# Estimation of Hydrological Parameters by means of Geographic Cells to Support Urban and Regional Planning in Puerto Rico

María F. Hernández Pomales[1]; Christian A. Villalta Calderón, PhD[2]; Gustavo E. Pacheco-Crosseti, PhD[3]
[1,2,3]Polytechnic University of Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, hernandez_135706@students.pupr.edu, CVillalta@pupr.edu, GPacheco@pupr.edu

***Abstract*– Conventional hydrologic-hydraulic studies require the detailed delineation and characterization of watersheds, which can hinder their application during the initial stages of land-use planning. This research evaluates the feasibility of a methodology for analyzing hydrologic parameters in Puerto Rico, based on a grid of independent geographic cells of approximately 69 acres each. Using QGIS and VBA-developed subroutines, the following were calculated for each cell: the curve number, direct runoff associated with a 100-year, 24-hour event, time of concentration, and a peak flow indicator. When comparing aggregated results for ten watersheds with contrasting characteristics against values obtained via conventional procedures and HEC-HMS models, the curve number showed errors of less than 1%, whereas direct runoff showed errors of up to 15.40%. These results support the estimation of curve numbers and direct runoff on a per-cell basis to generate hydrologic information that assists preliminary urban and regional planning processes in Puerto Rico. In contrast, the aggregated values for time of concentration and peak flow indicators calculated for independent cells showed considerable differences compared to those obtained through conventional watershed analysis procedures, as these parameters depend on flow connectivity, translation, and accumulation. Consequently, the methodology serves as a proof of concept for developing hydrologic parameters to support land-use screening, the comparison of siting alternatives, and study prioritization during early-stage planning; however, it does not replace the hydrologic-hydraulic studies required for design or permitting purposes.***

***Keywords*– Spatial decision support, territorial planning, hydrological indicators, geographic information systems**

# Estimación de Parámetros Hidrológicos Mediante Celdas Geográficas para Apoyar la Planificación Urbana y Regional en Puerto Rico

María F. Hernández Pomales[1]; Christian A. Villalta Calderón, PhD[2]; Gustavo E. Pacheco-Crosseti, PhD[3]
[1,2,3]Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, hernandez_135706@students.pupr.edu, CVillalta@pupr.edu, GPacheco@pupr.edu

***Resumen–*** ***Los estudios hidrológico-hidráulicos convencionales requieren la delimitación y caracterización detallada de cuencas, lo que puede dificultar su aplicación durante las etapas iniciales de la planificación territorial. Esta investigación evalúa la viabilidad de una metodología para el análisis de parámetros hidrológicos en Puerto Rico, basada en una cuadrícula de celdas geográficas independientes de aproximadamente 69 acres por unidad. Mediante QGIS y subrutinas desarrolladas en VBA, se calcularon, para cada celda, el número de curva, la escorrentía directa asociada a un evento de 100 años y 24 horas, el tiempo de concentración y un indicador de caudal pico. Al comparar los resultados agregados para diez cuencas con características contrastantes con los valores obtenidos mediante procedimientos convencionales y modelos en HEC-HMS, el número de curva presentó errores menores del 1%, mientras que la escorrentía directa mostró errores de hasta 15.40%. Estos resultados apoyan la estimación del número de curva y la escorrentía directa por celda para obtener información hidrológica que asista los procesos preliminares de planificación urbana y regional en Puerto Rico. En contraste, los valores agregados de tiempo de concentración y de los indicadores de caudal pico calculados para celdas independientes presentaron diferencias considerables respecto a los obtenidos mediante los procedimientos convencionales de análisis de cuencas, debido a que estos parámetros dependen de la conectividad, la traslación y la acumulación del flujo. En consecuencia, la metodología constituye una prueba de concepto para desarrollar parámetros hidrológicos que apoyen los procesos de screening territorial, comparación de alternativas de localización y priorización de estudios durante la planificación temprana, pero no sustituye los estudios hidrológico-hidráulicos requeridos para diseño o permisos.***

***Palabras clave–*** ***Apoyo a la toma de decisiones espaciales, planificación territorial, indicadores hidrológicos, sistemas de información geográfica***

