Q = 16.67CIA \quad \text{Ec.1}$$

Donde Q es el caudal máximo de escurrimiento expresado en m³/s, C es el coeficiente adimensional de escurrimiento, I es la intensidad máxima para el tiempo de concentración de la cuenca en mm/min y A es el área de aporte en km² al punto de cierre.

El coeficiente C (y también el Número de Curva) se obtiene a partir de:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^k C_j A_j}{\sum_{j=1}^k A_j} \quad \text{Ec.2}$$

Mulvany (1853), citado en Campos et al. (2020) comprende el establecimiento de límites adecuados para su aplicabilidad, a pesar de haberse aplicado de forma empírica, obtiene resultados tolerablemente cercanos a la realidad en cuencas con características promedio, ni muy montañosa ni muy llana y con ciertos límites de extensión.

Otros investigadores, a través de los años han destinado esfuerzos para construir un marco conceptual más sólido a los principios iniciales del método y para extender su uso a aplicaciones que inicialmente no fueron estudiadas. Ponce (1989) citado en Campos (et al., 2020), por ejemplo, sugiere que el método racional es basado en los principios de concentración y difusión. En el caso de la concentración sin difusión, la precipitación uniforme sobre la cuenca con una duración igual al tiempo de concentración (tormenta de diseño) crea por lo general un triángulo isósceles o una forma trapezoidal (Método Racional Modificado) dependiendo este último del tiempo de duración de la tormenta.

Wang y Wang (2018) establecen las abstracciones iniciales del método:

1. El valor de la intensidad de la lluvia es constante en el tiempo de duración y se distribuye de manera idéntica sobre toda el área de la cuenca.
2. El área de aporte es uniforme en toda la cuenca.
3. El flujo en conductos es constante (para el gasto máximo), la velocidad está en entera disposición al tiempo de concentración.
4. La impermeabilidad de la cuenca es constante durante toda la tormenta de diseño.

Algunos componentes de sistemas de manejo de aguas pluviales requieren no solo el pico del caudal máximo, sino además el hidrógrafo de escorrentía. Entre estos componentes se encuentran las lagunas de retención o rompe-picos que reciben la escorrentía superficial de una zona urbana determinada (Chin David, 2019).

El modelo del Número de Curva del NRCS permite estimar el exceso de precipitación desde su desarrollo en los años 1950 (Karpthy Nicholas y Chin David, 2019). El modelo CN es basado en la siguiente ecuación:

$$Q_A = \begin{cases} 0 & \text{para } P \leq 0.2S \\ \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & \text{para } P > 0.2S \end{cases} \quad \text{Ec.3}$$

Donde Q_A es la profundidad de la escorrentía; P es la profundidad de la lluvia; y S es Máxima Retención Potencial. La ecuación 3 asume que la abstracción inicial es $0.2S$, aunque esta consideración está actualmente en revisión (Karpthy Nicholas y Chin David, 2019). La máxima retención potencial S es un parámetro abstracto que depende del tipo de suelo y uso del suelo en la cuenca. El CN se relaciona con S de la siguiente forma:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad \text{Ec.4}$$

Moglen et al. (2018) exponen la metodología del TR-55 para hallar el gasto máximo de escurrimiento:

$$Q_p = q_u A Q_p \quad \text{Ec.5}$$

Donde Q_p es el gasto máximo de escurrimiento en m^3/s , que es el pico de descarga unitaria en unidades de $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{cm})$ y A en km^2 .

El número de curva varía de acuerdo con el tipo de suelo y su uso por tanto en caso de cuencas urbanas se debe establecer las áreas residenciales, comerciales, industriales en cada cuenca o área hidrológica urbana (Yogi et al., 2021), incluso es un parámetro que puede variar regionalmente como lo demuestra (Lian et al., 2020) en un estudio con más de 600 eventos de lluvia escorrentía en China. La tabla 2 muestra la clasificación de los usos del suelo usadas en esta contribución.

Tabla 2. Grupo de suelo establecidos por Canholi (2014).

