

Análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo *RUNOFF-SWMM*

José Luis Macor

Universidad Nacional del Litoral, Argentina

Los modelos hidrológicos de diseño de drenaje urbano suponen la variabilidad espacial de los parámetros de una cuenca, subdividiéndola en subcuencas, cuyos parámetros son espacialmente concentrados. El bloque RUNOFF del Storm Water Management Model (SWMM) usa esta técnica, considerando a las subcuencas como reservorios no lineales. Uno de los parámetros que dicho bloque tiene en cuenta es el ancho de subcuenca (W), el cual varía según la idealización que el modelista haya hecho de la subcuenca. Este parámetro influirá en los hidrogramas de diseño. En este trabajo se presenta un análisis comparativo del parámetro W sobre ocho subcuencas urbanas de la ciudad de Santa Fe, Argentina. El análisis se realiza para varios eventos lluviosos.

Palabras clave: modelos hidrológicos, variación areal de parámetros, ancho de cuenca, reservorios no lineales, cuenca urbana, hidrograma de diseño, idealización de cuenca.

Introducción

Los problemas hídricos en ambientes urbanos tienen su origen en el desarrollo, muchas veces poco planificados, de los asentamientos humanos y han adquirido una gran relevancia en las últimas décadas. Con el advenimiento de las computadoras, que permiten realizar cálculos a alta velocidad, se han desarrollado herramientas cada vez más potentes y sofisticadas para el análisis de estos problemas.

Muchos modelos hidrológicos, tanto de simulación como de diseño de sistemas de drenaje, consideran la variación espacial de los parámetros que caracterizan a una cuenca a través de la discretización de la misma en subcuencas espacialmente concentradas.

Entre los modelos que utilizan esta modalidad está el bloque *RUNOFF* del *Storm Water Management Model* (SWMM). Este modelo idealiza a las subcuencas como reservorios no lineales. Dentro de los parámetros que caracterizan a estos reservorios podemos citar el área superficial, la pendiente, la rugosidad y el ancho de cuenca (W).

Generalmente, en el proceso de calibración de los modelos se utiliza la rugosidad como parámetro de ajuste. No obstante, si la rugosidad y la pendiente son fijas, el

parámetro W puede considerarse para alterar la forma del hidrograma y ajustarlo al observado (Huber y Dickinson, 1992).

Sin embargo, si la finalidad es el diseño de sistemas de drenaje, el valor del parámetro W dependerá de la idealización que el modelista haga de las subcuencas. Las diferencias existentes entre una u otra idealización pueden conducir a subestimar o sobrestimar los caudales de diseño.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar un análisis comparativo del parámetro ancho de cuenca del modelo *Storm Water Management*, aplicado a varias microcuencas urbanas de la ciudad de Santa Fe, Argentina, para distintos eventos lluviosos registrados.

El modelo *Storm Water Management Model* (SWMM)

Los modelos matemáticos resultan ser una herramienta importante en el análisis tanto cuantitativo como cualitativo de los problemas generados por los escurrimientos pluviales urbanos y del manejo que de ellos se haga.

El modelo *Storm Water Management* (SWMM) permite simular y predecir escurrimientos y calidad de agua. Fue desarrollado a principios de la década de los setenta,

bajo el auspicio de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) y es uno de los modelos de diseño y simulación más avanzados. Originalmente se desarrolló como modelo de evento único (Metcalf y Eddy Inc., 1971), pero la versión 4.0 permite la simulación tanto en forma de evento único como de evento continuo (Huber y Dickinson, 1992).

El modelo SWMM está organizado en bloques computacionales: *RUNOFF*, *Transport*, *Extran*, *Storage/Treatment*, *Statistics* y otros, además del bloque *Executive*, que permite la ejecución coordinada de todos ellos. Los bloques pueden ser corridos de forma secuencial o por separado, generando archivos de interface que permiten ser utilizados como entrada al siguiente bloque.

El bloque *RUNOFF*

Básicamente, este bloque permite el proceso de transformación lluvia-escorrentía. Es el encargado de generar escurrimiento superficial y subsuperficial a partir de la topografía, hietogramas, condiciones antecedentes y uso del suelo. Realiza la propagación del flujo y la carga contaminante tanto en cuenca como en cauce, considerándolos como reservorios no lineales espacialmente concentrados.

Cada subcuenca en que es discretizada la cuenca por el modelista es subdividida a su vez en tres áreas: permeable, impermeable con almacenamiento y sin almacenamiento en depresión, lo cual se esquematiza en la ilustración 1. La propagación o "ruteo" del flujo en

canales y conductos se realiza de forma análoga a las subcuencas.

