

Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México

MSc. Diego Rojas Sigala

Academia de Hidráulica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, ITESO, Guadalajara, México.

e-mail: ing.diegorojas@hotmail.com

Dr. Mario Guadalupe González Pérez

Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, CUTONALÁ, Tonalá, México.

e-mail: inge_united@hotmail.com

RESUMEN

Los resultados que arrojan los modelos hidrológicos utilizados actualmente en la planeación de obras hidráulicas en México no han favorecido la disminución de los efectos generados por los fenómenos meteorológicos relativos a la lluvia y el escurrimiento en los núcleos poblacionales. La escasa información de medición de caudales; dato imprescindible en la determinación de la certeza de los resultados y parámetro primordial en la toma de decisiones en materia de diseño, construcción y operación de proyectos de infraestructura pluvial o sanitaria, motiva la utilización de instrumentos tecnológicos que asemejen con mayor precisión el comportamiento hídrico real, a través de la aplicación de modelos que integren la variabilidad espacial y temporal de la lluvia, cuyos resultados favorezcan las dinámicas económicas sociales y ambientales en los centros urbanos.

Palabras clave: cuenca urbana, incertidumbre, modelos hidrológicos, software, vulnerabilidad.

Uncertainty in hydrological modeling and planning of waterworks in Mexico

ABSTRACT

The results obtained from hydrological models used currently in planning of hydraulic works in Mexico have not favoured the reduction of the effects generated by meteorological phenomena related to rainfall and runoff in population centers. The limited information in flow measurements, essential in determining the accuracy of the results and primary parameter in making decisions about design, construction and operation of stormwater or wastewater infrastructure projects, motivates the use of technological tools that resemble more closely the behavior of real water. Therefore the need for application of models that integrate the spatial and temporal variability of rainfall to produce results enhancing socio-economical and environmental dynamics in urban centers.

Keywords: urban watershed, uncertainty, hydrological models, software, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una herramienta comúnmente utilizada por el ingeniero civil para la determinación de parámetros de diseño que ayuden a dimensionar obras de carácter hidráulico. Sin embargo, en el caso del binomio lluvia-escurrimiento, al aplicar diferentes modelos avalados por la normativa actual en una misma cuenca urbana, se llegan a tener resultados que varían en más del doble en relación con el caudal pico y con el volumen total del escurrimiento.

A partir de esto último, no hay plena certeza en la aplicación de los métodos actuales relativos al comportamiento de los procesos hídricos en los centros urbanos, dado que se cuenta con una gama de propuestas teórico metodológicas, citadas en la tabla 1, que pueden ayudar a efectuar el análisis del problema en estudio. En efecto, el objetivo de estos métodos consiste en determinar si el sistema relaciona las variables de entrada con las variables de salida en un operador de transformación como se muestra en la figura 1.

Tabla 1. Clasificación de los modelos hidrológicos (Rodríguez 2011)

Clasificación	Subclasificación	Diferencia
Modelo conceptual	Empíricos	La diferencia se concentra en la base de los conocimientos de los modelos matemáticos desarrollados.
	Hidrológicos	
	Hidráulicos	
Tiempo de simulación	Escala de evento	La diferencia está relacionada con el tiempo de simulación del modelo.
	Simulación continua	
Aleatoriedad	Determinístico	Esta clasificación se basa en que el modelo considere o no aleatoriedad.
	Estocástico	
Linealidad	Lineal	Esta categoría se establece en función del tipo de ecuaciones (lineales o no) empleadas para representar un fenómeno.
	No lineal	
Variabilidad espacial	Agregado	Se diferencian en cómo evalúan al sistema en el espacio considerado.
	Distribuido	
Modelo matemático	Continuo	Esta diferencia se basa en la existencia o no de la derivada de la función empleada.
	Discreto	
Datos de alimentación	Parámetros medidos	Esta distinción es crítica en la selección de los modelos para la aplicación cuando las observaciones de la entrada y la salida no están disponibles.
	Parámetros ajustados	

En el caso de un modelo de transformación lluvia-escurrimiento como el mostrado en la figura 2, los datos de entrada o *estímulo generador* es la lluvia; el *operador* es la relación de la lluvia directamente con la cuenca a través de los datos geomorfológicos. Asimismo, el *resultado* puede ser un caudal pico o un hidrograma de escurrimiento, que representa el principal

parámetro de diseño en obras de carácter pluvial, en el diseño de obras de desalajo tales como colectores y canales, obras de contención y almacenamiento, etc. En síntesis, el modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentamiento tiene en su conformación un alto grado de incertidumbre debido a la fuerte componente estocástica (Palacios 2004).

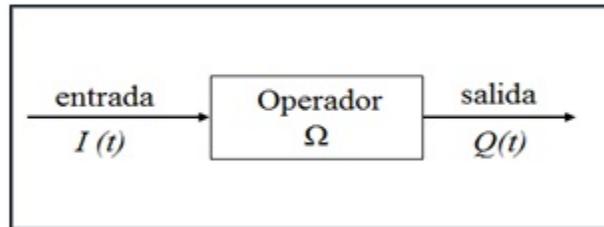


Figura 1. Representación de la operación de un sistema (Chow 1994)

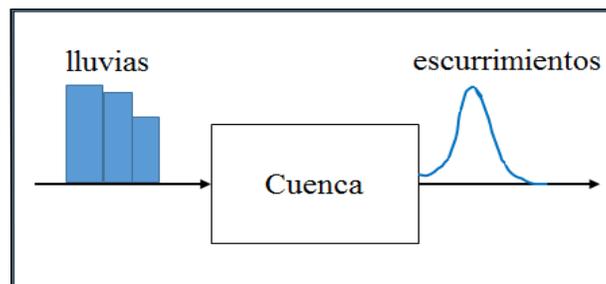


Figura 2. Representación de un modelo de transformación lluvia-escorrentamiento

Determinar el grado de incertidumbre de un modelo o la precisión del modelo respecto al fenómeno real, requiere necesariamente la medición del parámetro resultante y comparar dicho valor con el calculado (Vargas y Monroy 2011). No obstante, la aparición de las computadoras cada vez más potentes, la mayor disponibilidad de datos de las estaciones hidrometeorológicas, el desarrollo de software especializado en modelación y los SIG (Sistemas de Información Geográfica) han permitido un desarrollo importante en el campo de la modelación hidrológica (Jorquera et al. 2012).

