ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGUNOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO

Oscar J Mesa, Ricardo A. Smith , Claudia P. Campuzano
Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Facultad de Mina, Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín

RESUMEN

Se presenta un análisis comparativo de lo métodos de estimación del Hidrograma Unitario Sintético. Este análisis comparativo se hace aplicando los diversos métodos propuestos a una misma cuenca y comparando los resultados obtenidos y, en algunos casos, comparando los resultados obtenidos con observaciones en las cuencas y con resultados por otros procedimientos. Los análisis comparativos se hicieron utilizando varios indicadores que describen de una manera detallada los hidrogramas de escorrentía directa obtenidos. Para el análisis comparativo se usaron resultados encontrados en la literatura y en trabajos dirigidos de grado realizados en la Facultad de Minas. El análisis realizado muestra la gran variabilidad de los resultados obtenidos con los diferentes métodos, y cuando hubo posibilidad de comprobar los resultados con mediciones de campo los mejores resultados se tuvieron con el método de Williams y Hann. Se presentan en este estudio finalmente algunas conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

A comparative analysis of several synthetic unit hydrographs estimation procedures are presented. This analysis is done by applying all methodologies to the same watershed and, in some cases, by using observed watersheds hydrographs and results obtained with others procedures. The comparative analysis used several indexes to describe direct runoff hydrographs and the similarities between computed and observed hydrographs. For the comparative analysis results reported in several thesis at the School of Mines, National University of Colombia, and in several papers were also used. Results shows great differences between all methodologies, and when comparisons were made with measured hydrographs the best results were obtained with the Williams and Hann Synthetic Unit Hydrograph model. Some conclusions and recommendations are finally presented.

INTRODUCCIÓN

Se presenta en este trabajo un análisis comparativo de los métodos de regionalización del Hidrograma Unitario conocidos con el nombre de Hidrogramas Unitarios Sintéticos

La comparación de estos métodos se hace de varias formas: aplicando los distintos métodos a una misma cuenca y comparando los resultados, y aplicando algunos métodos en cuencas donde hay información y comparando los resultados con observaciones o con resultados obtenidos con métodos de generalización. En el primer caso es común utilizar como criterio comparativo el caudal pico asociado a cierto período de retorno. Para esta comparación se genera el hietograma de precipitación efectiva asociado a cierto período de retorno, el cual se convoluciona con el Hidrograma Unitario Sintético para obtener el hidrograma de escorrentía directa. A este hidrograma de escorrentía directa o a su respectivo caudal pico se le asocia un período de retorno igual al de la precipitación efectiva (aunque esto es una aproximación). El caudal pico obtenido de esta manera, por varios de los métodos de estimación del hidrograma unitario sintético y para varios períodos de retorno, se compara para ver la similitud de los resultados.

En el caso de que se comparen los resultados obtenidos mediante el uso de los métodos sintéticos con observaciones o con resultados obtenidos con métodos de generalización, el análisis comparativo puede incluir algunos indicadores que describan la bondad del ajuste.

No se describen en este trabajo los diferentes procedimientos de estimación de los hidrogramas unitarios sintéticos. Lo que se presenta es un análisis comparativo de los diferentes procedimientos presentados en la literatura. El lector interesado puede encontrar en muchas de las referencias acá presentadas descripciones detalladas de esos procedimientos.

En este análisis comparativo se usaron resultados encontrados en la literatura y en trabajos dirigidos de grado realizados en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Con seguridad que en las otras sedes de la universidad y en muchos estudios realizados en el país puede haber material adicional para ilustrar este análisis comparativo, pero para el objetivo buscado en esta investigación el material revisado se considera como suficiente.

Se presenta a continuación los casos de aplicación revisados y obtenidos por la investigación con sus respectivos resultados, seguidos por algunas conclusiones y recomendaciones.

2. CASOS DE APLICACIÓN Y RESULTADOS

Se presentan ahora varias aplicaciones de algunos de los métodos sintéticos con sus respectivos resultados y una discusión de los mismos. Las aplicaciones que se presentan corresponden a varios estudios encontrados en la literatura y a trabajos dirigidos de grado realizados en la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Algunos de los métodos utilizados en esos estudios no son métodos sintéticos del hidrograma unitario como el método racional. Sin embargo los resultados obtenidos por esos métodos se incluyen como parte del análisis comparativo general. Igualmente se presentan algunos resultados de aplicaciones propias de esta investigación.