Para descontar las pérdidas por infiltración de las áreas permeables se utilizan opcionalmente las ecuaciones de Horton (1933, 1940) o Green y Ampt (1911).

Ecuaciones básicas

Se asume que las subcuencas se comportan como reservorios no lineales, en los que se relacionan sus entradas y salidas. En la ilustración 2 se muestra un esquema de la representación del reservorio no lineal. La salida hacia los canales o tuberías se calcula como el producto de la velocidad (obtenida de la ecuación de Manning), la profundidad y el ancho de escurrimiento (Huber y Dickinson, 1992). El caudal es generado despreciando los términos de inercia y presión de la ecuación dinámica:

$$Q = W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} S^{1/2} \quad (1)$$

donde W es el ancho de la subcuenca; n , el coeficiente de rugosidad de Manning; d , la profundidad del agua en el reservorio; d_p , la profundidad del almacenamiento en depresión, y S , la pendiente de la subcuenca.

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai - Q \quad (2)$$

Siendo V el volumen de agua en la subcuenca; d , la profundidad; t el tiempo; A , el área superficial de la subcuenca; i , la intensidad de la lluvia neta, y Q , el caudal a la salida.

Ilustración 1. Esquema de la subcuenca.

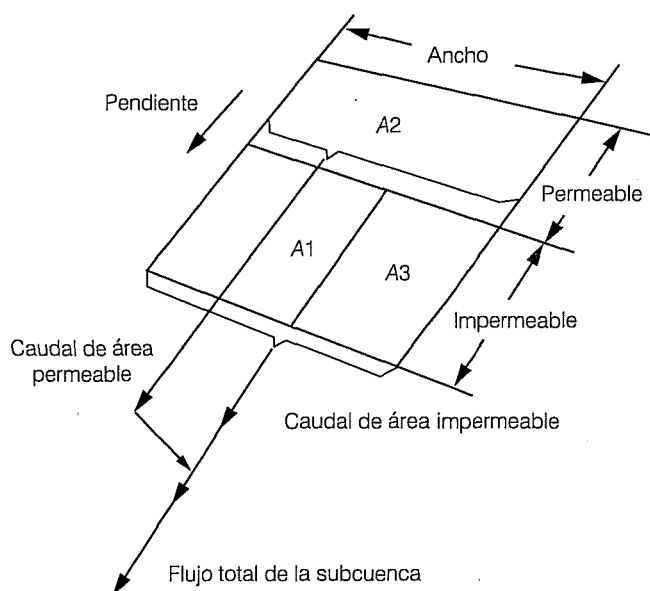
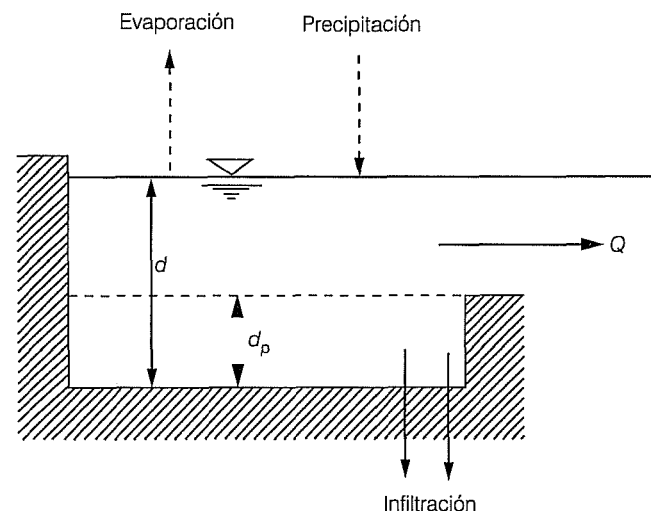


Ilustración 2. Esquema del reservorio no lineal.



Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la ecuación diferencial del reservorio no lineal:

$$\frac{dd}{dt} = i - W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} S^{1/2} \quad (3)$$

La ecuación 3 se resuelve en cada paso de tiempo mediante un esquema de diferencias finitas simples, el cual resulta ser:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i - \frac{WS^{1/2}}{An} \left(d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right)^{5/3} \quad (4)$$

Los subíndices 1 y 2 en la ecuación precedente indican el inicio y el fin de un paso de tiempo, respectivamente; Δt es el intervalo de tiempo.

La ecuación discretizada del reservorio no lineal se resuelve para la incógnita d_2 mediante el método iterativo de Newton-Raphson (Huber y Dickinson, 1992). Nótese que el parámetro W es directamente proporcional a la incógnita.