Actualmente, el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) es el programa de mayor uso a nivel mundial en lo que respecta a la modelación hidrológica debido a que tiene implementados en su programación varios modelos hidrológicos del proceso lluvia-escorrentamiento. De igual forma, utiliza modelos semi-distribuidos, aislados o continuos, modela tanto cuencas rurales como urbanas, es de libre acceso, el más popular y potente de su tipo (Baldemar 2005).

El objetivo central de la investigación radica en la demostración de las disparidades en los resultados de dos modelos hidrológicos utilizados ampliamente por la normativa local, así como en la utilización de las metodologías convencionales con las ventajas que proveen los software especializados, en la idea de que funjan como instrumentos metodológicos que permitan la obtención de parámetros hidrológicos confiables, al reducir la incertidumbre de los modelos que actualmente son utilizados en el diseño o reingeniería de los sistemas de drenaje pluvial de los

centros urbanos vulnerables a inundaciones. Este ejercicio fue aplicado a la cuenca San Juan de Dios, ubicada en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México, la cual se encuentra en un 95% de su superficie urbanizada, es altamente vulnerable a inundaciones y cuenta (a diferencia de otras) con información pluviográfica, pluviométrica y de medición de caudales.

INUNDACIONES EN CUENCAS URBANAS EN MÉXICO

Son conocidos los efectos que genera el proceso urbanístico en las condiciones originales de las cuencas y de la inminente modificación al proceso del escurrimiento. A esto se suma, la ausencia de metodologías hidrológicas válidas para cada una de las zonas altamente antrópicas, así como de medición precisa de la precipitación y del caudal. Por lo que, en México, el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) determinó definir la vulnerabilidad en los centros urbanos ante los fenómenos hidrometeorológicos como una medida de que tan propensa es una localidad o ciudad para experimentar daños debido a fenómenos naturales o antropogénicos como los mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Escala de vulnerabilidad ante inundaciones (CENAPRED 2013)

Vulnerabilidad	Efectos
Alta	Decesos. Daños extraordinarios. Asentamientos irregulares en cauces, planicies de inundaciones o aguas abajo de presas o bordos.
Media	Sin decesos. Daños moderados.
Baja	No hay asentamientos irregulares. Sistema de drenaje eficiente. Daños mínimos.

La mayoría de las cuencas urbanas en México no cuentan con suficiente información hidrométrica, ni metodologías para el análisis de la información pluviográfica o modelos avalados y calibrados en las condiciones que impone el entorno altamente antrópico para la simulación del proceso hidrológico de transformación lluvia-escurrimiento.

A la vez, se han construido obras de carácter pluvial diseñadas con parámetros de gran incertidumbre, que vulneran las condiciones urbanas in situ ante la ocurrencia de eventos climatológicos extraordinarios que provocan inundaciones por una insuficiencia de conducción hidráulica y se ve evidenciado cuando año tras año se presentan inundaciones en diversas ciudades del país como lo muestran las figuras 3 y 4.

UN CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA SAN JUAN DE DIOS EN GUADALAJARA, JALISCO, MÉXICO

El procedimiento que siguió la investigación del caso de estudio se estructuró por las siguientes etapas: análisis de la forma de lluvia, análisis de la cantidad de lluvia, análisis del

caudal, análisis de los datos geomorfológicos, implementación de los modelos lluvia-escurrimiento, modelación hidrológica, validación y calibración.



Figura 3. Inundación en Guadalajara, Jalisco (Lomelí 2013)



Figura 4. Daños por inundaciones en Monterrey, N. L. (El informador 2014)

En la etapa relativa al *análisis de forma de lluvia*; es decir, al cómo se distribuye la precipitación a lo largo de toda la duración de la lluvia, se utilizó la información de una sola estación pluviográfica, que mide en intervalos de 10 minutos y cuenta con un registro de 12 años, dado que es la única estación de este tipo en las cercanías a la cuenca de estudio. En la figura 5 se muestran todas las lluvias de una duración de 60 minutos o menores (lluvia de mayor reincidencia) registradas por la estación en cuestión, en forma de hietogramas adimensionales acumulados. Las líneas en tonos grises representan todos los eventos medidos por la estación, la línea punteada en color rojo es la media de todos estos eventos, la cual constituye el hietograma adimensional sintético representativo para la cuenca de estudio (lluvia de diseño).

Posteriormente, en el *análisis de cantidad de lluvia* relativo a cuánto llueve en una zona particular de estudio fue necesario hacer un análisis espacial y temporal con la información pluviométrica, que es la información hidrometeorológica más común en México. Para el caso de estudio se utilizaron 7 estaciones pluviométricas, con un intervalo de medición de 24 horas y con registros de 27 a 103 años. El análisis espacial se realizó al aplicar la metodología de los polígonos de Thiessen para las estaciones en cuestión (ver figura 6), mientras que para el análisis temporal se realizó un ajuste de probabilidad a cada una de las estaciones pluviométricas para posteriormente, a través de una regresión, obtener los valores de precipitación asociadas con los periodos de retorno más comúnmente usados en México.

