



APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN DE GASTOS MÁXIMOS MEDIANTE HEC- HMS EN CUENCAS AFORADAS

Chrystopher Daly Franco Navarro¹, Constantino Domínguez Sánchez², Joel Hernández Bedolla³, Benjamín Lara Ledesma⁴

^{1,2,3,4}Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

¹1229798x@umich.mx, ²dsanchez@umich.mx, ³joel.hernandez@umich.mx,
⁴benjamin.lara@umich.mx

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo determinar los hidrogramas de salida correspondientes a diversos periodos de retorno a partir de una serie de gastos máximos anuales medidos, y validar un modelo lluvia escurrimiento mediante el método de la Soil Conservation Service (SCS) y el uso del software HEC-HMS para así comprender de una manera más fiable el escurrimiento dentro una cuenca. Si bien este método es usado ampliamente es susceptible a mejoras cuando se cuenca con información hidrométrica que permite la calibración. En el caso de estudio se logró validar la serie de precipitación que tiene una mejor correlación a la respuesta de la cuenca cuando existe precipitación de manera que pueda establecerse para futuros trabajos, además de lograr encontrar un número de escurrimiento N más realista a las condiciones de la cuenca de estudio, esto a fin de obtener mejores resultados a futuros estudios que requieran de dicha información. Finalmente, la importancia de contar cuencas aforadas se puede traducir en cuan fiables son los estudios relacionados con la escorrentía en ellas pues, ayudan a validar y calibrar modelos matemáticos que sean de alta importancia para la toma de decisiones a la hora de realizar la gestión hídrica de una cuenca.

Palabras clave: Cuencas aforadas, Calibración de caudales máximos, HEC-HMS.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de inundación actualmente son fenómenos que forman parte del día a día de las sociedades dado que diversos factores tanto naturales como antropogénicos, han propiciado que estos sucedan de una manera ocurrente derivando de ellos cuantiosos daños económicos, así como la pérdida de vidas humanas. Debido a la ubicación geográfica de México, año tras año es usual la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos de los cuales de la gran mayoría se derivan eventos que producen desastres naturales. Muestra de esto tan sólo en 2021 el monto de daños asociados a desastres naturales fue de aproximadamente 850 MDD lo que corresponde a un 0.06% del Producto Interno Bruto del país correspondiente al mismo año, de este total de daños el 90% (CENAPRED, 2021) corresponden a eventos hidrometeorológicos como lo son eventos de inundación entre otros, por lo cual es notable la influencia negativa que tienen este tipo de fenómenos en la economía de un país como México. Conociendo estas cifras se llega a la necesidad de construir modelos de inundación realistas que reflejan el comportamiento espacial y temporal y espacial de este tipo de

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

fenómenos por lo que es necesaria la tarea de validación de los mismos para así lograr que los modelos matemáticos sean coherentes a lo que sucede en la realidad, dicha validación se logra haciendo uso de diversas alternativas como son: imágenes satelitales, fotografías, testimonios o bien mediciones en cuencas aforadas como son las mediciones hidrométricas. La problemática anteriormente es presente en zonas urbanas que gran importancia, este trabajo se centra en una de varias cuencas hidrológicas sobre las cuales la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán, México se ha asentado debido a la importancia socioeconómica de esta. El presente trabajo se centra en la cuenca de la corriente denominada “Río Chiquito” la cual cruza a través de una parte de la mancha urbana de la ciudad hasta su unión con el cauce denominado “Río Grande”.

2. METODOLOGÍA

Para la aplicación de la metodología y obtención de resultados en este trabajo fue necesaria la obtención a partir de investigaciones anteriores de la capacidad del cauce “Río Chiquito” a partir de modelos matemáticos hechos con el software HEC-RAS donde se logró estimar la capacidad máxima que puede transportar este. De dichos modelos se encontró que la capacidad máxima del cauce es de 81.5 m³/s, donde cabe señalar que la modelación se realizó mediante un modelo 2D aplicando las ecuaciones de Saint Venant.