Ancho de la subcuenca

Si se considera al flujo superficial escurriendo pendiente abajo de una subcuenca idealizada como un plano rectangular, entonces el ancho de la subcuenca es el ancho físico del escurrimiento en el plano (ilustración 3) y puede calcularse como:

$$W = A/L \quad (5)$$

donde A es el área de la subcuenca y L , la longitud media del flujo.

Si la subcuenca se idealiza como dos áreas simétricas que aportan a un canal principal central (ilustración 4), el ancho total es dos veces la longitud del canal de drenaje:

$$W = 2L \quad (6)$$

donde L es la longitud media del flujo.

En general, las subcuencas reales no son rectangulares ni tienen propiedades de simetría y uniformidad (ilustración 5), por lo cual se recurre a otro procedimiento para obtener el ancho de la subcuenca. Para resolver este último caso se introduce un factor de sesgo (Digiano *et al.*, 1977), el cual se calcula de la siguiente forma:

$$S_k = (A_2 - A_1) / A \quad (7)$$

siendo S_k el factor de sesgo, $0 \leq S_k \leq 1$, A_1 el área menor de un lado del canal de drenaje, A_2 el área mayor del otro lado del canal y A el área total de la subcuenca. W se estima como:

$$W = (2 - S_k)L \quad (8)$$

Ilustración 3. Esquema en un plano.

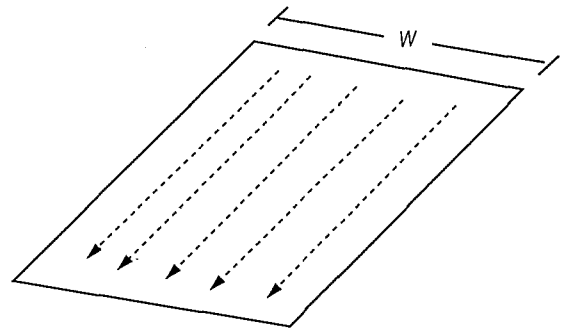


Ilustración 4. Esquema en planos simétricos.

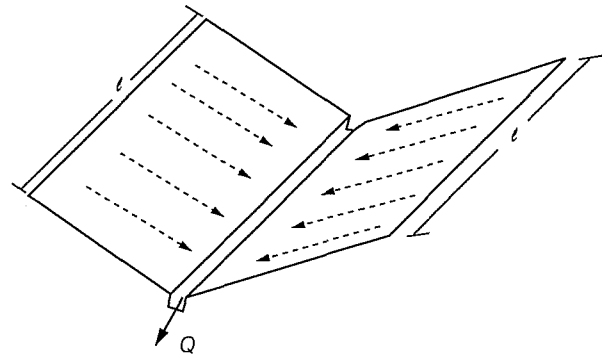
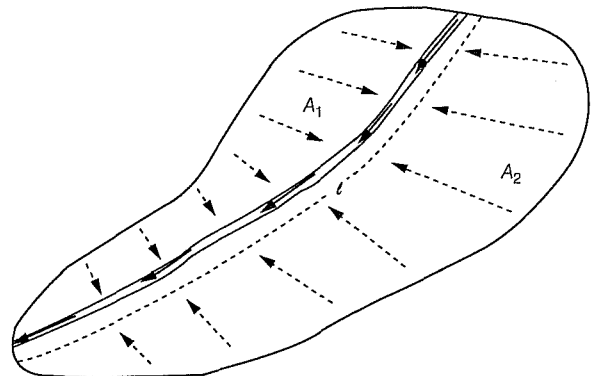


Ilustración 5. Esquema en planos asimétricos.



Si se tiene en cuenta que el tiempo de concentración es el tiempo que tarda en viajar la onda desde el punto más remoto de la cuenca hasta la salida y expresándolo mediante la formulación de la onda cinemática:

$$t_c \left(\frac{L}{ai^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (9)$$

donde t_c es el tiempo de concentración; L , la longitud de la subcuenca; i , la intensidad de lluvia neta, y a y m son parámetros de la onda cinemática.

Es evidente que si el ancho de la subcuenca disminuye, la longitud del flujo aumenta para la misma superficie de acuerdo con la ecuación:

$$L = \frac{A}{W} \quad (10)$$

y, en consecuencia, aumenta el tiempo de concentración t_c .

En el proceso de propagación a través de un reservorio no lineal como el planteado en el bloque RUNOFF, el parámetro W tiene el siguiente efecto sobre el hidrograma: si disminuye, el hidrograma se amortigua aumentando el almacenamiento, y si aumenta, el hidrograma se empunta y el flujo alcanza la salida más rápido.

Análisis sobre subcuencas reales

Calibración del modelo SWMM

Previo al análisis del parámetro W , se implementó y calibró el modelo SWMM a la cuenca urbana piloto Guadalupe Oeste de la ciudad de Santa Fe, Argentina.