El *análisis del caudal* se realizó con los datos de una única estación hidrométrica localizada en el punto de descarga de la cuenca. Debido a que la estación se encuentra sobre un arroyo por el cual también fluye un caudal sanitario (caudal base), fue necesario el análisis del caudal medido por la estación en los días donde no se presentaron lluvias, para así poder determinar el valor de las constantes mensuales de los caudales sanitarios (ver figura 7), los cuales no son generados por lluvias en exceso, y podrían generar un error al comparar el resultado de los modelos hidrológicos con el caudal medido en caso de no restarlo.

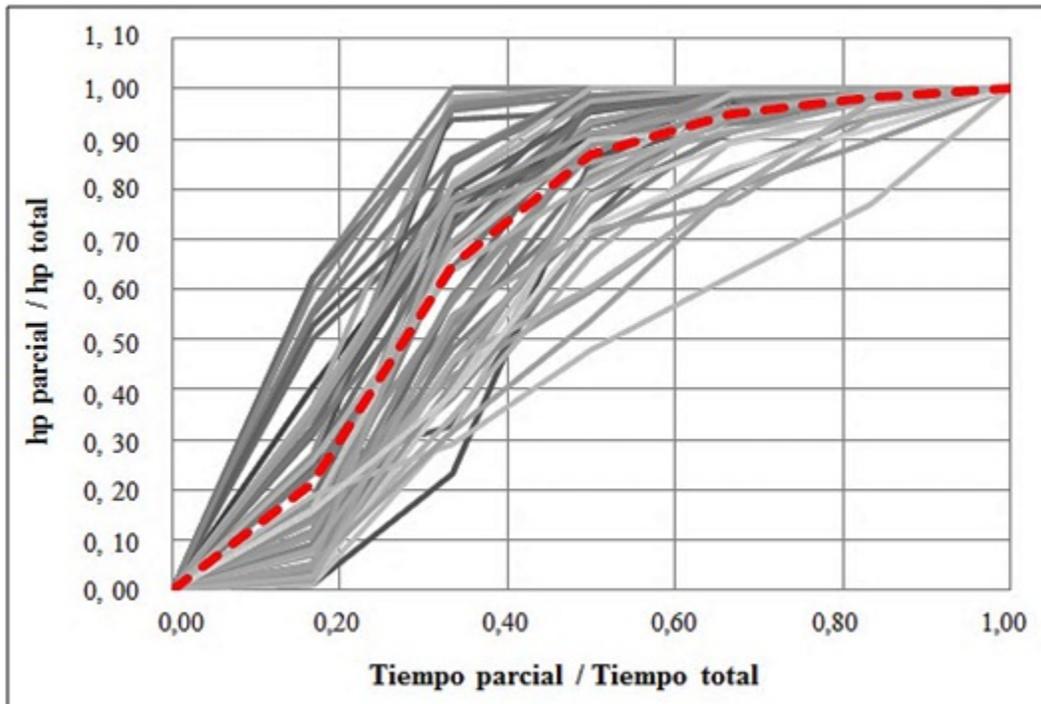


Figura 5. Hietogramas adimensionales medidos y representativos para la cuenca de estudio de lluvias con una duración menor o igual a 60 minutos

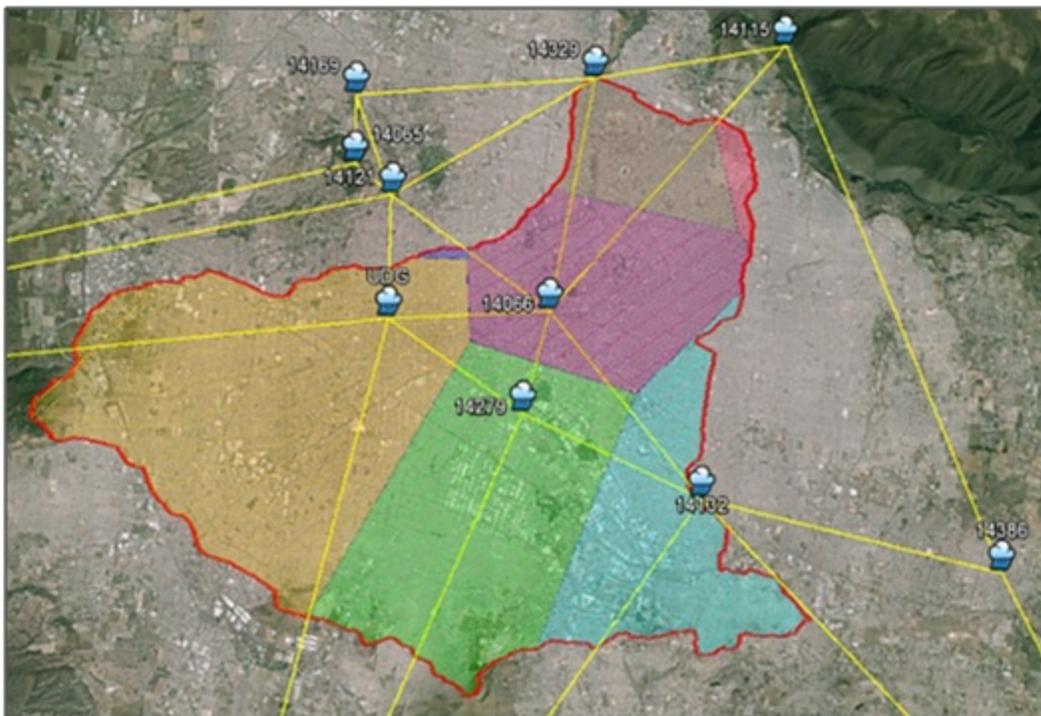


Figura 6. Polígonos de Thiessen para la cuenca San Juan de Dios

Para la determinación de los caudales pluviales se utilizó el caudal máximo anual medido, de cada uno de los 35 años de registro de la estación, aplicando una función de ajuste de probabilidad y por medio de una regresión, obtener el valor del caudal pico pluvial asociado con un periodo de retorno como se muestra en la figura 8.

