

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE CAUDALES EXTREMOS EN ÁREAS URBANAS

Ing. Rafael Oreamuno Vega, M. Sc., Ing. Roberto Villalobos Herrera

Universidad de Costa Rica, Costa Rica  
rafael.oreamuno@gmail.com, rvillaloboscr88@gmail.com.

### Introducción

La cuenca de la Quebrada Seca se ubica en la provincia de Heredia, Costa Rica, abarcando un total de 22 km<sup>2</sup>. Esta cuenca ha registrado múltiples inundaciones en su parte media y baja durante los últimos quince años. Estas inundaciones se asocian con eventos de precipitación convectivos de alta intensidad que inciden en la parte media y alta de la cuenca.

La Municipalidad de Heredia contrató al Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES) para realizar un diagnóstico de las inundaciones urbanas en la cuenca de la Quebrada Seca, en el marco del voto 4050 de la Sala Constitucional que ordena a las municipalidades de Barva, Belén, Flores, Heredia y San Rafael, así como a la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y al Ministerio de Ambiente y Energía, a resolver de forma integral la problemática de inundaciones urbanas y la contaminación de la red fluvial de la cuenca.

Como parte de este estudio se caracterizaron las lluvias esperadas en la cuenca mediante dos metodologías de análisis distintas. Los resultados de estas metodologías se contrastaron con la realidad observada en la cuenca para establecer cuál se ajustó de mejor forma a la realidad física de la cuenca. Los resultados de este análisis se presentan en este artículo.

### Objetivos

Objetivo general:

Identificar y cuantificar la problemática de la escorrentía urbana y la calidad del agua en la cuenca Quebrada Seca.

Objetivos específicos:

- Identificar las características de la precipitación en la cuenca.
- Estimar los volúmenes de precipitación esperados para distintos periodos de retorno en la cuenca, por medio de la serie de máximas precipitaciones diarias y por medio de eventos de tormenta.
- Calcular los hidrogramas de creciente en la cuenca para los volúmenes de precipitación estimados por cada uno de los métodos propuestos.
- Estimar las zonas propensas a inundación en la cuenca de la Quebrada Seca, para los hidrogramas de creciente generados por los volúmenes de tormenta obtenidos por cada uno de los métodos propuestos.

### Metodología

#### Modelo de cuenca:

El modelo hidrológico se construyó contemplando once puntos de control en la cuenca. Esta metodología de análisis se utilizó para aproximar los aportes de cada cantón a la escorrentía total de la cuenca. Los puntos de control corresponden a los puntos donde los cauces de la cuenca, la

Quebrada Seca y el río Burío, cruzan alguno de los límites cantonales. Las áreas definidas por estos puntos se observan en la Figura 1.

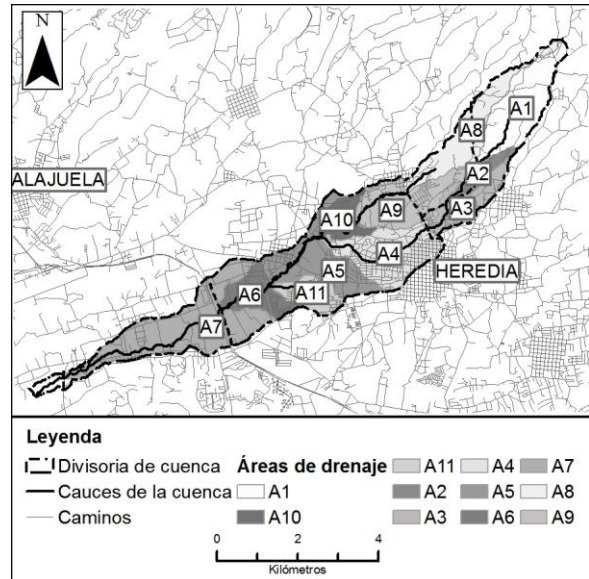


Figura 1.- Mapa de áreas de drenaje.

Por los patrones de drenaje propios de la cuenca no fue posible obtener áreas de drenaje compuestas por territorio de solamente un cantón. Sin embargo la subdivisión de la cuenca permitió representar las características particulares de cada área de drenaje. De esta forma el modelado respeta las diferencias físicas entre las partes alta, media y baja de la cuenca.

Para modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca se construyó un modelo de la cuenca en el programa HEC-HMS del USACE. En este programa se incluyeron sub-cuencas para representar cada área de drenaje. El modelo consiste de una serie de modelos agregados que, en conjunto, modelan la totalidad de la cuenca. Una alternativa posible para estudios futuros es el uso de un modelo hidrológico distribuido, sin embargo esto depende de la disponibilidad de información suficiente para alimentar estos modelos. En la actualidad la ausencia de un radar de lluvia limita el uso de estos modelos.