La zona en estudio se caracteriza por tener una topografía plana, con pendientes del orden del uno por mil. En los últimos años ha sufrido un fuerte proceso de urbanización, con lo que el área impermeable ha alcanzado a cubrir aproximadamente el 50% del total, mientras que el área impermeable directamente conectada al sistema de drenaje representa el 36%. En general, el suelo está destinado a uso residencial, existiendo espacios abiertos no desarrollados (Collins *et al.*, 1997).

La cuenca se desagregó para una escala computacional de detalle (micro escala) (ilustración 6). Se calibró la rugosidad para las áreas permeables e impermeables de la cuenca, ajustando los hidrogramas simulados a los hidrogramas observados para varios eventos. En el cuadro 1 se presenta un resumen de las calibraciones realizadas.

Los valores de rugosidad medios para las áreas permeables e impermeables obtenidos de la calibración fueron de 0.250 y 0.100, respectivamente. Estos valores de rugosidad están dentro del rango establecido por De Vries y Mc Arthur (1979).

Donde n son los coeficientes de rugosidad; Q_o es el caudal pico observado; V_o , el volumen escurrido observado, y t_o , el tiempo pico observado. Q_p es el caudal pico simulado; V_s , el volumen escurrido simulado, y t_p , el tiempo al pico simulado. ErQ , ErV y ErT son los errores relativos de caudal pico, volumen y tiempo al pico, respectivamente.

En las ilustraciones 7, 8 y 9 se presentan los gráficos comparativos entre los valores simulados y los valores observados del caudal pico, del volumen y de los tiempos al pico, respectivamente, a fin de mostrar mejor las calibraciones.

Análisis del parámetro W

Para el análisis del parámetro W se seleccionaron ocho subcuencas del área Guadalupe Oeste en la ciudad de Santa Fe, Argentina (ilustración 10).

En el cuadro 2 se presentan los parámetros sobresalientes de cada subcuenca seleccionada.

Se aplicaron cinco tormentas registradas en el año 1995, cuyas características se detallan en el cuadro 3 (Pedraza *et al.*, 1995).

En este análisis se consideran las tres posibles idealizaciones mencionadas. En el caso A, las subcuencas se toman como planos únicos sobre los que el flujo escurre hacia la salida. El parámetro W se obtiene según la ecuación 5.

Ilustración 6. Discretización de detalle (micro escala).



Cuadro 1. Resumen de calibraciones.

	07/03/95	28/04/95	05/05/95	28/02/96	11/03/96	15/06/96
Parámetros						
n permeable	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
n impermeable	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Observados						
Q_o (m ³ /s)	3.49	1.01	0.75	0.88	0.95	1.43
V_o (m ³ /s)	4.98E+04	9.22E+03	9.13E+03	6.17E+03	1.05E+04	2.18E+04
t_o (min)	60	80	210	70	210	310
Resultados						
Q_p (m ³ /s)	3.73	1.11	0.74	0.99	1.06	1.20
V_s (m ³)	4.08E+04	9.50E+03	1.03E+04	7.62E+03	1.20E+04	2.07E+04
t_p (min)	80	85	200	95	220	306
Coef. correlac.	0.64	0.97	0.85	0.77	0.83	0.94
ErQ (%)	6.7	9.9	1.3	12.5	11.6	16.1
ErV (%)	18.0	3.0	12.8	23.5	14.3	5.1
ErT (%)	33.3	6.2	4.8	35.7	4.8	1.3

Ilustración 7. Caudales simulados versus caudales observados.

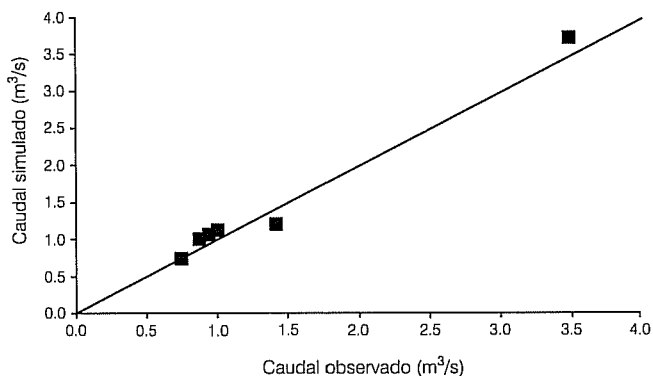


Ilustración 9. Tiempos al pico simulados versus tiempos al pico observados.