Grupo de suelo	Características
A	Arena y grava profunda ($h > 1.50$ m), muy permeable, con una alta tasa de infiltración, incluso cuando está saturada. Contenido de arcilla de hasta 10 %
B	Suelos arenosos, poco profundos ($h < 1.50$ m) y permeables. Contenido de arcilla entre 10 % y 20 %
C	Suelo poco profundo con capas subterráneas que impiden el flujo de agua hacia abajo. Arcilla contenida entre 20 % y 30 %
D	Suelo con nivel freático alto, con capas de arcilla cerca de la superficie, o suelos poco profundos sobre capas impermeables. Contenido de arcilla por encima del 30 %

Walega et al. (2020) y Poudel et al. (2020) utilizaron el modelo TR-55 para distintas cuencas experimentales, el primero en un estudio que abarcó tres cuencas de la región del sudeste de los Estados Unidos y el segundo en una cuenca del estado de Arizona, en ambos estudios se concluye con resultados individuales, que permiten al investigador corroborar la utilización del modelo distintas prestaciones. Yao et al. (2018) por su parte realizan un estudio muy detallado de la ciudad de Beijing en China, donde identifica mediante el uso de *software* GIS los usos del suelo con especial detalle. Mientras Hu et al. (2021) comparan los resultados obtenidos con la metodología de CN ante un modelo TVGM_Urban. Finalmente, y de manera subjetiva, como expresa Ballinas-González et al. (2020) la efectividad de un modelo hidrológico depende en muchas ocasiones de las habilidades del modelador de representar el fenómeno lo más adecuado a la realidad, con el alto grado de incertidumbre que esto conlleva.

Tormenta de diseño

La estación meteorológica Yabú (Código 78343) se encuentra en la provincia de Villa Clara, Cuba, localizada en los $22^\circ 26' \text{ N}$ y $79^\circ 59' \text{ W}$, a 116.44 m sobre el nivel medio del mar, con presencia de un relieve llano, a aproximadamente 7 km del centro de la ciudad de Santa Clara, su privilegiada posición en la misma permite tener un certero comportamiento de las variables climáticas que afectan el lugar Castillo (2022a), (Castillo (2022b). Para la obtención del valor de la intensidad promedio con la cual se elabora la tormenta de diseño, se utiliza la ecuación 6 luego de haber realizado un estudio de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en la estación con pluviogramas comprendidos desde los años 1990 hasta el 2019.

$$I = \frac{135.57^{0.1309}}{(D^{1.092} + 61.58)} \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

I: Intensidad de la precipitación media en mm/min (para 1 %=0.998, 5 %=0.809, 10 %=0.739)

T: Período de retorno en años

D: Duración de la tormenta en minutos (con la adopción del modelo racional y cumpliendo uno de sus principios D=120 min)

Las tormentas de diseño utilizadas en esta contribución se muestran en la tabla 3:

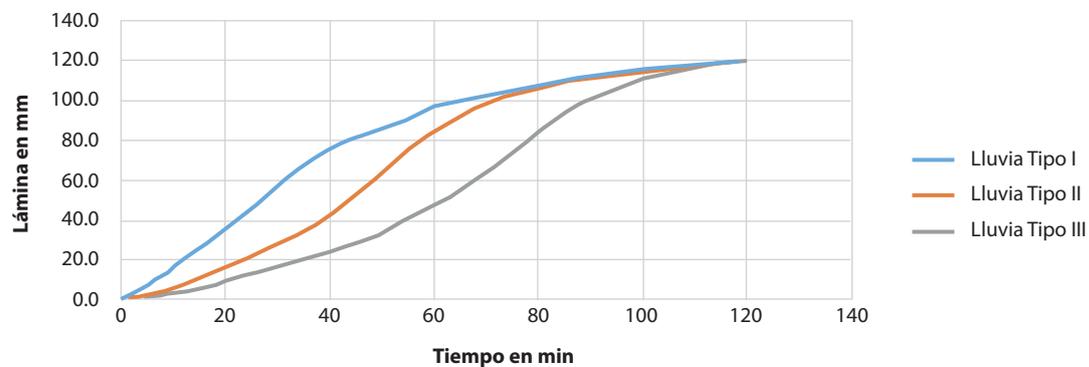
Tabla 3. Tormentas de diseño usadas en la modelación de la cuenca de estudio

Tipo	Lámina en mm	Duración en h	Período de Retorno en años	Intensidad máxima en mm/min	Tiempo donde ocurre la In. Máxima en h	Coefficiente de retardo de la tormenta (r)
Tipo I	121.2	2	100	4.95	0.17-0.25	0.10
Tipo I	110.4	2	50	4.52	0.17-0.25	0.10
Tipo I	88.80	2	10	3.63	0.17-0.25	0.10
Tipo II	121.2	2	100	1.92	0.75-0.83	0.40
Tipo II	110.4	2	50	1.75	0.75-0.83	0.40
Tipo II	88.80	2	10	1.42	0.75-0.83	0.40
Tipo III	121.2	2	100	2.08	1.67-1.75	0.85
Tipo III	110.4	2	50	1.90	1.67-1.75	0.85
Tipo III	88.80	2	10	1.52	1.67-1.75	0.85

Fuente: Elaboración propia

Las lluvias son distribuidas en el tiempo mediante la metodología de Huff (Castillo García, 2022b), la figura 3 muestra las curvas de masa acumulativas de las tormentas de Tipo I, II y III para una probabilidad del 1 %