## I. Introducción

En el contexto legal y técnico de Puerto Rico, la elaboración de los estudios hidrológico-hidráulicos (H-H) está regida por las *Guías para la elaboración de Estudios Hidrológico-Hidráulicos* del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA) [1]. Esta guía adopta la cuenca hidrográfica como unidad de análisis fundamental. Si bien este enfoque constituye el estándar para el diseño final de ingeniería, el nivel de detalle que requiere puede dificultar su aplicación durante las etapas iniciales de la planificación territorial. En consecuencia, existe la necesidad de contar con herramientas que permitan realizar una evaluación hidrológica preliminar (screening) del territorio para apoyar procesos de planificación urbana y regional en Puerto Rico.

Con este propósito, el objetivo de esta investigación es evaluar la viabilidad de utilizar celdas geográficas de aproximadamente 69 acres por unidad (Fig. 1) para estimar parámetros hidrológicos preliminares y determinar su utilidad como fuente de información espacial para procesos de planificación. La metodología propuesta consideró cada celda como una unidad de análisis independiente para la cual se adaptaron metodologías hidrológicas convencionales, incluyendo el método de número de curva [2], el método de retardo [3] y el método racional [4],[5]. La comparación con procedimientos convencionales se realizó como referencia para evaluar la coherencia de los parámetros a escala de celda, no para determinar si los valores por celda pueden reemplazar los resultados de estudios H-H. De esta manera, la metodología busca generar una representación espacial uniforme que facilite la identificación preliminar de sectores con diferentes características hidrológicas y apoye la priorización de análisis posteriores.

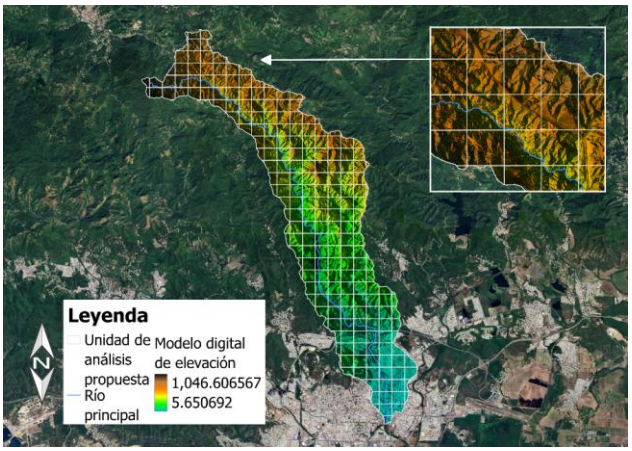


Fig. 1 Cuenca piloto y cuadrícula de celdas utilizada como unidad espacial de análisis

## II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se estructuró en tres fases. Previo a su implementación, se delimitaron las cuencas piloto que serían utilizadas. Para garantizar representatividad en diversos escenarios geográficos y topográficos de Puerto Rico, se delimitaron diez cuencas hidrográficas con morfologías contrastantes mediante la aplicación StreamStats del Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés (Fig. 2). Los criterios de selección incluyeron la variabilidad en el área de drenaje (1 a 60 $mi^2$), la pendiente promedio (12 a 59%) y la dirección cardinal del drenaje (Norte, Sur, Este y Oeste).



Fig. 2 Localización de las diez cuencas piloto

### A. *Fase I: estimación de parámetros hidrológicos a nivel de celda*

En el sistema de información geográfica QGIS, se realizó un recorte espacial de la cuadrícula de Estudios Técnicos Inc. utilizando los polígonos de las diez cuencas piloto. Cada celda resultante fue tratada como una unidad hidrológica independiente al momento de adaptar las tres metodologías tradicionales con el fin de estimar los parámetros hidrológicos.