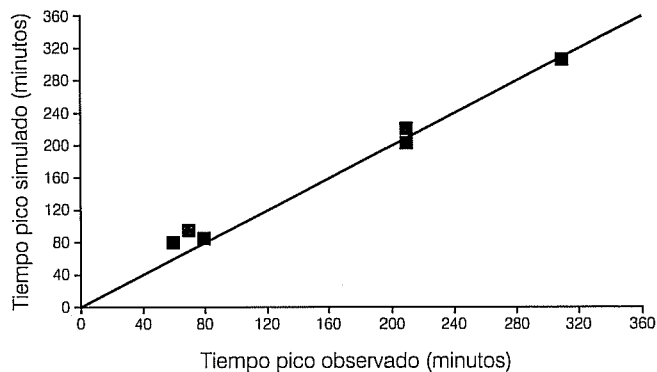


Ilustración 8. Volúmenes simulados versus volúmenes observados.

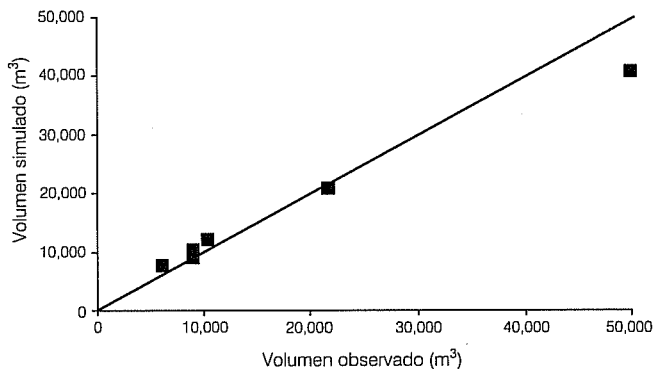
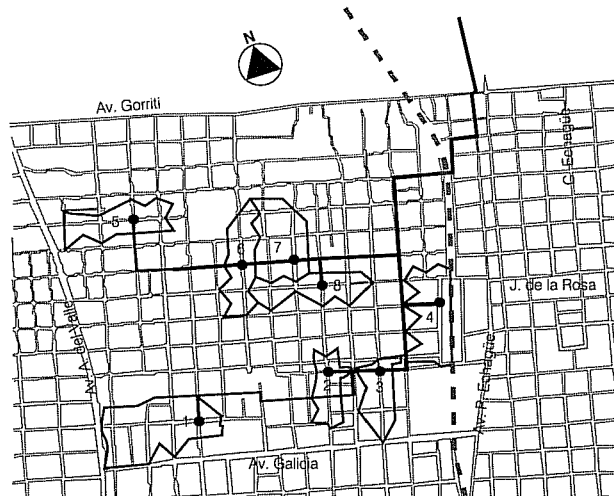


Ilustración 10. Ubicación subcuencas seleccionadas.



Cuadro 2. Parámetros de las subcuencas seleccionadas.

Subcuenca	Área (ha)	Longitud del flujo (m)	Pendiente (m/m)	Impermeabilidad (%)
1	10.76	361.0	0.00208	51
2	2.50	185.0	0.00264	50
3	3.63	226.0	0.00194	50
4	5.94	251.0	0.00222	45
5	4.69	292.0	0.00099	40
6	5.16	225.0	0.00225	37
7	6.17	265.0	0.00232	37
8	4.60	217.0	0.00253	45

Cuadro 3. Características de las tormentas consideradas.

Tormenta	Intensidad máxima (mm/h)	Duración (min)	Lámina total precipitada (mm)
7/03/95	198	295	58.5
8/04/95	90	255	56.4
1/05/95	108	155	42.7
3/10/95	72	80	23.0
8/11/95	90	55	27.0

En el caso B, las subcuencas se idealizan como dos planos simétricos que aportan en forma concentrada a un canal central de drenaje y donde el parámetro W se calcula de acuerdo con la ecuación 6.

Finalmente, el caso C corresponde a subcuencas idealizadas como dos planos asimétricos que aportan de manera concentrada a un canal de drenaje, calculándose el parámetro W según la ecuación 8.

En el cuadro 4 se presentan los valores del parámetro W para cada cuenca y para los tres casos considerados.

Resultados de la simulación

En el cuadro 5 se presentan los hidrogramas simulados a través del bloque *RUNOFF* para cada caso y para cada una de las subcuencas tomadas en cuenta en el análisis.

En todos los eventos considerados puede observarse que los casos B y C generan caudales picos superiores a los caudales pico del caso A.

En el cuadro 6 se presenta la variación de los caudales pico obtenidos de las simulaciones para cada caso y para cada subcuenca considerada.

Cuadro 4. Valores del parámetros W .