Atehortua y Moreno (1990) estudiando problemas de inundación que ocurrieron en Medellín en 1988 realizaron, entre otras cosas, un estudio hidrológico de las quebradas Chorro Hondo, la Aguadita y la Loca que incluyó el uso de métodos de regionalización del hidrograma unitario, en varios puntos de esas quebradas. En el estudio se identificaron para cada quebrada varios puntos críticos de acuerdo a los problemas de inundación, y a cada punto

crítico de estos se le aplicaron varios métodos sintéticos.

Este estudio utilizó los métodos del hidrograma unitario sintético de Williams y Hann, Snyder (original y con los coeficientes propuestos por Integral y AEI) y el hidrograma unitario curvilíneo adimensional del Soil Conservation Service (modelo XS - Rain), además del método racional. Los resultados obtenidos para el caudal pico por los diferentes métodos para diferentes periodos de retorno se muestran en la Tabla 1.

En la discusión presentada por los autores para seleccionar el caudal de diseño para las obras de control de inundaciones se recomienda el método del hidrograma unitario curvilíneo del Soil Conservation Service (modelo XS - Rain) por ser el método que mayores valores (más conservadores) dio. De la Tabla 1 se puede ver la gran diversidad en los resultados obtenidos, en donde prácticamente ningún método da resultados similares.

Jaramillo y Montoya (1990) estudiaron el problema del control de inundaciones de la quebrada Bodegas en el Municipio de Santuario, Antioquia. Como parte de este estudio usaron varias metodologías sintéticas para definir el caudal de diseño de las obras de control de inundaciones, entre las que se encuentran: método racional, regionalización de la función de distribución de probabilidades, y los métodos del hidrograma unitario sintético de Snyder, Triangular y Curvilíneo (modelo XS - Rain) del Soil Conservation Service. Los resultados obtenidos para el caudal pico para una lluvia de 40 minutos para los diferentes periodos de retorno y por los diferentes métodos se muestran en la Tabla 3.

En la discusión presentada por los autores para seleccionar el caudal de diseño de las obras de control de inundaciones, se propone un procedimiento de selección basado en la media y la desviación standard de los resultados de todos los métodos. Los valores finalmente propuestos son muy cercanos a los resultados obtenidos por el método racional y el hidrograma unitario triangular del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Se puede observar nuevamente la gran diferencia en los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

Salazar y Betancur (1991) estudiando los problemas del desbordamiento de las quebradas La Hueso, La Ana Díaz y La Picacha, ocurridos el 17 de septiembre de 1988, realizaron un estudio hidrológico en varios puntos críticos de esas quebradas que incluyó el uso de varios métodos sintéticos. Los métodos utilizados fueron los hidrogramas unitarios sintéticos de Williams y Hann, el Geomorfoclimático, el de Snyder (con los coeficientes de Integral y AEI), y el curvilíneo adimensional del Soil Conservation Service (modelo XS - Rain). Los resultados obtenidos para el caudal pico para diferentes periodos de retorno por los diferentes métodos para cada punto crítico de cada quebrada se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 2 en el caso del hidrograma unitario de Williams y Hann, este se convoluciona con un hietograma de precipitación efectiva determinado por el método de Huff y también considerando únicamente el hietograma de la estación pluviográfica Miguel de Aguinaga.

En la discusión de la selección de los caudales de diseño los autores recomiendan el uso de los obtenidos por el modelo XS - Rain (hidrograma unitario curvilíneo adimensional del Soil Conservation Service) por dar los resultados más conservadores y por tener mayores consideraciones sobre aspectos físicos que los otros. Nuevamente se puede ver la gran diferencia en los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

Ochoa y Toro (1992) realizaron un estudio sobre la aplicabilidad de algunos métodos del hidrograma unitario de regionalización comparando los resultados obtenidos por estos méto-

dos con observaciones. Los hidrogramas unitarios sintéticos obtenidos por varios métodos se convolucionaron con hietogramas de precipitación efectiva observados y se obtuvo el hidrograma de escorrentía directa que se comparó con el hidrograma observado. Esta comparación se hizo para varias cuencas ubicadas en el departamento de Antioquia. Los modelos del hidrograma unitario sintético utilizados fueron el de Snyder, el del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S), el de William y Hann y el geomorfoclimático.