Figura 3. Distribución temporal de las tormentas de diseño de 1 % para la modelación de la cuenca en estudio

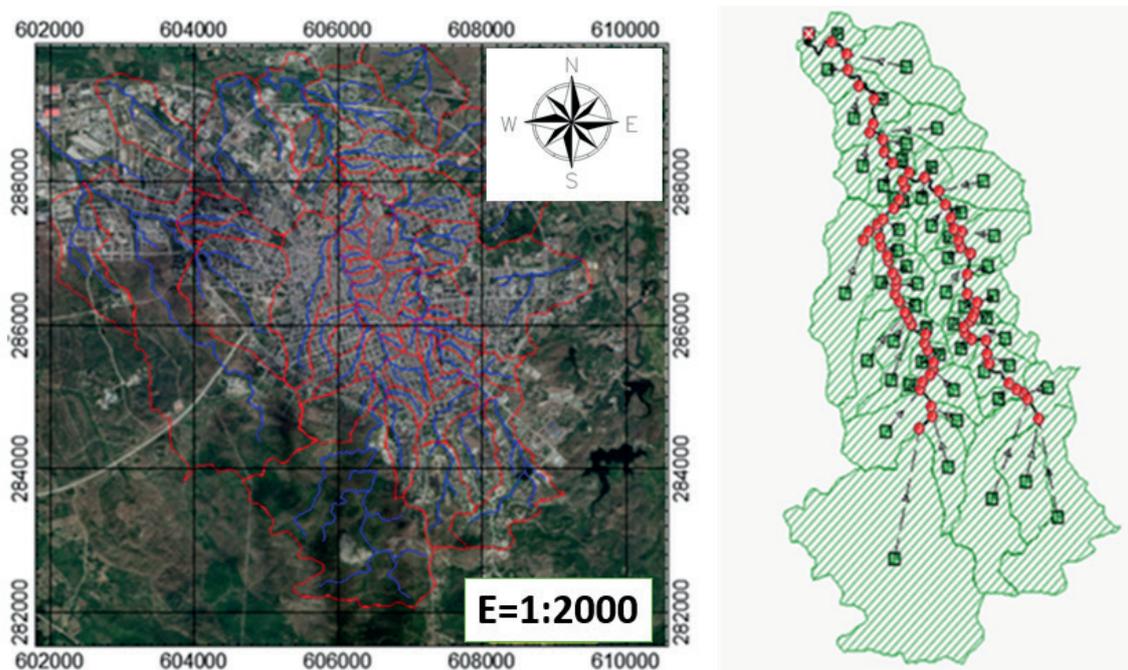


Fuente: Castillo García, 2022b

Modelación de la cuenca y el cauce

A partir de los datos obtenidos del procesamiento geoespacial de la base de datos cartográfica, el uso del concepto de Área Hidrológica Urbana y el trazado de las mismas, se realiza la modelación hidrológica de la cuenca mediante el *software* Storm Sanitary Analysis v2015 como se muestra en la figura 4, se conforman un total de 54 AHU que tributan a los cauces principales de la cuenca, de ellas solo 6 son laderas sin cauces. Cada una de estas áreas hidrológicas tienen características propias inherentes a su cauce hasta los vertimientos en el río y tienen parámetros hidrológicos distintos. Si bien el tiempo de concentración obtenido en Castillo (2021) es una aproximación empírica de acuerdo a los parámetros característicos del río principal, es de esperar que los resultados obtenidos en este trabajo difieran puesto que en esta oportunidad se discretiza la cuenca total en unidades mucho más pequeñas.

Figura 4. Discretización del modelo de escorrentía en Áreas Hidrológicas Urbanas mediante software GIS y Storm Sanitary Analysis



Fuente: Elaboración propia

El cálculo del tiempo de concentración de cada AHU se realiza por la formulación de la FAA ecuación 7, el cual tiene en cuenta parámetros como longitud del cauce, pendiente media y el Coeficiente C de Escurrimiento (Fórmula Racional), el 70 % del área de la cuenca es urbanizada y presenta una alta impermeabilidad, por tanto, esta formulación permite considerar el efecto del grado de impermeabilización en el cauce de cada cañada tributante a los ríos Bélico y Cubanicay. La tabla 4 muestra un resumen de las AHU con mayor área de la cuenca.

$$0.3788(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.332}$$

Ec.7

Tabla 4. Resumen de las características hidrológicas de las Áreas hidrológicas Urbanas con mayor tamaño