Subcuenca	W (m)		
	Caso A	Caso B	Caso C
1	298.0	722.0	621.0
2	135.0	370.0	353.0
3	161.0	452.0	398.0
4	237.0	502.0	366.0
5	161.0	584.0	534.0
6	229.0	450.0	400.0
7	233.0	530.0	458.0
8	212.0	434.0	384.0

En las ilustraciones 11 a 18 se presentan los hidrogramas simulados obtenidos del modelo *SWMM*, empleando los tres casos de idealización de subcuencas para el evento ocurrido el 7 de marzo de 1995.

Conclusiones

Para el diseño de sistemas de drenaje urbano, el bloque *RUNOFF* permite determinar los hidrogramas a partir de la transformación lluvia-escorrentía. En función de la idealización que el modelista haga de las subcuencas en que ha discretizado su cuenca urbana, resultará el valor del parámetro ancho de subcuencas (W), el cual influirá sobre los hidrogramas calculados.

Puede observarse que para el experimento realizado sobre las ocho subcuencas de la cuenca urbana piloto Guadalupe Oeste de la ciudad de Santa Fe, el porcentaje de variación que hay entre tomar en cuenta el caso A y B varía entre un 18 y un 55%, mientras que la variación entre los casos A y C se ubica entre un 15 y un 53%. La variación

Cuadro 5. Hidrogramas simulados.

Subcuenca	Caso	Caudales pico (m ³ /s) Tormenta				
		07/03/95	08/04/95	01/05/95	03/10/95	08/11/95
1	A	1.54	0.70	1.17	0.58	0.77
	B	2.77	1.08	1.62	0.86	1.03
	C	2.54	1.01	1.55	0.82	0.97
2	A	0.61	0.24	0.36	0.19	0.23
	B	0.94	0.34	0.51	0.25	0.34
	C	0.93	0.34	0.50	0.25	0.33
3	A	0.71	0.30	0.47	0.24	0.30
	B	1.22	0.45	0.65	0.34	0.44
	C	1.16	0.43	0.62	0.33	0.42
4	A	1.10	0.46	0.73	0.37	0.47
	B	1.68	0.65	0.92	0.47	0.62
	C	1.43	0.57	0.85	0.43	0.55
5	A	0.57	0.26	0.43	0.21	0.29
	B	1.26	0.50	0.70	0.34	0.48
	C	1.21	0.48	0.68	0.33	0.46
6	A	0.97	0.41	0.62	0.30	0.41
	B	1.38	0.55	0.76	0.36	0.53
	C	1.31	0.52	0.74	0.35	0.51
7	A	1.06	0.45	0.70	0.33	0.46
	B	1.65	0.66	0.91	0.43	0.63
	C	1.54	0.62	0.88	0.42	0.60
8	A	0.97	0.40	0.61	0.31	0.39
	B	1.41	0.53	0.75	0.38	0.52
	C	1.33	0.51	0.72	0.37	0.49

Cuadro 6. Resultados de las simulaciones.

Subcuenca	Caso	Variación del caudal pico (%) Tormenta					Variación media (%)
		07/03/95	08/04/95	01/05/95	03/10/95	08/11/95	
1	A-B	44	36	28	33	25	33
	A-C	39	31	24	30	21	29
	B-C	8	6	4	5	6	6
2	A-B	36	29	29	23	32	30
	A-C	35	28	27	22	31	29
	B-C	1	1	2	1	2	1
3	A-B	42	34	28	29	31	33
	A-C	39	32	24	27	28	30
	B-C	5	4	5	3	5	4
4	A-B	35	29	21	23	24	26
	A-C	23	19	14	15	13	17
	B-C	15	12	8	9	12	11
5	A-B	55	48	38	39	38	44
	A-C	53	46	37	38	36	42
	B-C	4	4	2	2	4	3
6	A-B	30	26	19	18	23	23
	A-C	26	23	17	15	19	20
	B-C	5	5	3	3	5	4
7	A-B	36	32	24	22	27	28
	A-C	31	27	21	19	22	24
	B-C	7	6	4	3	6	5
8	A-B	31	26	19	19	24	24
	A-C	27	22	15	17	21	20
	B-C	5	4	4	3	5	4

Ilustración 11. Hidrogramas simulados en subcuenca 1.

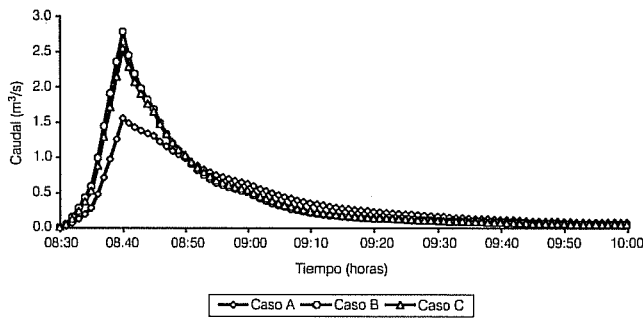


Ilustración 15. Hidrogramas simulados en subcuenca 5.