#### 1. *Número de curva (CN)*

Según las tablas del Capítulo 2 del manual TR-55 [2], un valor de CN puede ser asignado en función de la combinación suelo-cubierta de un área. Por ende, se efectuaron dos intersecciones de vectores en el entorno de QGIS: una entre las celdas evaluadas y la capa de cubierta de suelo (NOAA OCM, 2010), y otra entre las celdas evaluadas y los grupos hidrológicos de suelos (NRCS Web Soil Survey). Utilizando las dos capas nuevas como datos, se realizó una tercera intersección de vectores. El resultado final fue una capa vectorial cuya tabla de atributo contiene las combinaciones de suelo-cubierta dentro de cada unidad de la cuadrícula. Posteriormente, se desarrolló una subrutina en el lenguaje de programación VBA capaz de asignar un CN promedio ponderado por área para cada celda.

#### 2. *Potencial de escorrentía directa (Pe)*

El Pe se calculó por celda mediante la programación de las ecuaciones (1) y (2) en VBA, las cuales integran el CN promedio estimado por celda más los datos de precipitación del NOAA Atlas 14, correspondientes a un evento de diseño de 100 años y 24 horas. Debido a que los valores de precipitación varían según la ubicación geográfica, se utilizaron las coordenadas del centroide de la cuenca a la cual pertenecían las celdas.

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{1}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \tag{2}$$

donde
Pe = potencial de escorrentía directa, pulgadas
P = precipitación, pulgadas
S = retención máxima potencial, pulgadas

#### 3. *Tiempo de concentración (Tc)*

El Tc fue estimado mediante la ecuación empírica (3) del método de retardo presentada en el Manual Nacional de Ingeniería del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA-NRCS [3]. Esta expresión fue desarrollada para emplearse con las unidades indicadas en la definición de variables, por lo que sus coeficientes incorporan la consistencia dimensional requerida para producir el tiempo de concentración en horas.

$$T_c = L^{0.8} \times \frac{(S + 1)^{0.7}}{1140Y^{0.5}} \tag{3}$$

donde
Tc = tiempo de concentración, horas
L = largo del recorrido, pies
S = retención máxima potencial, pulgadas
Y = pendiente media del terreno, porcentaje

Las variables se determinaron mediante algoritmos programados en VBA, implementando la relación de Mockus (4) para la longitud del recorrido, la expresión (2) para la capacidad de retención máxima, y la ecuación de Chow (5) para la pendiente media del terreno, considerando el área de cada celda como un área de drenaje independiente.

$$L = 209A^{0.6} \tag{4}$$

donde
L = largo del recorrido, pies
A = área de drenaje, acres

$$Y = \frac{100 \times C \times I}{A} \tag{5}$$

donde
Y = pendiente media del terreno, porcentaje
C = sumatoria de la longitud de las líneas de contorno por celda, metros
I = intervalo de contorno, metros
A = área de drenaje, metros cuadrados

Para resolver la sumatoria de la longitud de las líneas de contorno requerida por (5), se ejecutó un flujo de trabajo geoespacial por celda en QGIS. Este proceso consistió en: a) la generación de curvas de nivel cada diez metros a partir de un modelo digital de elevación de alta resolución (USGS Lidar DEM 2015–2017); b) una intersección vectorial entre dichas líneas y las celdas evaluadas; y c) el cálculo de la longitud de los segmentos resultantes dentro de cada celda. Finalmente, la sumatoria de la longitud de todos los segmentos por celda se computó mediante una subrutina en VBA.

Es importante subrayar que, para evitar errores de división por cero en celdas con topografía llana donde no se generan curvas de nivel (C = 0), se estableció una pendiente media mínima de 0.1%.

*4. Caudal Pico (Q)*

Se empleó la relación del método racional (6) para estimar el indicador de caudal pico por celda, considerando el área de cada celda como un área de drenaje independiente.

$$Q = CiA \tag{6}$$

donde
Q = caudal pico, pies cúbicos por segundo
C = coeficiente de escorrentía
i = intensidad media de lluvia, pulgadas por hora
A = área de drenaje, acres

El coeficiente de escorrentía se determinó según la Tabla 4.11 del *Manual de diseño hidráulico* de TxDOT [4], la cual desglosa el coeficiente en cuatro componentes basados en combinaciones de suelo-cubierta-pendiente. Estas combinaciones se generaron en QGIS uniendo los valores de pendiente promedio del terreno (Y) con las combinaciones previas de suelo-cubierta dentro de cada celda de la cuadrícula. Dado que una celda podía presentar múltiples coeficientes, se calculó un promedio ponderado por área por medio de la programación en VBA.