2.1. MODELO PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES

Una vez conocido dicho caudal máximo que puede transportar el cauce Río Chiquito, se estimó la precipitación asociada a este mediante iteraciones aplicando el modelo SCS haciendo uso del software HEC-HMS. Para la aplicación de este modelo se realizó la construcción de hietogramas de diseño mediante el método propuesto por Kuichling, (1889) partiendo como referencia de la precipitación máxima diaria registrada por estación y este método consiste en el planteamiento de curvas de máxima intensidad para diversas duraciones en el cual se estiman valores como: intensidad (Id), precipitación máxima (Pd), constante para determinar la duración de una lluvia conocida (K). Siendo las expresiones que definen el modelo las siguientes:

$$I_d = \frac{K}{(1 - e)d^e}$$

$$P_d = \frac{Kd^{1-e}}{1 - e}$$

$$K = \frac{P(1 - e)}{24^{1-e}}$$

Donde:

e: coeficiente definido en función del tiempo de concentración.

d: intervalo de horas en función del tiempo de concentración.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tabla 1. Valores del coeficiente “e” en función del tiempo de concentración

e		Tc (hr)	Descripción
Mínimo	Máximo		
0.45	0.5	>= 48 horas	Cuencas muy grandes
0.5	0.55	48 a 24	Cuencas grandes
0.55	0.6	24 a 6	Cuencas medianas
0.6	0.7	6 a 1	Cuencas chicas
0.7	0.8	< 1	Cuencas muy pequeñas

Una vez obtenidas los hietogramas propuestos se procedió a la aplicación del modelo SCS que consiste en las siguientes expresiones:

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

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Dónde:

P: Precipitación obtenida a partir de los hietogramas de diseño.

S: Factor obtenido a partir del número de escurrimiento (*N*), también llamado número de curva (*CN*).

2.2. AJUSTE DE FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN

Para la determinación de los periodos de retorno para la precipitación que genera el caudal de máxima capacidad en el cauce se ajustaron las series de precipitación y de caudales a diversas Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP), para esto se consideraron las FDP:

- **Normal**
- **Log Normal (2 y 3 parámetros)**
- **Gamma (2 y 3 parámetros)**
- **Log Pearson (Tipo III)**
- **Gumbel**
- **Log Gumbel**

2.1.1. FDP Normal

La expresión que determina una distribución normal está dada de la siguiente forma según Aparicio, (2001):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2}$$

Dónde:

μ_y : parámetro de ubicación

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

σ_y : parámetro de escala

2.1.2. FDP Log Normal 2 parámetros

La expresión matemática que determina esta Función está dada por (Aparicio, 2001):

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2}$$

Dónde:

μ_y : parámetro de ubicación

σ_y : parámetro de escala

2.1.3. FDP Log Normal 3 parámetros

La expresión matemática correspondiente a esta distribución es la siguiente (Aparicio, 2001):

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0) - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2}$$

Dónde:

x_0 : parámetro de ubicación

μ_y : parámetro de escala

σ_y : parámetro de forma

2.1.4. FDP Gamma 2 parámetros

La función Gamma de 2 parámetros está dada por la expresión matemática (Aparicio, 2001):

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta}\Gamma(\beta)} dx$$

Dónde:

α : parámetro de escala

β : parámetro de forma

$\Gamma(\beta)$: Función Gamma completa

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

2.1.5. FDP Gamma 3 parámetros

Para la función Gamma de 3 parámetros (también conocida como Pearson) se considera la siguiente ecuación (Aparicio, 2001):

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} dx$$

Dónde:

α : parámetro de escala

β : parámetro de forma

$\Gamma(\beta)$: función Gamma

x_0 : parámetro de ubicación

2.1.6. FDP Log Pearson III

Para esta FDP se utilizan la misma expresión que describe la función **Gamma de 3 parámetros** a excepción de que se realiza la transformación logarítmica base 10 de las series (Acosta Castellanos & Sierra APonte, 2013).

2.1.7. FDP Gumbel

Este modelo se encuentra definido por la siguiente expresión (Aparicio, 2001):

$$F(x) = \exp - \left[\exp \left(- \left[\frac{x - \mu}{\alpha} \right] \right) \right]$$

Dónde:

μ : parámetro de ubicación

α : parámetro de escala

2.1.8. FDP Log Gumbel

La FDP log Gumbel se encuentra definida por la siguiente ecuación (Campos Aranda, 2013):

$$F(x) = \frac{1}{\alpha x} \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{\ln(x) - \mu}{\alpha} \right] - \frac{\ln(x) - \mu}{\alpha} \right\}$$

Dónde:

μ : parámetro de ubicación

α : parámetro de escala

Para el ajuste de las FDP se hizo uso del software HidroEsta y mediante la prueba Kolmogórov-Smirnov la cual compara el máximo valor absoluto de la diferencia entre la función de probabilidad observada y la estimada.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

$$D = \max |F_o(X_m) - F(X_m)|$$

Este valor se compara con el nivel de significancia de modo que este tendrá que ser menor a este último para aceptar la hipótesis nula.