Elemento	Descripción	Área	Pendiente	Longitud	C	Tiempo
		(ha)	(%)	(m)		(hh:mm:ss)
AHU-ZC.VB:01	Nacimiento del Bélico	423.26	1.5600	3 974.83	0.41	01:51:40
AHU-ZC.VC:01	Nacimiento del río Cubanicay	134.53	1.6100	2 701.30	0.46	01:32:33
AHU-ZC.VC:03	Sakenaff Zona Hospitalaria	130.12	5.6500	2 681.04	0.65	00:42:40
AHU-ZW.VB:08	Condado-Calle Real	128.95	1.2800	2 325.82	0.72	00:55:01
AHU-ZE.VB:05	Libertad-Guamajal	87.77	1.5000	1 603.24	0.55	01:02:43
AHU-ZW.VB:01	Lacteo	65.78	2.6700	1 386.07	0.42	00:59:31
AHU-ZC.VC:02	Escuela de Medicina	65.49	2.0900	1 657.52	0.50	01:02:18
AHU-ZE.VC:09	Taller de Locomotoras	62.47	1.0100	1 085.10	0.62	00:51:22

Fuente: Elaboración propia

Tanto los coeficientes C de escurrimiento como el Número de Curva escogido para la cuenca se obtienen a partir del análisis de la superficie del terreno y utilizando las tablas y recomendaciones de la NC 1239-2018 y del Reporte Técnico 55 del SCS en correspondencia a un tipo de suelo C con un valor de impermeabilidad medio-alto debido a la presencia en la ciudad de afloraciones de roca serpentina impermeable, la tabla 5 resume estas consideraciones.

Tabla 5. Coeficientes de escurrimiento y Número de Curva asociados a áreas urbanizadas

Tipo de Desarrollo	C	CN	Imagen Típica
Zonas completamente urbanizadas con calles asfaltadas y sin presencia de vegetación	0.7-0.9	85-99	
Zonas urbanizadas con calles sin asfaltar y con presencia de vegetación	0.5-0.7	75-85	
Zonas no urbanizadas con presencia abundante de vegetación	0.3-0.5	60-75	

Fuente: Elaboración propia a partir de recopilación de autores.

La modelación de los cauces principales, dígase los ríos Bélico y Cubanicay debe cumplir varias pautas que simplifiquen la complejidad del mismo, las características reales del cauce parten de una urbanización que ha reducido las secciones de inundación de los mismos a límites en algunos casos alarmantes, la presencia de sólidos y escombros devenidos de la indisciplina y la falta de control de las autoridades, la presencia de obras de cruce sobre los mismos, en muchos casos reducidas por la acumulación de sedimentos. Debido a la dificultad de poder representar todos los fenómenos que afectan el tránsito de la avenida en este modelo hidrológico y respondiendo también a un objetivo que es encontrar los gastos máximos e hidrogramas de avenida en varios puntos del cauce dentro de la ciudad para en próximas investigaciones profundizar en el tránsito de la misma sobre el cauce, los autores proponen:

1. La modelación se realizará para un período de 10 horas con la entrada de la lluvia de 2 horas de duración y con la lámina especificada.
2. Se considera al cauce con una geometría trapezoidal con una sección variable pero que siempre será capaz de transportar el pico de la avenida, esta suposición, aunque realmente no se cumple, permite conocer cuál sería el hidrograma de entrada a un tramo y su correspondiente tránsito sin considerar efectos de arrastre de sedimentos, acumulación en obras de cruce, taponamientos del cauce y otros fenómenos que deben ser investigados posteriormente.
3. El coeficiente de rugosidad n de Manning para todos los tramos será de 0.04, también es una simplificación no real, pero que permite concentrar el tránsito en un valor medio en todo el río.
4. Los resultados obtenidos de esta modelación no pueden ser utilizados hasta que no se hayan comprobado los efectos de todas las variables limitantes expuestas con anterioridad, sin embargo, si son la entrada a modelos de tránsito de avenidas como HEC-RAS o Iber.

Bajo estas suposiciones podemos considerar que los resultados obtenidos en esta investigación solo tienen en cuenta la morfología de las Áreas Hidrológicas y sus tiempos de respuesta, no así el caso del tránsito de la avenida a las cuales se le aplicará condiciones controladas que reduzcan la complejidad del problema y permitan obtener hidrogramas en distintos puntos para realizar modelaciones hidráulicas y de esta forma obtener realmente el comportamiento del sistema fluvial.