La intensidad media de lluvia se calculó para una frecuencia de 100 años utilizando la curva IDF tabulada del NOAA Atlas 14 correspondiente al centroide de la cuenca hidrográfica a la cual pertenecían las celdas. Para ajustar la intensidad al Tc específico de cada celda, se programó una subrutina en VBA capaz de seleccionar tres pares de datos de profundidad y duración de la curva IDF (el más próximo al Tc, el anterior y el posterior). En casos donde el tiempo de concentración era mayor que la primera fila de datos, pero menor que la segunda, el tercer par de datos se generó mediante una interpolación lineal, asumiendo la duración del par como equivalente al Tc estimado. Con estos tres pares de datos, se realizó una regresión lineal de tipo 1/i vs Tc para obtener las constantes (a) y (b), según establecido en el curso de *Cálculos Hidrológicos con el Método Racional usando Excel (Curso No: C02-039)* del Dr. Harlan H. Bengtson [5]. La intensidad media de lluvia se calculó mediante la ecuación empírica de Steel (7), por lo que la expresión debe interpretarse dentro del sistema de unidades utilizado para construir la regresión lineal de tipo 1/i vs Tc.

$$i = \frac{a}{Tc + b} \tag{7}$$

donde
i = intensidad media de lluvia, pulgadas por hora
Tc = tiempo de concentración, minutos
a y b = constantes calculadas a partir de la pendiente e intercepto de una regresión lineal tipo 1/i vs Tc

Si el Tc era inferior a la primera duración tabulada en la curva IDF, se utilizó dicha fila como dato directo, dividiendo la profundidad por la duración propia.

*B. Fase II: modelado hidrológico tradicional a nivel de cuenca*

Se realizaron estudios hidrológicos tradicionales para las diez cuencas seleccionadas, siguiendo la guía para la elaboración de los estudios H-H en Puerto Rico [1].

*1. Preparación de datos en QGIS*

En el entorno de QGIS, se prepararon las capas de información requeridas según el enfoque metodológico estipulado en la guía para la elaboración de los estudios H-H en Puerto Rico. Para cada una de las diez cuencas piloto se prepararon capas del modelo digital de elevación, el río principal, los tipos de flujo a lo largo del recorrido, los tipos de suelo, las cubiertas de suelo, al igual que las combinaciones de suelo-cubierta.

*2. Determinación de parámetros*

Conforme a los requerimientos de la guía oficial, se calculó el número de curva (CN) para cada cuenca mediante el método SCS-CN [2]. Asimismo, se determinó el tiempo de concentración (Tc) más el tiempo de retardo ($T_{lag}$) empleando el método de velocidades [2],[3].

*3. Modelado en HEC-HMS*

El potencial de escorrentía directa (Pe) y el caudal pico (Q) se determinaron mediante simulaciones en HEC-HMS. Se seleccionó el método de pérdida SCS Curve Number y el método de transformación SCS Unit Hydrograph. Como datos de entrada, el modelo incorporó el área de drenaje, el CN, el porcentaje de superficie impermeable y el $T_{lag}$.

### 4. *Configuración meteorológica y computacional*

La precipitación se modeló como una tormenta hipotética SCS Tipo 2. Se utilizó como profundidad puntual el valor de lluvia para un evento de 100 años y 24 horas, obtenido del NOAA Atlas 14 en las coordenadas del centroide de cada cuenca. Siguiendo la normativa del DRNA [1], se configuró un intervalo de tiempo computacional de cinco minutos para garantizar la resolución temporal de la simulación.

## C. *Fase III: comparación de resultados*

Con el fin de evaluar la coherencia de los parámetros estimados a nivel de celda, fue necesario agregarlos a la escala de cuenca para lograr compararlos con los resultados obtenidos mediante los procedimientos convencionales de análisis de cuencas.