TABLA 1 Resultados para las quebradas Chorro Hondo, La Aguadita y La Loca. Caudales en m^3/s

QUEBRADA	PTOS CRÍTICOS	K	PERIODOS DE RETORNO Y COEFICIENTES							
			2		10		50		100	
			AEI	INT.	AEI	INT.	AEI	INT.	AEI	INT.
CHORRO HONDO	0	1	2,4	6,7	3,7	10,4	5,0	14,0	5,7	16,0
	6	1	1,8	5,1	2,9	8,3	4,0	11,4	4,8	13,6
	10	1	1,7	4,9	2,8	7,8	3,9	10,9	4,6	12,9
	11	1	0,9	2,7	1,5	4,3	2,1	6,0	2,6	7,4
LA AGUADITA	0	1	2,0	5,5	3,0	8,6	4,1	11,6	4,9	13,7
	6	1	1,4	4,0	2,3	6,5	3,2	9,1	4,0	11,1
	8	1	0,7	1,9	1,1	3,2	1,6	4,5	2,0	5,8
LA LOCA	0	0,958	7,5	20,5	10,2	27,8	13,6	37,1	14,7	40,3
	5	0,978	5,0	13,6	7,4	20,2	9,8	26,7	10,8	29,3
	9	1	2,4	6,6	3,8	10,3	5,1	13,9	5,7	15,7
	12	1	1,4	3,8	2,3	6,3	3,1	8,3	3,5	9,4

TABLA 1 (Continuación)

QUEBRADA	PTOS CRÍTICOS	TR (AÑOS)	WILLIAM Y HANN	RACIONAL	XS-RAIN	SNYDER
CHORRO HONDO	0	2	3,00	9,15	14,00	8,98
		10	6,70	12,28	22,85	13,94
		50	10,90	15,17	30,25	18,77
		100	13,50	16,77	34,35	21,54
	6	2	1,60	5,05	13,11	6,59
		10	4,20	6,77	20,77	10,58
		50	7,50	8,40	28,02	14,64
		100	9,90	9,46	32,75	17,37
	10	2	1,30	5,05	12,74	6,36
		10	3,70	6,77	20,39	10,29
		50	6,70	8,40	27,64	14,25
		100	9,10	9,46	32,37	16,98
	11	2	0,70	4,41	10,91	5,34
		10	2,40	5,92	17,63	8,65
		50	4,80	7,39	24,14	12,11
		100	7,00	8,52	29,18	14,90
LA AG	0	2	2,10	8,13	13,11	7,78
		10	5,00	10,95	20,30	12,08
		50	8,50	13,57	27,01	16,36
		100	11,20	15,33	31,51	19,35
	6	2	0,90	4,30	11,23	5,48
		10	2,80	5,77	17,95	8,84

U A D I T A		50	5,40	7,20	24,47	12,36
		100	7,70	8,30	29,51	15,17
	8	2	0,10	3,52	8,48	4,03
		10	1,00	4,74	14,08	6,61
		50	2,40	5,97	19,68	9,35
		100	4,30	7,10	24,85	12,08
L A L O C A	0	2	10,60	14,12	21,98	15,57
		10	15,90	17,42	30,11	21,14
		50	23,30	21,69	39,76	28,25
		100	25,90	23,10	42,94	30,65
	5	2	7,30	12,12	19,65	13,02
		10	12,70	15,64	29,36	19,23
		50	18,90	19,16	38,41	25,49
		100	21,50	20,53	41,94	27,99
	9	2	3,40	6,89	15,92	8,74
		10	7,00	8,85	24,97	13,61
		50	11,30	10,81	33,16	18,42
		100	13,60	11,71	36,93	20,75
	12	2	1,00	5,22	12,16	6,13
		10	3,20	7,08	26,21	10,16
		50	5,60	8,50	26,33	13,48
		100	7,00	9,20	29,40	15,20

TABLA 2 Resultados para las quebradas la Hueso, la Ana Diaz y la Picacha.
Quebrada La Hueso.