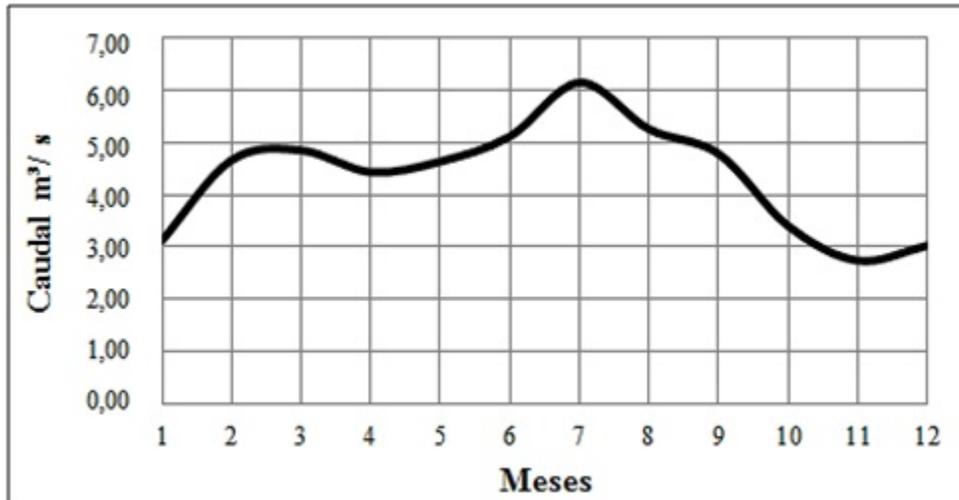


Figura 7. Variación mensual del caudal sanitario medio de la cuenca San Juan de Dios

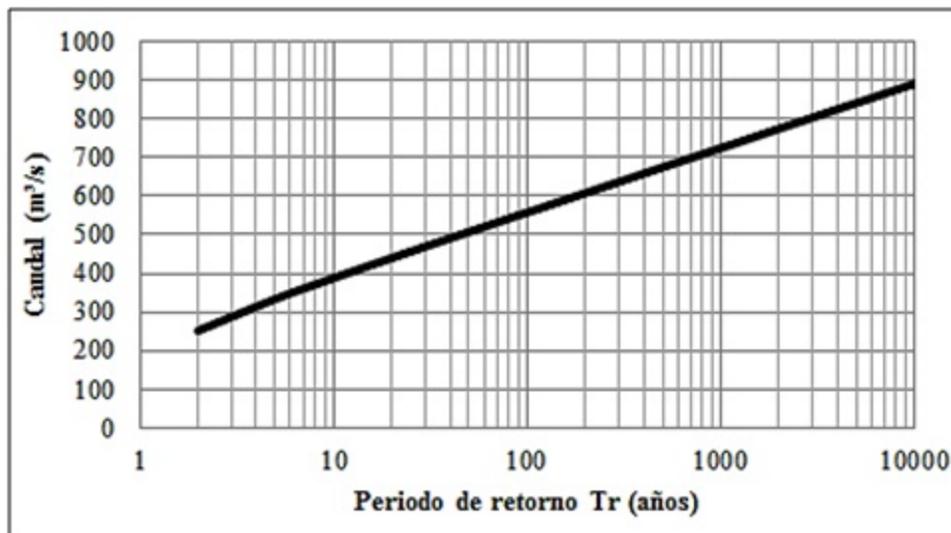


Figura 8. Caudal pluvial pico asociado con un periodo de retorno de la cuenca San Juan de Dios

Dada la extensa cantidad de información existente, el *análisis de los datos geomorfológicos* fue trabajado a través del SIG, el cual permitió obtener los parámetros necesarios para la implementación de los *modelos lluvia-escurrimiento* de manera eficiente.

Para el caso de estudio se decidió modelar como una única cuenca debido a que solo se cuenta con datos de mediciones de caudal en el punto de descarga de la misma. En la figura 9 y 10 se muestran el modelo digital de elevaciones (MDE) y el modelo de la hidrografía original de la

cuenca San Juan de Dios, respectivamente, de los cuales se obtuvieron varios parámetros de alimentación de los modelos hidrológicos a implementar.