3.RESULTADOS

3.1.Delimitación de cuenca hidrológica y sus características

Como primer fase de este trabajo se llevó a cabo la generación de la cuenca hidrológica correspondiente a la confluencia del Río Chiquito con el Río Grande, para ello como insumos requeridos se tomaron de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) los MDE con escala 1:10 000 correspondientes a la carta topográfica denominada E14A23B, dichos MDE cuentan con una resolución de 5m lo cual asegura una resolución adecuada para la generación de la cuenca en la zona de estudio.

Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se llevó a cabo la delimitación de la cuenca correspondiente a la corriente denominada Río Chiquito (Figura 1), obteniendo de igual manera parámetros importantes para este trabajo como son: área de la cuenca, pendiente media del cauce principal aplicando el método de Taylor & Schwarz (Aparicio, 2001), tiempo de concentración haciendo uso del método Kirpich (Aparicio, 2001), así como el mapa de pendientes de la cuenca y número de escurrimiento N.

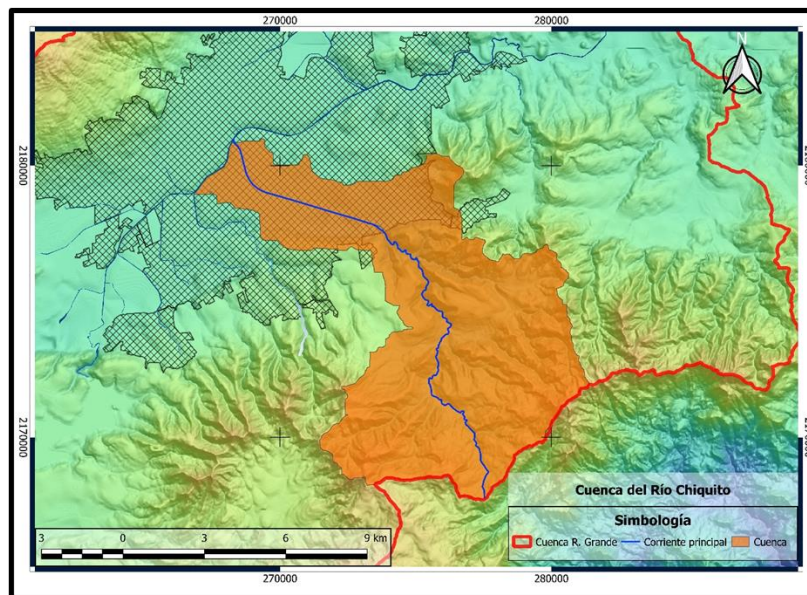


Figura 1. Cuenca correspondiente al cauce del Río Chiquito en la ciudad de Morelia

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

3.2.OBTENCIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN Y AFOROS

Para esta fase se llevó a cabo la selección de estaciones meteorológicas por lo que a partir de la Red Nacional CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) se obtuvieron las estaciones dentro y de la cuenca, encontrándose 3 estaciones mediciones meteorológicas y 1 para la medición de caudal con clave: 16080, 16081, 16055 y 12224 respectivamente. Tres de estas se localizan en la parte baja de la cuenca mientras que la estación 16055 se localiza en cabecera de la cuenca.