CUENCA	Tr (años)	H.U WILLIAM Y HANN HIETOGRAMAS		H.U. GEOMORFO-CLIMÁTICO	H.U SNYDER MET.PROPUESTO		XS-RAIN
		Miguel A	Huff		AEI	INTEGRAL	
QH1 (Desembo-cadura)	5	112,5	110,9	109,2	111,7	193,9	159,8
	50	193,8	193,1	210,7	175,3	336,7	273,3
	100	225,4	225,0	237,2	199,7	392,6	279,8
QH2 (Conf. Con Ana Diaz)	5	113,8	132,7	117,7	120,3	190,9	176,2
	50	197,4	235,3	213,9	187,6	339,5	299,4
	100	224,2	267,0	243,1	207,8	385,0	337,1
QH# (Conf.con Pelahueso)	5	42,1	57,2	49,0	67,1	91,3	89,0
	50	76,3	107,8	129,7	104,0	171,7	152,7
	100	87,0	122,7	155,7	114,4	195,7	171,1
QH4 (Conf. Con Leonarda)	5	29,4	34,4	17,3	31,5	33,2	47,8
	50	55,7	68,8	50,9	48,0	66,1	82,4
	100	64,5	80,2	63,5	53,2	77,4	93,1
QL	5	16,7	23,7	8,2	27,2	29,0	27,5
	50	30,5	43,5	22,1	43,5	54,3	45,7
	100	33,3	47,5	25,2	46,6	59,4	49,2
Qpel	5	22,6	23,5	11,6	26,6	32,8	35,3
	50	40,0	42,1	32,9	38,8	58,6	57,0
	100	46,0	48,6	41,8	42,8	67,9	64,0
QS	5	14,5	15,2	5,4	15,7	20,3	23,7
	50	27,1	28,6	17,3	23,9	38,3	37,3
	100	33,0	35,2	24,7	27,6	47,0	44,0

Quebrada La Ana Diaz

CUENCA	Tr (años)	H.U WILLIAM Y HANN HIETOGRAMAS		H.U GEOMORFO-CLIMÁTICO	H.U SNYDER MET PROPUESTO		XS-RAIN
		Miguel A	Huff		AEI	INTEGRAL	
QA1	5	52,7	59,3	27,0	61,9	95,7	70,2
(Desembo-	50	92,7	103,7	70,2	97,1	172,1	120,6
cadura)	100	104,1	116,5	84,2	106,9	194,4	134,8
QA2	5	44,2	52,8	23,8	59,2	68,5	63,2
(Calle 35)	50	83,4	104,5	66,5	90,5	133,8	112,9
	100	93,6	118,2	78,9	98,4	151,4	127,0
QA3	5	41,9	54,0	28,4	32,3	61,6	67,1
(Transver-	50	80,0	103,0	70,0	47,6	119,1	116,7
sal 92)	100	91,3	117,0	82,1	51,9	136,1	130,2

TABLA 2 (Continuación)
Quebrada La Picacha

CUENCA	Tr (años)	H.U WILLIAM Y HANN HIETOGRAMAS		H.U GEOMORFO-CLIMÁTICO	H.U SNYDER MET PROPUESTO		XS-RAIN
		Miguel de A	Huff		AEI	INTEGRAL	
QP1	5	45,8	50,8	19,9	59,9	86,4	54,6
(Desembo-	50	81,7	94,3	56,4	95,0	159,4	99,1
cadura)	100	91,1	105,8	67,8	103,7	178,9	110,1
QP2	5	39,9	44,7	16,3	50,5	75,6	53,2
(Carrera	50	66,5	77,1	41,5	73,6	130,2	86,7
76)	100	76,1	88,9	52,5	81,7	150,3	98,4
QP3	5	37,0	45,1	17,7	53,5	62,9	58,1
(Carrera	50	79,4	97,2	64,0	90,2	137,3	111,9
84)	100	93,5	114,4	82,0	101,7	162,4	128,2

TABLA 3 Resultados para la quebrada Bodegas

Tr	XS-RAIN	RACIONAL	SNYDER	S.C.S TRIANGULAR	REGIONALIZACIÓN
2	26,53	41,04	27,93	39,80	24,85
5	35,93	51,89	36,14	51,49	29,35
25	50,08	68,14	48,46	69,04	35,22
50	56,84	71,88	54,32	77,39	37,30
100	63,32	82,86	59,59	84,90	39,42

Las cuencas utilizadas en este estudio fueron Buey en la Mayoría (BP1), Guadalupe en Palmichal (G8), Riachón en los Suribios (PP5), Caracolí en Caracolí (PP6), Santa Bárbara en Salazar (PP9), Chico en Río Chico (RG5), Grande en Río Grande (RG7) y Concepción en Concepción (TC4). En todas las cuencas se analizaron múltiples tormentas (hasta 20 tormentas en algunos casos) y se calcularon unos estadísticos que permitieran llegar a conclusiones generales al comparar los resultados obtenidos con los métodos sintéticos con los observados en cada cuenca. Para cada cuenca se calculó entonces:

- Error promedio del caudal pico, EQP.
- Desviación standard del error promedio del caudal pico, STD.
- Índice de estimación del modelo, IE.