3. Resultados y discusión

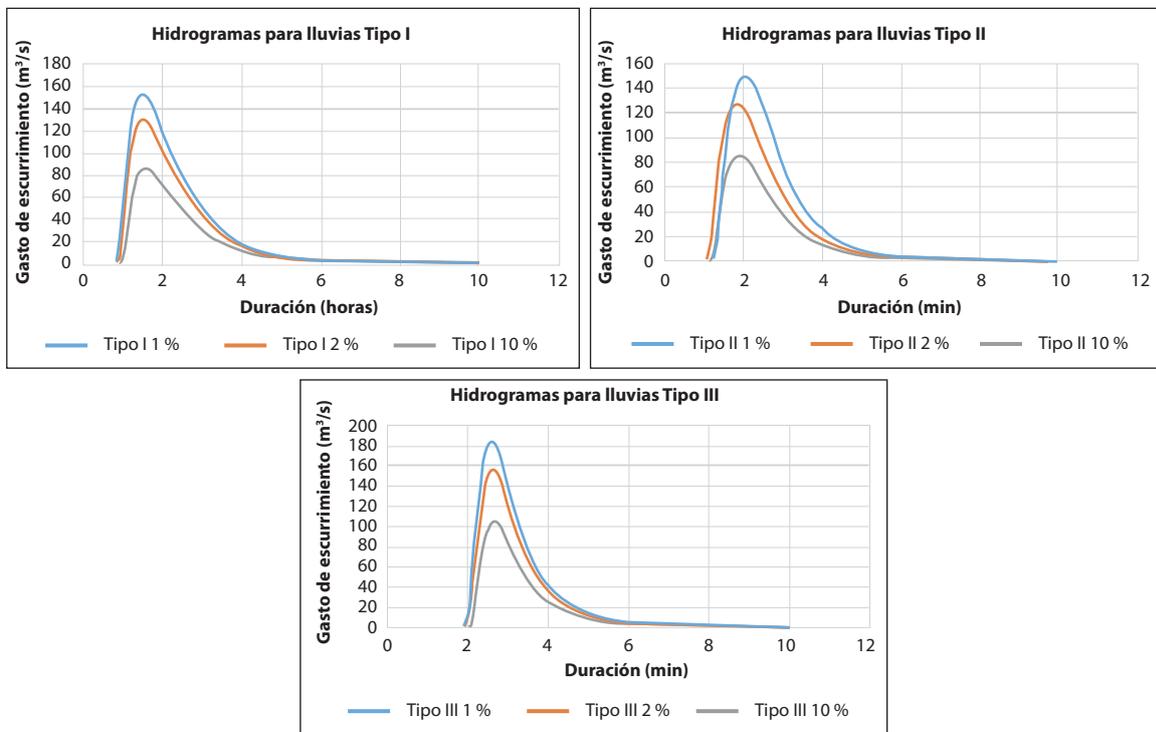
Para la simplificación de los resultados obtenidos la tabla 6 muestra los puntos de cierre que son analizados en esta contribución, destacar que algunos de ellos como el Puente de la Cruz (PC-17) y la unión de los ríos Bélico y Cubanicay son lugares considerados como Puntos Críticos debido a las inundaciones recurrentes en la zona.

Tabla 6. Puntos de cierre donde se obtienen los hidrogramas de diseño

Nombre del Punto	Descripción	Coordenada X	Coordenada Y	Río
PC-22	Puente del río Bélico en Circunvalación Sur	606483.69	284833.69	Bélico
PC-03	Puente sobre la doble Vía del Hospital Nuevo	607778.65	285304.49	Cubanicay
PC-38	Puente de la Calle Marta Abreu	606077.47	286826.05	Bélico
PC-17	Puente de la Cruz	606955.03	287204.40	Cubanicay
PC-21	Unión de los ríos Bélico y Cubanicay	606353.29	287876.83	Bélico
PC-49	Puente Peatonal de la antigua Planta de Tratamiento	605876.76	288451.40	Bélico
PV	Punto de cierre de la Cuenca	604990.20	289575.35	Bélico

Fuente: Elaboración propia

El PV o punto de cierre de la cuenca en general, se localiza a las afueras del perímetro urbano de la ciudad, la figura 5 muestra los hidrogramas resultantes para las distintas probabilidades de diseño obtenidos a partir de la modelación con Storm Sanitary Analysis.