Las pérdidas de precipitación se modelaron por medio del método de Número de Curva (NC) del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS), anteriormente Servicio de Conservación de Suelos, de los E.E.U.U. Para calcular el NC de cada área de drenaje se utilizó información de cobertura disponible en formato GIS del proyecto PruGAM. Esta información se actualizó utilizando fotografía satelital del año 2013.

La cobertura del suelo se categorizó en tres grupos principales: zonas verdes (área permeable), carreteras y zonas urbanas (áreas impermeabilizadas). Las zonas verdes se

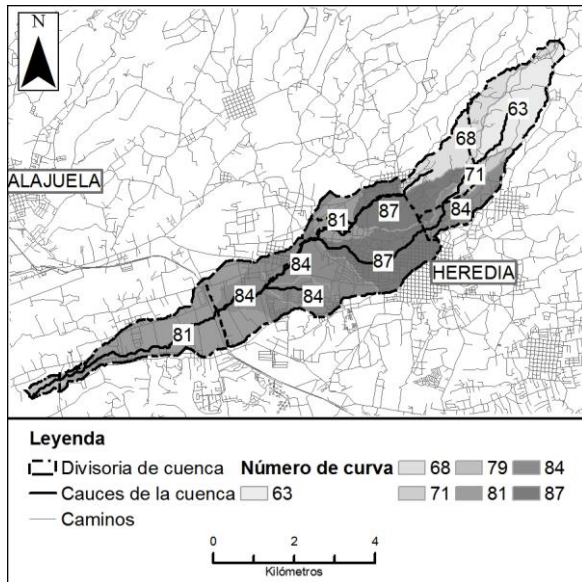
subcategorizaron en coberturas como pasto, café y bosque. Cada cobertura del suelo se combinó con los tipos de suelo de la cuenca para determinar el NC correspondiente.

La Tabla 1 muestra los NC ponderados para cada área de drenaje. Se observa que el NC es mayor para las áreas con un porcentaje mayor de cobertura impermeable.

**Tabla 1.-** Número de Curva según área de drenaje.

Área de drenaje	Extensión (km <sup>2</sup> )	Número de curva	Cobertura impermeable (%)
A1	2,6334	63	22,0
A2	0,6189	71	41,1
A3	1,2792	84	74,3
A4	2,7766	87	82,3
A5	2,4750	84	75,8
A6	1,3698	84	75,0
A7	4,6649	81	66,6
A8	2,3652	68	29,4
A9	2,3289	87	84,3
A10	1,0192	81	67,4
A11	1,0195	84	75,8
A0	0,3030	79	59,6

El NC asociado a cada área de drenaje se representa de forma gráfica en la Figura 2. Se observa que la región con mayor NC se ubica en el centro de la cuenca, inmediatamente al oeste y al norte de la ciudad de Heredia. Esto corresponde a las áreas A4 y A9. Se destaca que la única región con NC moderados se encuentra en la parte alta de la cuenca.



**Figura 2.-** Mapa de áreas de drenaje.

Luego de calcular la precipitación efectiva con el método del NC se utilizó el método de hidrograma unitario de Snyder para generar los hidrogramas de creciente en cada uno de los puntos de control. Los parámetros de longitud del método se calcularon por medio de SIG, las constantes  $C_p$  y  $C_t$  se

tomaron del análisis realizado por Sandí, 2012, de crecientes en la cuenca del río Virilla y corresponden a la cuenca del río Bermúdez.

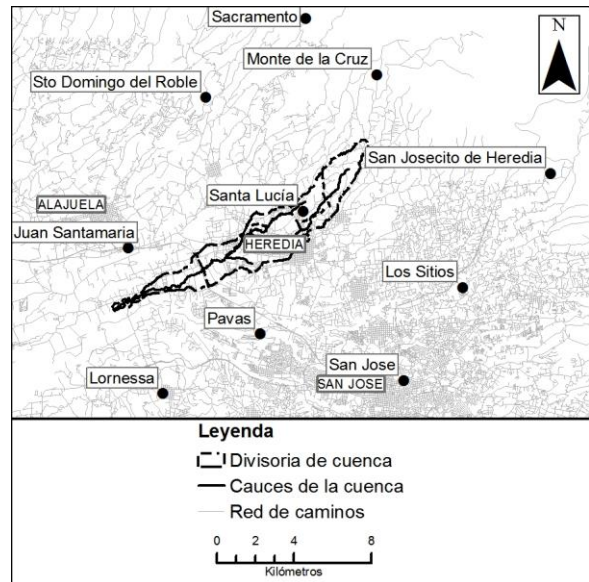
Para completar el modelo hidrológico se utilizó el método de tránsito hidrológico de Muskingum-Cunge. Este método se utilizó para transitar hidrogramas entre un punto de control y otro aguas abajo para agregarlos.