El índice de estimación (IE) del modelo mide porcentualmente el número de errores por exceso de la estimación del caudal pico usando todas las tormentas de una cuenca. Para una tormenta dada, el índice de estimación está dado como:

$$IE_j = 1 \text{ si } EQP_j < 0 \quad (1a)$$
$$IE_j = 0 \text{ si } EQP_j > 0 \quad (1b)$$

En donde EQP_j es el error promedio del caudal pico para la tormenta j.
El índice de estimación del modelo para cada cuenca i, es:

$$IE_i = \frac{100}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i} IE_j \quad (2)$$

en donde n_i es el número de tormentas consideradas para la cuenca i
El índice de estimación del modelo es:

$$IE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} IE_i \quad (3)$$

en donde m es el número de cuencas consideradas.

El índice de estimación IE es un índice de sobreestimación del modelo o el porcentaje del número de errores por exceso. El porcentaje del número de errores por defecto es (100 - IE)

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos al comparar el caudal pico observado con el calculado usando los diferentes modelos sintéticos en cada cuenca y con todas las tormentas consideradas.

TABLA 4 Resultados para los diferentes modelos sintéticos en varias cuencas de Antioquia.

CUENCA	SNYDER (INTEGRAL)			SNYDER (AEI)			SNYDER (OTROS)		
	EQP (%)	STD	IE (%)	EQP (%)	STD	IE (%)	EQP (%)	STD	IE (%)
BP1	83,58	42,42	94,44	14,47	14,31	50,00	68,42	5,67	0,00
GB	76,60	47,67	94,12	26,62	18,59	47,06	70,72	10,84	0,00
PP5	172,12	50,20	100,00	58,64	34,48	90,00	39,66	17,39	0,00
PP6	159,45	69,96	100,00	39,85	23,89	83,33	48,34	14,54	0,00
PP9	230,17	117,62	100,00	71,05	36,89	91,67	37,00	17,01	8,33
RG5	84,89	52,68	94,12	22,66	16,68	35,29	65,63	10,37	0,00
RG7	245,94	107,57	100,00	80,96	46,99	92,86	40,30	18,45	0,00
TC4	84,99	98,18	93,33	43,74	17,05	26,67	72,87	14,28	0,00
MEDIA	142,22	73,29	97,00	44,75	26,11	64,61	55,37	13,57	1,04
STD	65,18			22,23			14,48		

CUENCA	S.C.S			WILLIAMS Y HANN			RODRIGUEZ-ITURBE		
	EQP (%)	STD	IE (%)	EQP (%)	STD	IE (%)	EQP (%)	STD	IE (%)
BP1	22,07	15,48	77,78	17,62	14,88	5,56	45,67	9,74	0,00
GB	27,64	20,05	41,18	26,71	21,24	35,29	51,36	17,91	0,00
PP5	102,67	50,31	100,00	44,10	19,66	70,00	21,94	18,37	40,00
PP6	96,56	47,86	100,00	43,85	26,68	83,33	23,06	10,31	66,67
PP9	134,21	63,43	91,67	86,87	43,32	91,67	46,29	29,56	91,97
RG5	28,07	26,82	64,71	25,98	13,66	17,65	52,59	14,03	0,00
RG7	118,97	64,07	92,86	25,46	14,32	50,00	32,27	20,80	0,00
TC4	45,73	38,01	40,00	43,58	27,21	26,67	47,09	24,21	13,33
MEDIA	71,99	40,75	76,02	39,27	22,62	47,52	40,03	18,12	26,46
STD	42,87			20,38			11,63		

Los autores tratan de interpretar estos resultados con la geomorfología general de la cuenca. En este análisis encontraron que el error en la estimación del caudal pico aumenta cuando:

- Modelo de Snyder (Integral).
  * Mayor pendiente media de la cuenca.
  * La cuenca tiende a ser más ancha que larga.
  * El canal principal tiene menor longitud.