### 1. *Agregación de valores*

Los parámetros de número de curva (CN), escorrentía directa (Pe) y tiempo de concentración (Tc) se agregaron mediante una ponderación espacial por área. Para ello, el valor estimado en cada celda se multiplicó por el área correspondiente de la unidad dentro de la cuenca hidrográfica; posteriormente, la suma de estos productos se dividió entre el área total de la cuenca evaluada.

En el caso de Q, el indicador agregado se obtuvo mediante la suma de los valores estimados para las celdas que conforman cada cuenca.

### 2. *Evaluación comparativa*

Una vez obtenidos los valores agregados para cada cuenca, estos se compararon con los resultados de la metodología convencional descrita en la Fase II. Para ello, se calculó el porcentaje de error de cada parámetro tomando como referencia los resultados obtenidos mediante el modelo convencional.

Debe señalarse que esta comparación no constituye una validación directa entre modelos equivalentes, sino una evaluación comparativa entre dos enfoques metodológicos distintos. La metodología por celdas estima parámetros hidrológicos locales mediante operaciones geoespaciales y expresiones empíricas programadas, mientras que el modelo convencional en HEC-HMS simula la respuesta hidrológica integrada de la cuenca. Por tanto, las diferencias observadas deben interpretarse considerando que ambas metodologías no representan exactamente los mismos procesos físicos ni la misma escala de análisis.

# III. RESULTADOS

Los resultados resumidos en la Tabla 1 y distribuidos en la Fig. 3, muestran que la utilidad de la representación por celdas depende de la naturaleza física del parámetro. El CN presentó una consistencia muy alta, con errores inferiores al 1% en las diez cuencas analizadas, sugiriendo que es un parámetro espacial local. Para Pe, los errores alcanzaron hasta un 15.40%, mostrando una consistencia moderada y un potencial útil como indicador local condicionado al evento. En contraste, Tc y Q presentaron discrepancias considerablemente, con errores entre 18–79% y 19–66%, respectivamente, clasificándolos como parámetros dependientes de la dinámica y conectividad hidrológica.

TABLA I
PORCENTAJE DE ERROR DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

| | Cuenca | CN (%) | Pe (%) | Tc (%) | Q (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $\text{Noreste}_{\text{Lajas}}$ | 0.50 | 7.47 | 60 | 24 |
| 2 | $\text{Noroeste}_{\text{Lajas}}$ | 0.36 | 5.01 | 58 | 57 |
| 3 | $\text{Sureste}_{\text{Lajas}}$ | 0.69 | 15.40 | 55 | 19 |
| 4 | $\text{Suroeste}_{\text{Lajas}}$ | 0.05 | 12.19 | 18 | 65 |
| 5 | Fajardo | 0.00 | 0.36 | 76 | 44 |
| 6 | Toa Baja | 0.00 | 1.51 | 38 | 42 |
| 7 | Añasco | 0.22 | 3.65 | 34 | 58 |
| 8 | Guayama | 0.00 | 0.02 | 66 | 66 |
| 9 | Ponce | 0.00 | 0.69 | 76 | 55 |
| 10 | Gurabo | 0.01 | 1.02 | 79 | 51 |

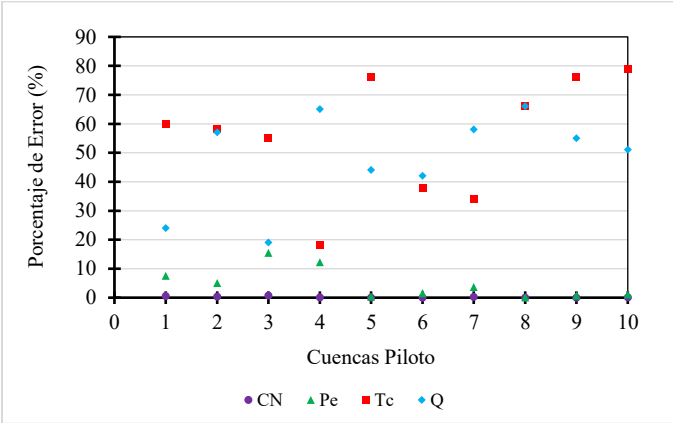


Fig. 3 Distribución de los porcentajes de error de los parámetros hidrológicos

# IV. DISCUSIÓN

Esta sección analiza las implicaciones de cada parámetro como indicador hidrológico a escala de celda, de acuerdo con su naturaleza: territorial local, local condicionado al evento, y dependientes de la dinámica y conectividad hidrológica.