Los resultados obtenidos del modelo hidrológico son hidrogramas de creciente para cada área de drenaje e hidrogramas de creciente acumulados en las confluencias y el punto de salida de la cuenca.

**Modelado de precipitación:**

La precipitación esperada en la cuenca se analizó por medio de dos métodos. El método uno se basa en el análisis estadístico de las series de precipitación máxima anual de once estaciones meteorológicas, medidoras de precipitación, cercanas a la cuenca. Estas series de máximos se ajustaron con las distribuciones de probabilidad log-Pearson III y Gumbel. El mejor ajuste estadístico se obtuvo con la distribución log-Pearson-III. Del ajuste de cada estación se obtuvo el volumen de precipitación esperado para cinco, diez, quince, veinte, veinticinco, cincuenta y cien años de periodo de retorno (TR).

Los valores de precipitación esperada para los periodos de retorno anteriores son válidos para la ubicación puntual de cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas. La Figura 3 presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas. Estas rodean por completo la cuenca e incluyen la estación Santa Lucía de Barva dentro de la cuenca.



**Figura 3.-** Mapa de estaciones meteorológicas.

La distribución espacial de la lluvia para cada periodo de retorno se estimó utilizando ArcGIS. A partir de cada lámina se calcularon los promedios espaciales de cada área de drenaje.

El método dos caracterizó la precipitación a partir del análisis de una serie de 17 crecientes observadas en la cuenca por la Municipalidad de Belén entre el 2000 y el 2014. Para cada una de estas crecientes se obtuvo el registro de precipitación horaria de las estaciones San José, Aeropuerto Juan Santamaría, San Josecito, PAVAS y Santa Lucía. Con base en lo

anterior se identificaron tres patrones de precipitación que generaron inundaciones en la cuenca.

Estos patrones espaciales son:

- eventos Santa Lucía (SL),
- eventos Santa Lucía + Aeropuerto Juan Santamaría (SL+AJSM),
- eventos Aeropuerto Juan Santamaría y Santa Lucía (AJSM+SL).

La primera estación nombrada en cada evento es aquella en donde se registró el mayor volumen de precipitación, la segunda estación es en la que también se registró lluvia para ese tipo de evento pero en menor cantidad. Por ejemplo un evento SL+AJSM corresponde a una tormenta concentrada en Santa Lucía de Barva durante la cual también llovió en el Aeropuerto Juan Santamaría. Un evento de este tipo generó crecientes y daños en el 2010.

Otro evento significativo fue el registrado el 13 de junio de 2007. Este evento forma el prototipo de los eventos ASJM+SL y generó una creciente con afectación importante en el cantón de Belén. La distribución espacial estimada se presenta en la Figura 4. Los colores más oscuros representan un mayor volumen de precipitación. Se destaca un aumento de la precipitación hacia el sur y oeste en la cuenca.

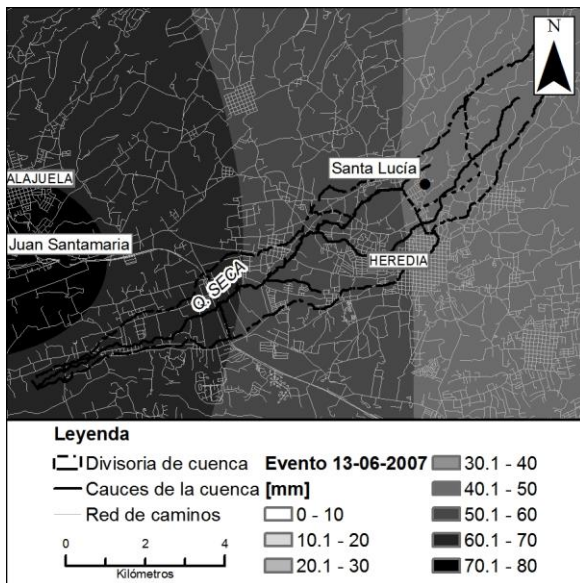


Figura 4.- Mapa lluvia, evento 13-06-2007.