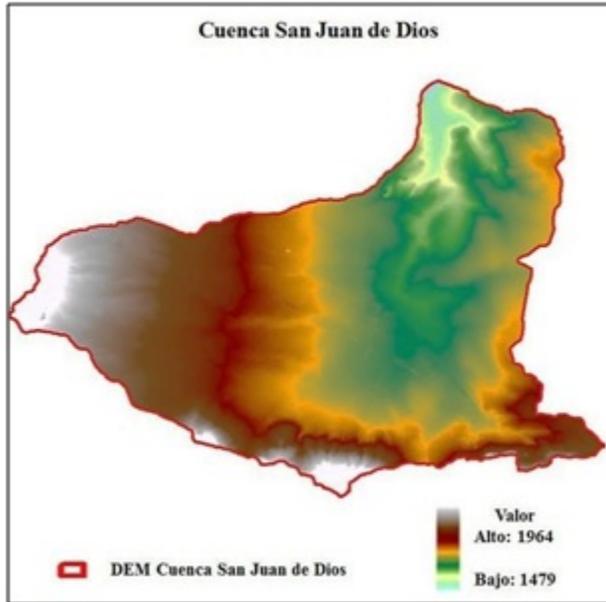


Figura 9. Modelo digital de elevaciones

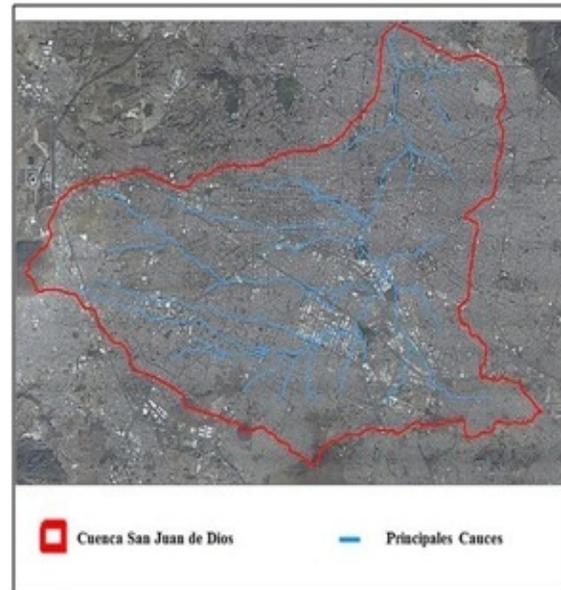


Figura 10. Hidrografía natural en contraste con la urbanización actual

La *modelación hidrológica* se realizó en 3 escenarios, en los cuales se utilizaron lluvias asociadas con varios periodos de retorno, los cuales se denominaron:

- El Método SCS (Soil Conservation Service) con lluvia de diseño propuesta por la presente investigación (hietograma de diseño).
- El Método SCS con lluvia media avalada por la normativa actual.
- El Método racional actualmente requerido por el organismo operador municipal.

Los métodos hidrológicos que se utilizaron para la simulación de los diferentes procesos hidrológicos de los dos primeros escenarios vienen indicados en la tabla 3, mientras que los métodos que se utilizaron en el tercer escenario se encuentran indicados en la tabla 4.

La *validación* del método de menor incertidumbre resulta al comparar el resultado del caudal pico de los modelos contra el calculado en el análisis de caudales medidos para un mismo periodo de retorno.

Finalmente, la *calibración* se logra al hacer variar el parámetro de mayor incertidumbre dentro del modelo hasta que el gasto pico del modelo coincida con el obtenido en el análisis del caudal pluvial medido para un mismo periodo de retorno. Para el caso de estudio será el valor del número de curva.

Tabla 3. Métodos utilizados en los dos primeros escenarios de modelación

Proceso hidrológico	Modelo	Parámetros
Modelo de pérdidas	Numero de curva SCS	CN (número de curva), pérdida inicial, área impermeable.
Modelo de tránsito por el conducto principal de la cuenca	Muskingum-Cunge	Longitud, pendiente media, coeficiente de Manning, geometría transversal.
Modelo de transformación lluvia escurrimiento	Hidrograma unitario SCS	Tiempo de retardo, área de la cuenca, hietograma de lluvia de diseño (primer escenario) o lluvia media (segundo escenario).
Modelo de representación de gasto base	Constante mensual	Valor del gasto base de cada mes.

Tabla 4. Métodos utilizados en el tercer escenario de modelación

Proceso hidrológico	Modelo	Parámetros
Modelo de pérdidas	Coeficiente de escurrimiento	Ce
Modelo de tránsito por el conducto principal de la cuenca	No se pide ningún modelo para este proceso.	-
Modelo de transformación lluvia escurrimiento	Método racional	Intensidad de lluvia de diseño, área de la cuenca.
Modelo de representación de gasto base	No se pide ningún modelo para este proceso.	-

En efecto, el número de curva es el valor de mayor incertidumbre dentro de los parámetros de modelación, dado que la información base (planes parciales y mapa edafológico, o uso y tipo de suelos), se encuentran en una escala que generaliza prácticamente toda la cuenca en un solo tipo de suelo y al ser una cuenca de tamaño considerable (136,34 km²) genera un valor considerablemente incierto.

El número de curva (*CN*) es una variable del método de pérdidas de la precipitación SCS (Soil Conservation Service) que calcula pérdidas iniciales (retención) y pérdidas mayores (infiltración) para de esta forma conocer la precipitación en exceso (*Pe*), a través de la ecuación (1).

$$C = \frac{(P - 0,20 * S)^2}{(P + 0,80 * S)} \quad (1)$$

Donde P es la precipitación total acumulada (mm) y S es un parámetro llamado retención máxima de humedad del suelo. S dependerá principalmente del tipo de suelo, la vegetación y el uso, todos estos parámetros están relacionados por el número de curva (CN) por la ecuación (2).

$$S = \frac{25\,400,00}{CN} - 254,00 \quad (2)$$

Finalmente al sustituir la ecuación (2) en (1) se obtiene:

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{5\,080,00}{CN} - 50,80\right)^2}{\left(\frac{20\,320,00}{CN} - 203,20\right)} \quad (3)$$

Donde la precipitación mínima para que exista una lámina de escurrimiento directo será:

$$P_{min} = \frac{5\,080,00}{CN} - 50,80 \quad (4)$$

La ecuación (3) es la ecuación empírica propuesta por el SCS para estimar el escurrimiento efectivo, y aunque no es una fórmula formal de infiltración permite estimar con fines prácticos las pérdidas de precipitación para cada tipo y uso de suelo.