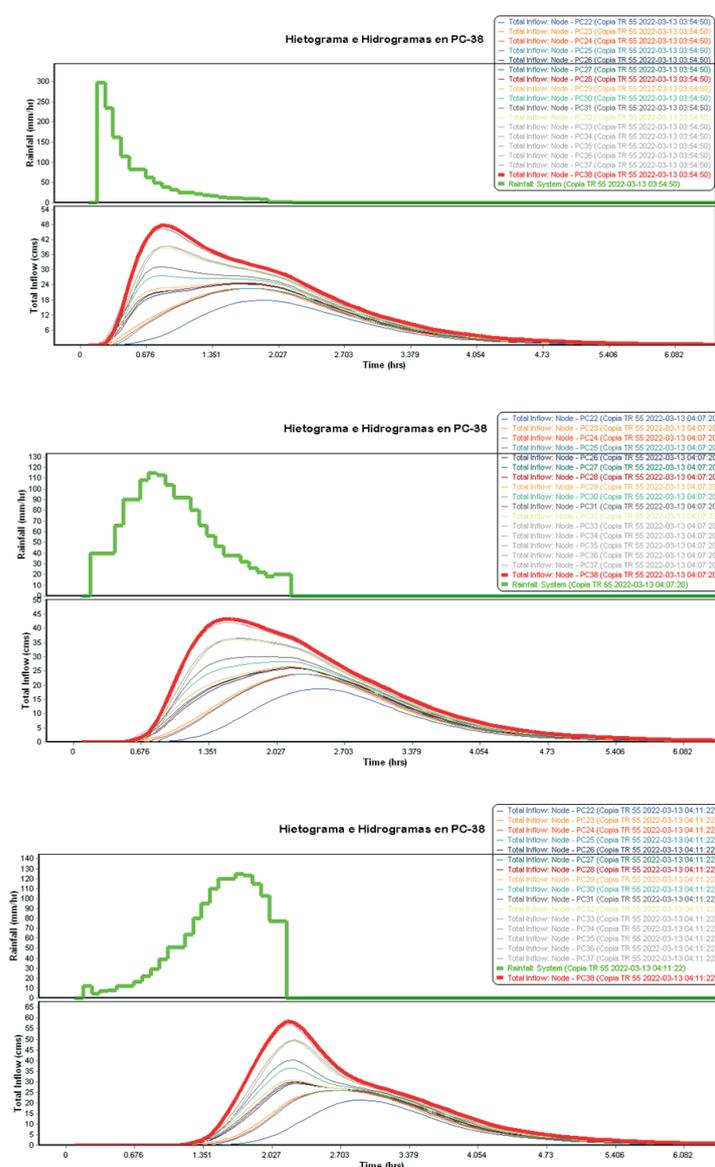
Figura 5. Hidrogramas resultantes para los distintos tipos de lluvia y probabilidad de diseño

Fuente: Elaboración Propia

El resultado del análisis de la figura 5 demuestra que las lluvias Tipo I y Tipo II no tienen grandes diferencias en sus hidrogramas, solo las asociadas al desfase del tiempo al pico generado por un coeficiente r mayor, sin embargo, si se aprecia una notable diferencia en el pico entre las lluvias Tipo I y II con respecto a la Tipo III del orden de los $20 \text{ m}^3/\text{s}$, esta diferencia puede deberse a varios factores, sobre todos factores físicos de la propia cuenca y sus áreas hidrológicas. Esta conclusión permite inferir que para lluvias donde el pico del aguacero se produzca en su etapa final la reacción de la cuenca y su sistema fluvial provoca un mayor gasto de escurrimiento, lo cual la convierte para una probabilidad determinada en la lluvia más peligrosa.

La figura 6 propone una comparación entre los hidrogramas obtenidos en el PC 18 para las lluvias de Tipo I, II y III con una probabilidad del 1 %.

Figura 6. Hidrogramas resultantes del PC-38 para 1% de probabilidad de diseño



Fuente: Elaboración Propia mediante Storm Sanitary Analysis

En el análisis hidrológico y las aplicaciones relevantes (por ejemplo, en la operación de alerta temprana de inundaciones), el tiempo de retardo juega un papel importante en el proceso hidrológico (Wu, 2016).

Wu (2016) cita a Hall (1984) quien realizó un resumen de siete definiciones del tiempo de retardo basado en la diferencia de tiempo entre la lluvia y el escurrimiento de eventos. En general, el tiempo de retardo se define como la diferencia de tiempo entre los centroides de los períodos efectivos de una precipitación específica derivada de un hietograma y el momento en el que ocurre la descarga máxima.

La tabla 7 muestra los resultados de los tiempos de concentración para la ciudad de Santa Clara, utilizando los distintos métodos de empíricos. Se puede observar que las estimaciones del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí ya que cada autor estima su ecuación para cuencas con características muy peculiares. Castillo et. al (2021)

Tabla 7. Tiempos de concentración obtenidos en Castillo et. al (2021)

Método	Tiempo en (min)
Kirpich-Pensylvania	37.98
Carter	52.52
Kerby-Hathaway	73.39
FAA	124.27
Kirpich-Tennessee	125.33
California	127.54
Cuerpo de Ingenieros	133.61
Chow	171.29
Bransby-Williams	218.85
SCS Lag	350.94

Utilizando los métodos de Hall (1984) citados en Wu (2016) se obtienen los tiempos de retardo modelados en la cuenca para los distintos tipos de lluvias y distintas probabilidades, la tabla 8 muestra los resultados obtenidos con la ayuda de software CAD.