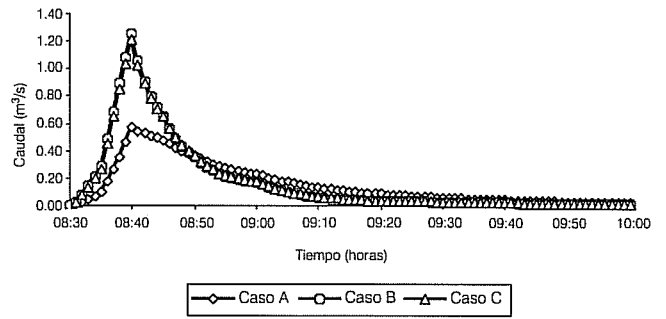


Ilustración 12. Hidrogramas simulados en subcuenca 2.

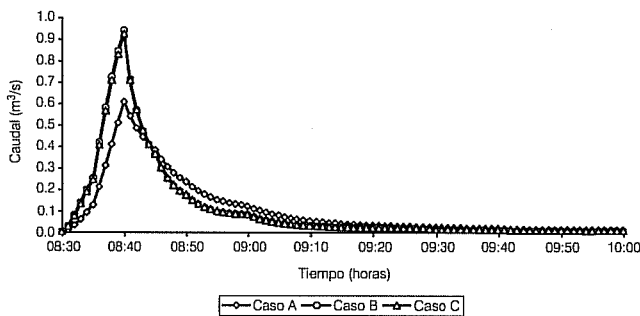


Ilustración 16. Hidrogramas simulados en subcuenca 6.

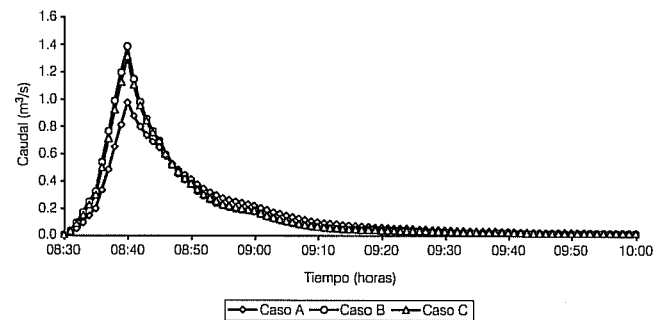


Ilustración 13. Hidrogramas simulados en subcuenca 3.

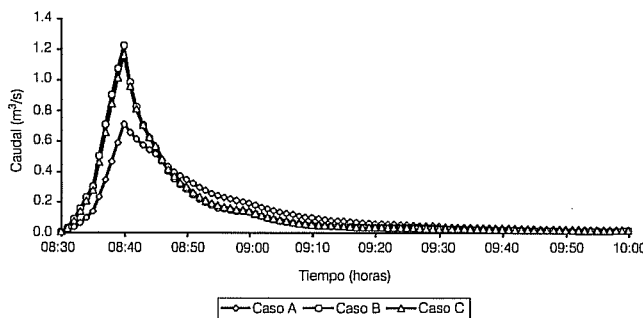


Ilustración 17. Hidrogramas simulados en subcuenca 7.

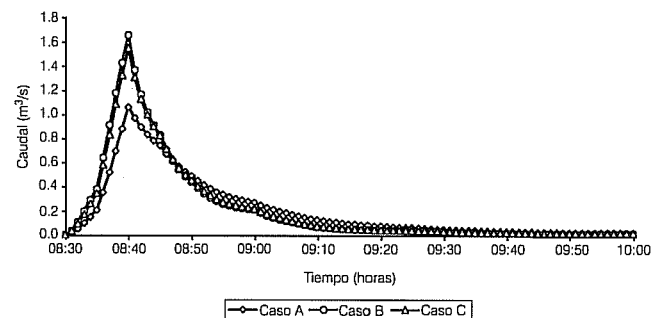


Ilustración 14. Hidrogramas simulados en subcuenca 4.