En la figura 11 se hace un resumen en forma de esquema conceptual de la metodología que se utilizó en la simulación de los procesos hidrológicos para la obtención, en los tres escenarios, de los caudales picos así como de la calibración de dichos modelos.

DIVERGENCIAS EN LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA CUENCA SAN JUAN DE DIOS

Al aplicar la metodología anteriormente propuesta se obtuvieron los resultados de la tabla 5 y figura 12 respectivamente.

De lo anterior y tomando en cuenta las variaciones en los promedios para cada método se infiere lo que se explica a continuación.

Hay una variación media del 3,43 % para el método SCS con la lluvia de diseño propuesta, del 9,38 % para el método SCS con la lluvia media y una variación del 317,72 % para el método racional respecto al observado

Con los presentes datos se avala que el método con menor disparidad y por tanto con mayor certeza dentro de los 3 comparados recae en el *método SCS con la lluvia de diseño* propuesto por la presente investigación. En tanto se asemeja con mayor precisión a los valores medidos.

De la calibración de este modelo se obtuvieron los resultados para diferentes periodos de retorno como aparecen mostrados en la tabla 6 y figura 13.

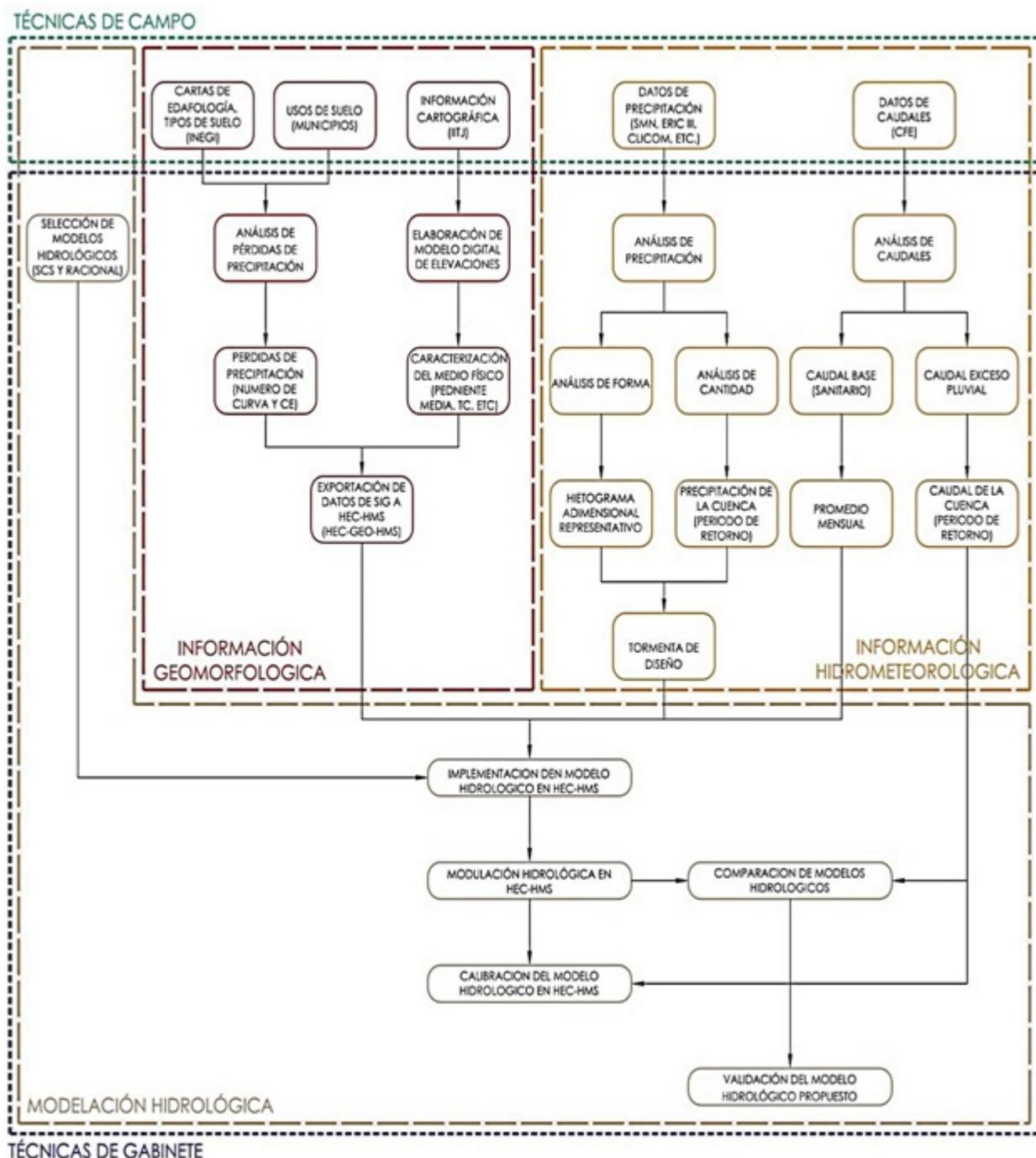


Figura 11. Esquema conceptual de la metodología propuesta en esta investigación

Tabla 5. Comparativa de caudales picos obtenidos en los 3 escenarios de modelación versus caudales picos obtenidos de las mediciones