## A. *Parámetro territorial local*

El CN depende principalmente de la combinación suelo-cubierta del terreno, por lo que puede considerarse un parámetro territorial local. Los resultados obtenidos respaldan esta interpretación, dado que la agregación de los valores calculados para las celdas mantuvo consistencia con los valores obtenidos mediante el procedimiento convencional, con errores inferiores al 1% para las diez cuencas evaluadas (Tabla 1). La

alta coincidencia de los valores agregados con los convencionales respalda la coherencia hidrológica de los valores individuales estimados por celda y su uso potencial como información hidrológica espacial.

### *B. Parámetro local condicionado al evento*

Aunque el Pe se calcula localmente para cada celda, a diferencia del CN, su estimación depende también de la precipitación del evento de diseño adoptado. En este estudio, la precipitación se mantuvo constante entre las celdas pertenecientes a cada cuenca, por lo que las diferencias espaciales en Pe responden principalmente a las variaciones del CN estimado para cada celda. En consecuencia, el Pe puede considerarse un indicador local condicionado al evento de precipitación.

Aun cuando el CN agregado de las celdas representó adecuadamente el CN de la cuenca, se obtuvieron diferencias de hasta 15.40% para el Pe. En la metodología propuesta, el Pe se calcula individualmente para cada celda a partir de su respectivo CN y de la precipitación del evento, y posteriormente se obtiene un valor agregado mediante un promedio ponderado por área. En contraste, el Pe utilizado como referencia corresponde al resultado del análisis convencional mediante HEC-HMS, en el que la cuenca se representa mediante parámetros agregados y se emplean los métodos SCS Curve Number y SCS Unit Hydrograph. Estas diferencias en los procedimientos de cálculo impiden atribuir los errores observados a un único factor. No obstante, los valores individuales de Pe estimados para las celdas pueden conservar utilidad como información hidrológica espacial para identificar sectores con mayor potencial de generación de escorrentía bajo el evento de diseño considerado.

### *C. Parámetros dependientes de la dinámica y conectividad hidrológica*

En contraste con el CN y el Pe, el tiempo de concentración representa una característica asociada a la trayectoria hidráulica de una cuenca y depende de la conectividad entre sus diferentes sectores. Por esta razón, el promedio ponderado por área de los tiempos de concentración calculados para celdas independientes no constituye una representación adecuada del tiempo de concentración de la cuenca, debido a que esta operación no representa las trayectorias hidráulicas ni la conectividad entre las celdas. Esto pudiera explicar por qué siete de las diez cuencas presentaran errores superiores al 50%. Además, debe considerarse que la comparación se realizó entre el método de retardo, aplicado a las celdas, y el método de velocidades, aplicado a la cuenca completa.

Para el indicador de caudal pico, la suma de los caudales estimados independientemente para cada celda mediante el método racional no representó el caudal pico obtenido mediante las simulaciones en HEC-HMS, con errores superiores al 50% en seis de las diez cuencas evaluadas. Estos errores pueden estar asociados tanto al uso de métodos de cálculo distintos como a que la suma directa de caudales pico estimados para celdas independientes no incorpora procesos fundamentales de la dinámica hidrológica, como la traslación y el almacenamiento del flujo y la conectividad con la red de drenaje. No obstante, los valores locales de Q estimados mediante el método racional podrían conservar utilidad como información hidrológica espacial para identificar sectores con mayor potencial de generación de caudal bajo las condiciones del evento de diseño considerado.