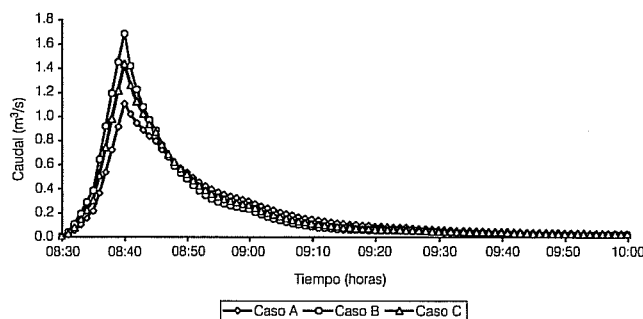
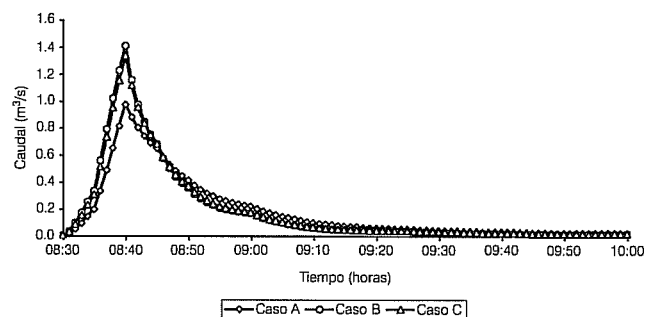


Ilustración 18. Hidrogramas simulados en subcuenca 8.



que se puede apreciar entre tomar en cuenta las subcuencas como caso B o caso C no supera el 15 por ciento.

En general, las subcuencas reales se ajustan más al tercer caso (C), que a los otros dos. Sin embargo, si se hace una esquematización de las subcuencas en función de una dinámica hídrica detallada de las mismas pueden darse los otros dos casos (A o B).

Es deseable que en el proceso de diseño de sistemas de drenaje pluvial urbano el modelista tenga en cuenta, al momento de la esquematización de las subcuencas, estas posibles variaciones de los caudales superficiales de diseño, de modo que no se exageren por exceso o defecto las dimensiones del sistema. Esto permitirá obtener un diseño más óptimo del drenaje. Para ello se requiere definir lo más fielmente posible la dinámica hídrica y las principales líneas de tránsito del flujo en superficie.

Recibido: 11/08/1999

Aprobado: 29/03/2001

Referencias

- Collins, J., J. Macor y G. Pusineri, *Implementación y operación de una cuenca urbana piloto*, I Seminario Internacional sobre Manejo del Agua Pluvial Urbana, vol. 1, Santa Fe, Argentina, 1997, pp. 100-110.
- De Vries, J. y R. Mc Arthur, *Introduction and Application of Kinematics Wave Routing Techniques Using HEC-1*, Training Document núm. 10, The Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, California, 1979.
- Digiano, F., D. Adrian y P. Mangarella, *Short Course Proceedings-Applications of Storm-water Management Models*, EPA-600/2-77-065 (NTIS PB-265321), Environmental Protection Agency, Cincinnati, 1977.
- Green, W. y G. Ampt, "Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water Through Soils", *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 4, 1911, pp. 11-24.
- Horton, R., "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle", *Transactions American Geophysical Union*, vol. 4, 1933, pp. 446-460.
- Horton, R., "An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity", *Proceedings Soil Science of America*, vol. 5, 1940, pp. 399-417.
- Huber, W. y R. Dickinson, *Storm Management Model, User's Manual, Version 4*, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, 1992.
- Metcalf y Eddy, Inc., University of Florida y Water Resources Engineers, Inc., *Storm Water Management Model*, vol. 1, reporte final, EPA Report 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1971.
- Pedraza, R., J. Collins, J. Macor y G. Pusineri, *Experiencias de hidrología urbana en una cuenca piloto de la ciudad de Santa Fe*, I Jornadas Nacionales de Saneamiento Pluvial Urbano, vol. 1, Rosario, Argentina, 1995, pp. 535-551.

Abstract

Macor, J.L., "Comparative Analysis of the Basin Width Parameter of the RUNOFF-SWMM Model", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. XVII, num. 2, pages 17-26, April-June, 2002.

The hydrologic models of urban drainage design assume the spatial variability of the parameters on the basin by subdividing it in sub-basins whose parameters are spatially lumped. The RUNOFF block of the Storm Water Management Model (SWMM) uses this technique, considering the sub-basins as non-linear reservoirs. One of the parameters this block works with is the sub-basin width (W), which varies according to the sub-basin idealized by the modeler. This parameter will influence on the design of hydrographs. This work presents a comparative analysis of the parameter W on eight urban sub-basins of the city of Santa Fe, Argentina. The analysis is carried out for several rainy events.

Key words: hydrologic models, spatial variation of parameters, basin width, non-linear reservoirs, urban basin, design hydrograph, basin idealization.

Dirección institucional del autor:

José Luis Macor

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral
CC 217, 3000 Santa Fe, Argentina.
Teléfono: (54) (342) 4575 241
Fax: (54) (342) 4575 224
Correo electrónico: josem@fich.unl.edu.ar