Caudal (m ³ /s)					Variaciones		
TR	Observado	SCS – Lluvia de diseño	SCS - Lluvia Media	Racional	SCS - Lluvia de diseño	SCS - Lluvia Media	Racional
2	251,54	264,50	245,30	1085,59	5,15%	2,48%	310,43%
5	333,65	336,00	311,30	1361,20	0,70%	6,70%	305,12%
10	388,01	382,70	354,50	1569,69	1,37%	8,64%	310,16%
15	418,68	413,60	383,00	1691,65	1,21%	8,52%	309,01%
20	440,15	441,90	409,20	1778,18	0,40%	7,03%	302,39%
25	456,69	463,40	429,10	1845,30	1,47%	6,04%	298,21%
50	507,65	506,60	469,10	2053,78	0,21%	7,59%	305,41%
100	558,22	553,20	512,10	2262,27	0,90%	8,26%	308,94%
500	675,10	637,10	589,60	2746,37	5,63%	12,66%	331,07%
1000	725,35	680,00	629,40	2954,86	6,25%	13,23%	334,54%
5000	841,96	767,90	710,70	3438,96	8,80%	15,59%	347,84%
10000	892,18	811,50	751,00	3647,45	9,04%	15,82%	349,47%
				Promedio	3,43%	9,38%	317,72%

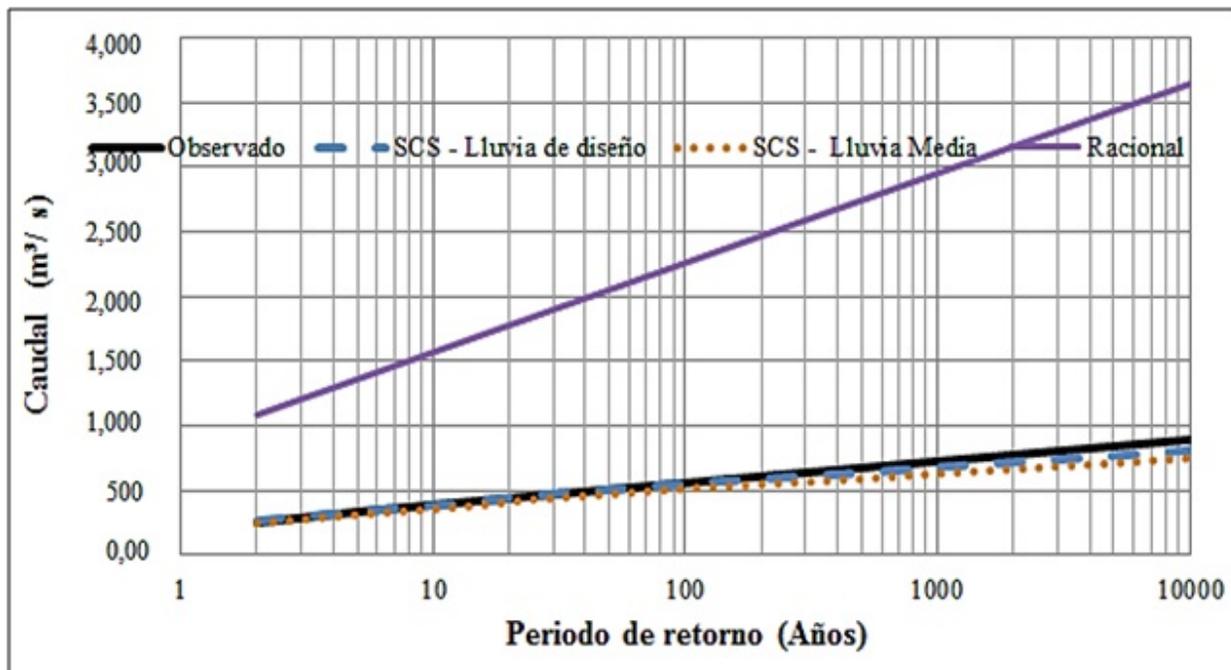


Figura 12. Caudales pico de la modelación versus caudales de las mediciones

Tabla 6. Variación del número de curva en referencia a diferentes periodos de retorno

Variación de CN			
TR	Valor Inicial	Valor Calibrado	Diferencia
2	72,98	35,00	52%
5		64,17	12%
10		84,17	15%
15		84,06	15%
20		68,69	6%
25		54,67	25%
50		72,98	0%
100		80,79	11%
500		99,00	36%
1000		99,00	36%
5000		99,00	36%
10000		99,00	36%
Promedio			23%