A partir de los patrones espaciales se generaron eventos sintéticos de precipitación. Para ello patrón se combinó con los valores de precipitación esperados para varios periodos de retorno en las estaciones presentes en cada patrón. Estos valores fueron derivados del primer método de análisis. Luego se interpoló espacialmente para obtener láminas de precipitación para toda la cuenca. A partir de estas láminas se calcularon los promedios espaciales de precipitación de cada una área de drenaje.

El procedimiento seguido a partir del cálculo de los promedios espaciales de precipitación es idéntico para ambos métodos.

El volumen precipitado se distribuyó espacialmente de acuerdo con las zonas de intensidad identificadas por Murillo, 2007. La parte media de la cuenca, que coincide con la zona

de mayor cobertura urbana, tiene una distribución temporal caracterizada por la estación Santa Lucía. En ella los eventos típicos son de muy alta intensidad. La parte baja de la cuenca se caracteriza por lluvias de alta intensidad siguiendo el patrón temporal de la estación Aeropuerto Juan Santamaría. Finalmente las áreas más altas, de intensidad media, se caracterizaron con el hietograma de la estación San José.

Los histogramas de lluvia generados por ambos métodos de análisis de precipitación se utilizaron como insumo para el modelado hidrológico de la cuenca con el modelo HEC-HMS descrito anteriormente. Los caudales pico obtenidos por medio del modelado hidrológico se utilizaron por el modelado hidráulico.

#### Modelado hidráulico:

El análisis hidráulico del cauce principal de la cuenca se realizó utilizando el programa HEC-RAS. El modelo de flujo es unidimensional y consideró que el flujo era permanente con caudal igual al caudal pico de cada evento.

El modelo del cauce utiliza información topográfica de la Quebrada Seca a partir de su confluencia con el río Burío hasta llegar al Proyecto Gol en el límite entre Belén y Alajuela. Parte de la información topográfica fue aportada por la Municipalidad de Belén y otra levantada por personal de CIEDES. La topografía levantada por CIEDES contempló múltiples secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de los puentes y alcantarillas del cauce principal. La información de la Municipalidad completó los tramos entre cada puente.

Se utilizaron cuatro puntos para agregar la escorrentía generada en la cuenca. Estos puntos corresponden a varias confluencias importantes dentro de la cuenca y al punto de control de la cuenca completa. Esto permitió modelar caudales distintos para los tramos ubicados entre cada sitio de confluencia para representar de mejor forma el comportamiento de la cuenca.

Los resultados obtenidos del análisis hidráulico incluyeron la elevación esperada y velocidad de flujo en cada sección transversal analizada. Con estos resultados se evaluó la correspondencia entre la magnitud de las crecientes reportadas en la cuenca y aquellas generadas por los dos modelos de precipitación. En un caso ideal los resultados se podrían contrastar contra los hidrogramas de creciente reales registrados en la cuenca, sin embargo esa información no existe.

#### Resultados

La diferencia principal en los resultados del modelado de la precipitación, estriba en la magnitud de los volúmenes de precipitación estimados con la serie de máximas precipitaciones diarias y con la serie de tormentas específicas. De esta diferencia se derivan las que se observan en los hidrogramas de crecientes y el modelado hidráulico.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del método 1 de análisis de precipitación. Los resultados correspondientes al método 2 se presentan en la Tabla 3. La diferencia en la magnitud de la precipitación estimada por cada método es evidente. La precipitación estimada por el método 1 para periodos de retorno superiores a los cinco años es mayor que cualquier precipitación estimada por el método 2.

La precipitación total esperada según el método 1 supera los

promedios de precipitación estimados en la cuenca para los eventos registrados. Esto último indica que los periodos de retorno de acuerdo con el método 1 no corresponden a los periodos de retorno de los eventos reales en la cuenca sino que corresponden a eventos de mayor periodo de retorno.

**Tabla 2.-** Precipitación total y efectiva, método 1.

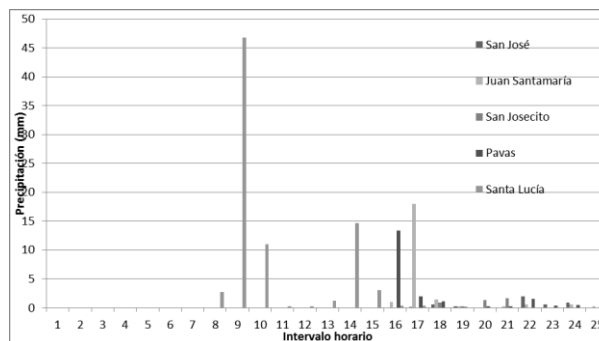
Evento (TR)	Precipitación total [mm]	Precipitación efectiva [mm]
2	85,8	39,4
5	105,4	55,0
10	119,3	66,7
15	128,3	74,5
20	134,2	79,4
25	139,1	83,7
50	155,2	97,8
100	172,4	113,2