Tabla 8. Obtención de los tiempos de retardo del modelo TR-55 para el punto de cierre de la cuenca

t-lag(h)	1%			2%			10%		
	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III	Tipo-I	Tipo-II	Tipo-III
t-lag 1	1.56	2.14	2.58	1.60	2.16	2.61	1.67	2.23	2.66
t-lag 4	1.43	1.43	1.09	1.47	1.45	1.11	1.55	1.52	1.17
t-lag 5	1.25	1.85	2.40	1.26	1.93	2.41	1.35	1.94	2.50
t-lag 6	1.08	1.51	1.75	1.10	1.37	1.50	1.10	1.59	1.67
t-lag 7	1.12	1.13	0.91	1.13	1.22	0.92	1.22	1.22	1.00

Fuente: Elaboración Propia.

Los tiempos de la tabla 8 son menores que los hallados por Castillo et. al (2021) por lo general. El tiempo de retardo en las formulaciones 1, 5 y 6 es directamente proporcional al coeficiente de retardo de la lluvia (tiempo al pico de la lluvia/tiempo total de la lluvia). En caso de las formulaciones 4 y 7 se aprecia como la lluvia tipo III presenta una disminución del tiempo de retardo, siendo esta la de mayor pico de descarga. Se logró comprobar que el tiempo de retardo en el modelo TR 55 no está influenciados drásticamente por ninguna de las probabilidades de ocurrencia valoradas.

4. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la modelación hidrológica en la cuenca los autores arriban a las siguientes conclusiones.

- Las lluvias utilizadas son representativas de toda la cuenca de 20 km² aproximadamente, lo cual, aunque es una hipótesis conservadora, permite obtener un valor de escurrimiento crítico para la probabilidad deseada.
- Se obtuvieron los valores de gasto máximo de escurrimiento para los distintos puntos de control, distintos tipos de lluvia y diferentes probabilidades, dando como resultado que la lluvia de Tipo III es que más gasto pico provoca.
- Una comparación de los tiempos de concentración sin considerar el tránsito interrumpido de la avenida por obras antropogénicas, da como resultado que los valores oscilen entre la 1 h y 3 h correspondientes con los resultados obtenidos en otras contribuciones.
- El gasto máximo e hidrogramas de diseño obtenidos en este trabajo no pueden ser usados para la elaboración de planos de inundación sin antes transitarlos por el río.

Bibliografía

- Ballinas-González, H. A., Alcocer-Yamanaka, V. H., Canto-Rios, J. J. y Simuta-Champo, R. (2020). Sensitivity Analysis of the Rainfall-Runoff Modeling Parameters in Data-Scarce Urban Catchment. *Hydrology*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/hydrology7040073>
- Beven, K. J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24(5), 2655-2670. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2655-2020>
- Campos, J. N. B., Studart, T. M., Souza Filho, F. D. y Porto, V. C. (2020). On the Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves, Partial-Area Effect and the Rational Method: Theory and the Engineering Practice. *Water*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102730>
- Castillo, C., Abreu Franco, D. E. y Álvarez González, M. (2021). Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara. *Enfoque UTE*, 12, 51-64. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.729>
- Castillo, C., Domínguez, I. y Martínez, Y. (2022). Modelos paramétricos de distribución temporal de precipitaciones en la estación meteorológica Yabú de la provincia Villa Clara, Cuba. *Tecnologías y Ciencias del Agua*. Preprint. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-4-4>
- Castillo, C., Domínguez, I., Martínez, Y. y Abreu, D. (2022). Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para la ciudad de Santa Clara, Cuba. *Tecnologías y Ciencias del Agua*. Preprint. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-1-9>
- Chin David, A. (2019). Estimating Peak Runoff Rates Using the Rational Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(6), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001387)