Una vez obtenidas los datos de precipitación, fueron sometidos a pruebas estadísticas para así validar estos obteniéndose lo siguiente (Campos Aranda, 1998):

Tabla 2. Resumen de pruebas estadísticas realizadas a las series de precipitación

Estación	Helmert	Secuencias	T-student	Límites de Anderson
16055	No Homogenea	Homogenea	Homogenea	Independiente
16081	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Independiente
16080	Homogenea	Homogenea	Homogenea	Independiente

3.3.OBTENCIÓN DE CAUDALES A PARTIR DEL MODELO SCS

Obtenidos los diversos parámetros hidrológicos requeridos se procedió al cálculo de un primer caudal partiendo con una precipitación basada en las precipitaciones máximas correspondientes a cada estación meteorológica de la cuenca, una vez obtenido se compara con el caudal buscado donde estás se ajustarán hasta alcanzar el caudal deseado. Hecho el proceso iterativo se encontró que de precipitaciones aproximadas a **96.53mm** se deriva el caudal máximo que puede transportar el Río Chiquito. A partir de las FDP que mejor ajustaron a cada serie de datos se procedió a estimar el periodo de retorno correspondiente al caudal máximo de la capacidad del cauce en función de la serie hidrométrica, así como las series de precipitación como se muestra a continuación.

Tabla 3. Caudales máximos resultantes precipitaciones asociadas y periodo de retorno

Estación	Precipitación asociada al caudal máximo (mm)	Caudal máximo (m3/s)	Tr (años)
Estación de aforo: Río Chiquito 12224	96.53	81.5	64.1
Estación meteorológica: Morelia 16080	96.53	81.5	28
	95.1	78.5	26.4
Estación meteorológica: Morelia 16081	96.53	81.5	360.7
	85.3	59	114.4
Estación meteorológica: Jesús del Monte 16055	96.53	81.5	67.8
	97	82.5	68.9

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos fue posible observar que el modelo SCS representa de manera precisa la respuesta de la cuenca ante precipitaciones siendo posible observar esto al comparar uno de los hidrogramas obtenidos con una de las avenidas medidas por la estación de aforo como se muestra en la Figure 6 por lo que se puede confiar en los resultados obtenidos por este. En base a lo observado se concluye que la estación con clave 16055 Jesús del Monte muestra correlación con el periodo de retorno estimado con la estación de aforo 12224 mientras que las estaciones 16080 y 16081 muestran subestimar y sobrestimar los periodos de retorno para las precipitaciones que producen el caudal máximo del cauce, por tanto, se concluye que las series de precipitación medidas por esta son de gran fiabilidad para la estimación de hidrogramas. Esta diferencia entre periodos de retorno entre estaciones puede estar relacionada a la distribución temporal y espacial de las precipitaciones dado que son factores que pueden influir de manera significativa a la intensidad y cantidad de lluvia.

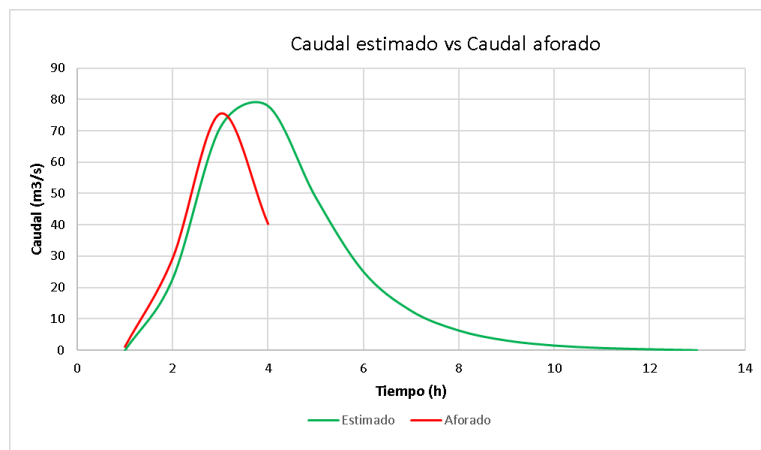


Figura 2. Comparativa entre hidrogramas estimados y un hidrograma aforado

5. REFERENCIAS

- [1] Acosta Castellanos, P. M., & Sierra APonte, L. X. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad De Ingeniería*, 22(35), 25. <https://doi.org/10.19053/01211129.2512>
- [2] Aparicio, F. (2001). *Fundamentos de hidrología de superficie* (1a. ed.). LIMUSA.
- [3] Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (3a. ed.). UASLP.
- [4] Campos Aranda, D. F. (2013). *Contraste de la distribución Logística Generalizada en 31 registros históricos de eventos máximos anuales Contrast of Generalized Logistic Distribution in 31 Historical Records of Annual Extreme Events*.
- [5], E. (1889). The Relation Between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 20(1), 1–56. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0000694>