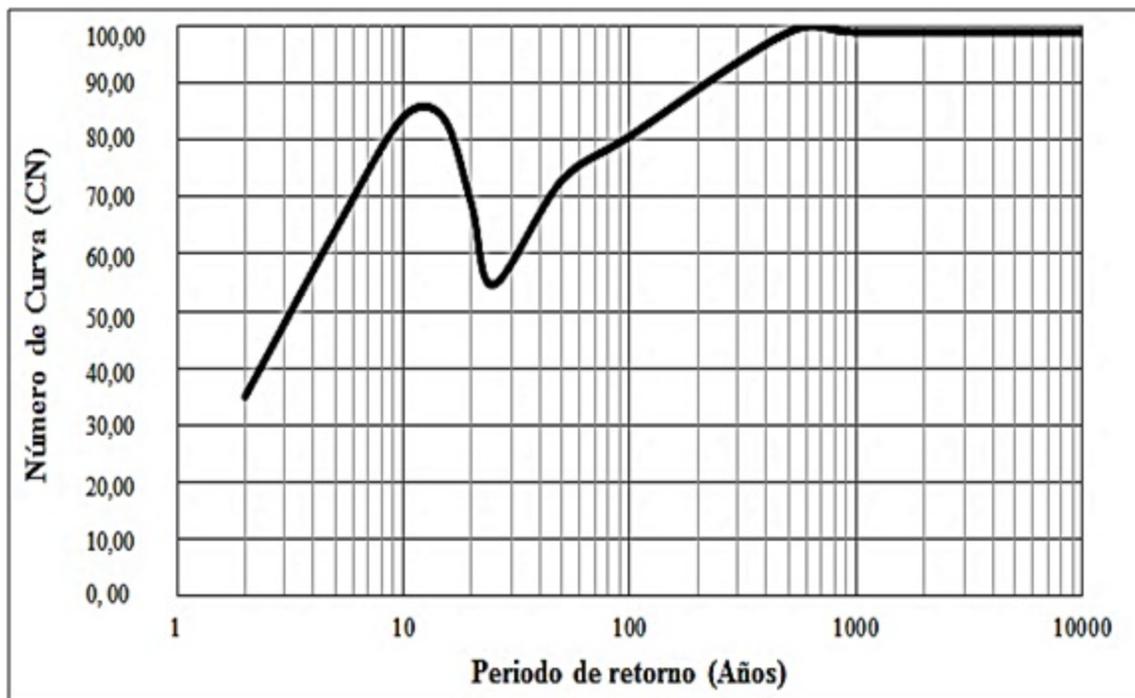


Figura 13. Variación del número de curva al calibrar el modelo para diferentes periodos de retorno

CONCLUSIONES

Se ha podido constatar que la metodología para la modelación hidrológica de cuencas urbanas vulnerables propuesta en esta investigación, que se basa en el análisis integral de diversas herramientas informáticas, genera resultados con mayor aproximación a los datos de medición que la metodología justificada actualmente por la normativa. Bajo esta misma metodología, es posible simular cuencas urbanas vulnerables que cuenten con datos de información pluviográfica e información de caudales asociados con la misma cuenca, aunque estos datos no sean simultáneos.

El uso de herramientas como software especializados en modelación hidrológica y los sistemas de información geográfica son indispensables para la simulación de cualquier proceso hidrológico debido a las posibilidades que brindan, en ahorro de tiempo, procesamiento de grandes bases de datos, exportación rápida de información, visualización y análisis eficiente.

El análisis de los datos pluviográficos presentado en esta investigación para la obtención de lluvias de diseño que tome en cuenta la variabilidad temporal, espacial y forma de la lluvia constituye un aporte que facilita el trabajo, en vista de que existe escasa información al respecto. No obstante, de la calibración del modelo propuesto se obtuvo que el rango donde se presentaron valores lógicos del número de curva aparecen dentro de un intervalo entre los 5 a 100 años de periodo de retorno. Mientras que, fuera de este rango, los valores calibrados del número de curva quedan en el límite lógico del mismo sin alcanzar el caudal medido.

No obstante, es preciso acotar que es necesario efectuar un análisis detallado de los usos y tipos del suelo a nivel micro, el cual deberá de tomar en cuenta los planes parciales, así como la idea de discretizar los datos de lluvia extremos generados por eventos atemporales como el fenómeno *el niño* o *la niña*. Asimismo, es imprescindible:

- Depurar los datos pluviográficos y pluviométricos de todas las estaciones usadas.
- Simular para las otras duraciones de lluvias de diseño del caso de estudio y analizar la variación de los resultados con cada duración específica.
- Emplear la metodología propuesta en la determinación de lluvias de diseño en diferentes regiones del país para definir zonas homogéneas.
- Aplicar la metodología de la lluvia de diseño propuesta en lugares donde se tengan dos estaciones pluviográficas cercanas.
- Analizar las lluvias de diseño generadas por dos o más estaciones pluviográficas y su variación con respecto a la distancia entre las estaciones, realizar un análisis hidráulico de la infraestructura de drenaje pluvial del caso de estudio, transitando el hidrograma generado por la metodología propuesta, para obtener el funcionamiento hidráulico de la red.
- Complementar la presente investigación con un estudio sobre la afectación del cambio de uso de suelo de zonas urbanas en el funcionamiento del sistema de drenaje actual.

Estos ejercicios citados anteriormente son factores que coadyuvan a la toma de decisiones con provisión de mayor certeza al objetivo, dimensionamiento y construcción de las obras hidráulicas.

REFERENCIAS

- Baldemar A.** (2005). “Aplicación hidrológica de los radares meteorológicos”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- CENAPRED** (2013). “Sistema de Alerta Temprana para Fenómenos Hidrometeorológicos”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, UNAM, México, extraído de: <http://geografica.cenapred.unam.mx/SIGMAFH/informacion.php>. en octubre de 2012.
- Chow, V. T.** (1994). “Hidrología aplicada”, McGraw Hill, México.
- Jorquera E., Weber J. y Reyna S.** (2012). “Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada”, Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos, Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina, pp. 1-18.
- Lomelí J.** (2013). “Inundaciones: 55% de calles sin drenaje pluvial”, Periódico La Unión, Jalisco, México, extraído de <http://www.unionjalisco.mx/articulo/2013/07/17/ciudadanos/guadalajara/inundaciones-55-de-calles-sindrenaje-pluvial> en septiembre 2013.
- Palacios S.** (2004). “Modelo para manejo de la incertidumbre hidrológica en la planificación de la operación del SIC”. Tesis de Licenciatura. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Rodríguez Y.** (2011). “Modelación hidrológica de avenidas: caso de estudio Cuenca del Río Zaza”, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Vargas A. y Monroy J.** (2011). “Estudio del comportamiento de modelos hidrológicos bajo un análisis de sensibilidad e incertidumbre”, Ingeniería de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, Núm. 10, enero-diciembre, 2011, pp. 65-77, Universidad del Valle, Bogotá.
- El informador** (2014). “Inundaciones y caos en Monterrey, por intensas lluvias”, Periódico El informador, Jalisco, México, extraído de: <http://www.informador.com.mx/mexico/2014/550128/6/inundaciones-y-caos-en-monterrey-por-intensas-lluvias.htm> en octubre 2014.