- Deb, P., y Kiem, A. S. (2020). Evaluation of rainfall–runoff model performance under non-stationary hydro-climatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1667-1684. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1754420>
- Deb, P., Kiem, A. S. y Willgoose, G. (2019). A linked surface water-groundwater modelling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 575, 273-291. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.039>
- Fraga, I., Cea, L. y Puertas, J. (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall–runoff models. *Hydrological Processes*, 33(1), 160-173. <https://doi.org/10.1002/hyp.13319>
- Hasan, H. H., Mohd Razali, S. F., Ahmad Zaki, A. Z. y Mohamad Hamzah, F. (2019). Integrated Hydrological-Hydraulic Model for Flood Simulation in Tropical Urban Catchment. *Sustainability*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236700>
- Hettiarachchi, S., Wasko, C. y Sharma, A. (2019). Can antecedent moisture conditions modulate the increase in flood risk due to climate change in urban catchments? *Journal of Hydrology*, 571, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.039>
- Hu, C., Wu, Q., Li, H., Jian, S., Li, N. y Lou, Z. (2018). Deep Learning with a Long Short-Term Memory Networks Approach for Rainfall-Runoff Simulation. *Water*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/w10111543>
- Hu, C., Xia, J., She, D., Song, Z., Zhang, Y. y Hong, S. (2021). A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation. *Journal of Hydrology*, 603, 126833. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126833>
- Joshi, N., Bista, A., Pokhrel, I., Kalra, A., y Ahmad, S. Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. *World Environmental and Water Resources Congress 2019*, 348-360. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784482339.035>
- K. N, V. (2021). "Runoff assessment by Storm water management model (SWMM)- A new approach". *Journal of Applied and Natural Science*, 13(SI), 142-148. <https://doi.org/10.31018/jans.v13iSI.281>
- Kader, M. Y. A., Bad, R. y Saley, B. (2020). Study of the 1D Saint-Venant Equations and Application to the Simulation of a Flood Problem. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 8(7), 14. <https://doi.org/10.4236/jamp.2020.87090>
- Karpathy Nicholas, S., y Chin David, A. (2019). Relationship between Curve Number and ϕ -Index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(11), 06019009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001426)
- Lian, H., Yen, H., Huang, J.-C., Feng, Q., Qin, L., Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, A. X., Luo, J., Di, H., Lei, Q. y Liu, H. (2020). CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 177, 115767. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>
- Miller, A. J., Welty, C., Duncan, J. M., Baeck, M. L. y Smith, J. A. (2021). Assessing urban rainfall-runoff response to stormwater management extent. *Hydrological Processes*, 35(7). <https://doi.org/10.1002/hyp.14287>
- Mishra, S.K., Singh, V.P. y Singh, P.K. (2018). Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method. En Singh, V., Yadav, S., Yadava, R. (eds) *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, 81. Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- Moglen, G. E., McCuen, R. H., y Moglen, R. L. (2018). Consequences of Changes to the NRCS Rainfall-Runoff Relations on Hydrologic Design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(8), 04018032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001681](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001681)
- Nardi, F., Annis, A., y Biscarini, C. (2018). On the impact of urbanization on flood hydrology of small ungauged basins: the case study of the Tiber river tributary network within the city of Rome. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S594-S603. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12186>
- Ormsbee, L., Hoagland, S. y Peterson, K. (2020). Limitations of TR-55 Curve Numbers for Urban Development Applications: Critical Review and Potential Strategies for Moving Forward. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(4), 02520001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001885](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001885)

- Poudel, U., Ahmad, S. y Stephen, H. (2020). Impact of Urbanization on Runoff and Infiltration in Walnut Gulch Experimental Watershed. *Watershed Management* 2020, 219-232. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784483060.020>
- Roohi, M., Soleymani, K., Salimi, M. y Heidari, M. (2020). Numerical evaluation of the general flow hydraulics and estimation of the river plain by solving the Saint-Venant equation. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 645-658. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00718-9>
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W. y Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*, 5(1), 180091. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>
- Schoener, G. (2018). Urban Runoff in the U.S. Southwest: Importance of Impervious Surfaces for Small-Storm Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(2), 05017033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001610)
- Stella, J. M., y Anagnostou, E. N. (2018). Modeling the flood response for a sub-tropical urban basin in south Florida. *Tecnología y ciencias del agua*, 9, 128-141. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-05>
- Valle Junior, L. C. G. D., Rodrigues, D. B. B. y Oliveira, P. T. S. D. (2019). Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. *RBRH*, 24(0). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>
- Walega, A., Amatya, D. M., Caldwell, P., Marion, D. y Panda, S. (2020). Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100645>
- Wang, S., y Wang, H. (2018). Extending the Rational Method for assessing and developing sustainable urban drainage systems. *Water Research*, 144, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.022>
- Wu, S.-J., Yeh, K.-C., Ho, C.-H. y Yang, S.-H. (2016). Modeling probabilistic lag time equation in a watershed based on uncertainties in rainfall, hydraulic and geographical factors. *Hydrology Research*, 47(6), 1116-1141. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.134>
- Yao, L., Wei, W., Yu, Y., Xiao, J. y Chen, L. (2018). Rainfall-runoff risk characteristics of urban function zones in Beijing using the SCS-CN model. *Journal of Geographical Sciences*, 28(5), 656-668. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1497-6>
- Yogi, F., Correa, C. J. P., Arruda, E. M. y Tonello, K. C. (2021). Sensitivity analysis of rainfall-runoff parameters models to estimate flows. *Applied Water Science*, 11(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01348-3>