**Tabla 3.-** Precipitación total y efectiva por evento, método 2.

Evento (Tipo - TR)	Precipitación total [mm]	Precipitación efectiva [mm]
SL-2	49,9	21,9
SL-5	60,1	26,9
SL-10	67,6	34,4
SL-50	77,9	40,6
AJSM+SL-10	60,7	25,4
AJSM+SL-25	71,7	33,8
AJSM+SL-50	80,5	42,4
SL+AJSM-10	86,6	48,3
SL+AJSM-25	99,7	56,2
SL+AJSM-50	110,4	65,1

Aunque se ha identificado que eventos de precipitación extrema en dos sitios cercanos no son independientes (Hosking, 1997), los resultados obtenidos en el análisis hidrológico de la Quebrada Seca parecen mostrar que los eventos extremos de precipitación, sobre esta área de drenaje, si son independientes. La suposición que dos eventos del mismo periodo de retorno ocurren de forma simultánea en estaciones aledañas puede ser válida, sin embargo al aumentar la cantidad de estaciones sometidas al análisis pierde validez la suposición de simultaneidad. Creemos que al considerar que los eventos con cierto periodo de retorno ocurren de forma simultánea en diez estaciones meteorológicas en realidad se está generando un evento con un periodo de retorno mayor.

En contraste el análisis de precipitación del método 2 genera precipitaciones totales en la cuenca que corresponden de mejor manera a los eventos que ocasionan crecientes en la cuenca. Estos eventos de precipitación se caracterizaron por ser eventos intensos de no más de dos horas de duración que se concentraron en un área pequeña. Por ejemplo en el evento del 01/10/2004 que se muestra en la Figura 5 sólo se registró lluvia de forma simultánea en la estación Santa Lucía. Además existen fechas donde se observaron crecientes en Belén pero donde el registro de precipitación de las estaciones meteorológicas no indica precipitación significativa. Esto sugiere que las crecientes de esas fechas se generaron debido a lluvias localizadas en algún punto intermedio entre las estaciones meteorológicas.



**Figura 5.-** Evento registrado 01/10/2004

Los resultados del modelado hidráulico corroboran lo observado en el análisis de precipitación. Evidentemente los volúmenes de precipitación estimados por medio de la serie de máximas precipitaciones diarias, generan caudales máximos instantáneos mayores a los obtenidos en el análisis por eventos. La tabla 4 muestra el caudal pico estimado en la salida de la cuenca para el método 1 y los tres tipos de eventos del método 2.

La magnitud de las crecientes que corresponden al evento de 10 años de periodo de retorno estimado por el método 1 supera por mucho cualquier creciente observada en la cuenca. Adicionalmente, por medio de entrevistas con habitantes de la zona de Belén, se estableció que los tirantes obtenidos con los hidrogramas de creciente estimados por medio del análisis de eventos específicos de precipitación, se ajustan mejor a los niveles observados durante los eventos de inundación ocurridos en la parte baja de la cuenca.

**Tabla 4.-** Caudales máximos instantáneos estimados en m<sup>3</sup>/s.

TR [años]	Método 1	Método 2		
		SL	SL+AJSM	AJSM+SL
10	199,5	97,3	140,1	77,6
25	251,6	117,0	165,0	100,3
50	295,7	142,0	191,2	120,5

En conclusión, los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que el análisis hidrológico utilizando eventos de tormenta, refleja mejor la realidad física de la respuesta hidrológica de la Quebrada Seca ante tormentas severas.

En vista de la magnitud de precipitaciones que fueron estimadas por el método 1, y en vista de la discrepancia con los eventos observados en la realidad de la cuenca de la Quebrada Seca, se recomienda que este método y sus semejantes que utilicen eventos simultáneos en múltiples estaciones, no sean utilizados para el diseño o análisis de obras civiles sin ser contrastados con los resultados de un análisis de los eventos registrados en la cuenca.

## Referencias Bibliográficas

Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. (1997). *Regional Frequency Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

**Murillo, R.E.** (1994). *Estudio de intensidades de lluvia en la Cuenca del río Virilla*. Trabajo Final de Graduación en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

**Sandí, S. G.** (2012). *Generación de Hidrogramas de Creciente de la Tormenta Tropical Tomás para la Evaluación de la Infraestructura Urbana en la Cuenca del río Virilla*. Trabajo Final de Graduación en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.