## V. LIMITACIONES

Los resultados obtenidos deben interpretarse considerando el alcance de la metodología evaluada. La comparación se realizó sobre diez cuencas piloto utilizando como referencia un procedimiento hidrológico convencional implementado en HEC-HMS. Asimismo, el análisis se desarrolló bajo un escenario uniforme de diseño, empleando una tormenta SCS Tipo II, la precipitación de 100 años y 24 horas correspondiente al centroide de cada cuenca, una cuadrícula existente de aproximadamente 69 acres por unidad y una pendiente mínima de 0.1 % en celdas con topografía prácticamente plana.

Adicionalmente, la metodología trató cada celda como una unidad independiente, por lo que no incorporó procesos de traslación y el almacenamiento del flujo ni la conectividad con la red de drenaje. Esta limitación es particularmente importante porque la comparación se realizó entre tecnologías y enfoques metodológicos distintos: una metodología geoespacial basada en estimaciones locales por celda y un modelo hidrológico convencional implementado en HEC-HMS para representar la respuesta integrada de una cuenca. En consecuencia, la comparación entre ambas metodologías no representa exactamente los mismos procesos físicos para parámetros como el tiempo de concentración y el indicador de caudal pico. Finalmente, la evaluación comparativa entre resultados se limitó al porcentaje de error; investigaciones futuras podrán emplear métricas adicionales, así como incorporar algoritmos de conectividad hidrológica, traslación y almacenamiento del flujo.

## VI. CONCLUSIONES

Los resultados respaldan la viabilidad de construir una base espacial uniforme de parámetros hidrológicos preliminares para Puerto Rico. La comparación realizada a escala de cuenca, utilizando los procedimientos convencionales como referencia para evaluar la coherencia de la agregación de los estimados por celda, indica que parámetros de naturaleza local, como el CN y, con las salvedades observadas, el Pe, pueden proporcionar información hidrológica potencialmente útil a escala de celda. Por otro lado, la estimación independiente de parámetros dependientes de la dinámica y conectividad de la cuenca, como el Tc y el Q, no constituye una representación adecuada de la respuesta hidrológica integrada de la cuenca. Sin embargo, podrían conservar utilidad como información espacial. En este sentido, los resultados demuestran el potencial de una

representación espacial por celdas para apoyar procesos de screening hidrológico preliminar, comparar alternativas de localización, identificar áreas que ameriten estudios posteriores y reconocer sectores con mayor potencial de generación de escorrentía. Por tanto, la metodología constituye una prueba de concepto para desarrollar información hidrológica espacial de apoyo a la planificación urbana y regional en Puerto Rico, sin sustituir los estudios hidrológico-hidráulicos requeridos para diseño o permisos.

## AGRADECIMIENTOS

La autora principal agradece al Dr. Christian A. Villalta Calderón por impulsar el desarrollo de esta investigación desde su etapa de proyecto de Capstone, así como por establecer la colaboración con Estudios Técnicos Inc. (ETI). Asimismo, agradece al Dr. Gustavo E. Pacheco-Crosetti por la orientación y revisión brindada durante el curso de investigación subgraduada CEE 5052, las cuales contribuyeron a transformar el trabajo original en un manuscrito con fines de publicación científica.

Los autores agradecen a Estudios Técnicos Inc. (ETI) por facilitar la cuadrícula de celdas de 69 acres para todo Puerto Rico.

## REFERENCIAS

[1] Silva-Araya WF, Rivera-Santos J. *Guías para la elaboración de Estudios Hidrológico-Hidráulicos*. División de Hidromodificaciones del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. 10 de junio de 2016. https://www.afv.pr.gov/wp-content/uploads/2016/07/GUIAS-PARA-LA-ELABORACION-DE-ESTUDIOS-HIDROLOGICOS-HIDRAULICOS.pdf

[2] Natural Resources Conservation Service. *Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release 55)*. U.S. Department of Agriculture. 1986. TR-55 Cover

[3] Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 15: Time of Concentration*. U.S. Department of Agriculture. 2010. 14081.pdf

[4] Texas Department of Transportation. *Hydraulic Design Manual, Chapter 4, Section 12: Rational Method.* 2019. Section 12: Rational Method

[5] Bengtson, H. H. *Rational Method Hydrologic Calculations with Excel*. CED Engineering. 2011. C02-039 - Rational Method Hydrologic Calculations with Excel.pdf