- Modelo de Snyder (AEI).
  * Menor tamaño de la cuenca.
  * Aumenta la pendiente de la cuenca.

- Modelo de Snyder (original).
  * Aumenta la longitud al centroide.

- Modelo del Servicio de Conservación de Suelos.
  * Disminuye el tamaño de la cuenca.

- Modelo de William y Hann
  * Aumenta la pendiente media de la cuenca.
  * Aumenta la pendiente media del canal principal

- Modelo Geomorfoclimático.
  * Aumento del tamaño de la cuenca.

En su análisis los autores concluyen que los modelos más confiables son el modelo de William y Hann y el modelo geomorfoclimático. Igualmente llaman la atención sobre la diversidad de los resultados y la necesidad de realizar calibraciones en nuestro medio de esos modelos.

En 1992 se concluyeron una serie de trabajos dirigidos de grado en la Facultad de Minas sobre diversas quebradas en el área metropolitana de Medellín dirigidas por los profesores Oscar Mesa y Lilian Posada. Esas tesis con sus respectivos autores fueron:

- Estudio Hidrológico de la quebrada La Ayurá, Gutiérrez y Moreno (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada La Volcana, Calderón y Bedoya (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada Piedras Blancas, Cano y Sierra (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada Doña María, Duque y Nigrinis (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada La Valeria, Osorio y Quintero (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada La Doctora, Dávila y García (1992).

- Estudio Hidrológico de la quebrada La Miel, Arias y Palacio (1992).

El objetivo de estos estudios fue avanzar en el conocimiento hidrológico de esas quebradas consideradas como de las más importantes dentro del área metropolitana de Medellín. En todos estos estudios se utilizaron modelos sintéticos del hidrograma unitario para definir el caudal pico asociado a ciertos períodos de retorno. Los modelos utilizados fueron: Snyder (original, Integral y AEI), William y Hann, Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, Mein y Larson, regionalización del modelo de Nash, geomorfoclimático y método racional.

Los resultados obtenidos para el caudal pico asociado a diferentes periodos de retorno por los diferentes métodos para las diferentes quebradas se muestran en las Tablas 5 a 11 a continuación. En algunas quebradas se consideraron varios puntos críticos los cuales se identifican en la cabecera de la Tabla como QHi, indicando el punto crítico i, en donde i tiene un valor máximo de 3. Igualmente en algunos casos se consideraron varias duraciones para la precipitación efectiva, lo cual también se indica en las Tablas.

TABLA 5 Resultados para la quebrada La Ayurá

MÉTODOS	D	QH1 Período de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Snyder Integral	120	190,48	274,81	379,41	425,67
Snyder AEI	120	76,58	110,48	152,53	171,13
Williams y Hann	120	70,88	119,13	185,04	215,59
Racional forma usual	120	73,82	96,34	124,35	138,32
Geomorfoclimático	120	61,29	100,56	153,44	178,10
XSRAIN	120	80,04	128,53	188,24	217,35
Mein y Larson	120	50,36	84,80	129,69	153,15
Nash	120	37,02	60,36	92,05	106,72
Snyder Integral	150	153,84	320,65	322,17	366,25
Snyder AEI	150	62,63	93,91	131,17	149,12
Williams y Hann	150	60,65	102,58	157,52	187,57
Racional forma usual	150	58,98	76,99	98,43	109,84
Geomorfoclimático	150	48,83	80,31	120,84	141,51
XSRAIN	150	68,87	112,53	164,49	192,15
Mein y Larson	150	46,87	77,02	116,33	138,25
Nash	150	34,53	56,22	84,41	98,56
Snyder Integral	180	121,70	192,40	273,30	315,21
Snyder AEI	180	50,09	79,18	112,48	129,73
Williams y Hann	180	45,37	75,79	117,43	140,21
Racional forma usual	180	48,77	63,80	80,97	90,67
Geomorfoclimático	180	40,05	65,78	98,11	115,68
XSRAIN	180	48,35	85,10	127,02	150,96
Mein y Larson	180	38,58	63,03	94,25	113,05
Nash	180	31,95	51,67	76,06	89,20
MÉTODOS	D	QH2			
		2,33	10	50	100
Snyder Integral	120	241,71	336,38	459,92	503,13
Snyder AEI	120	94,75	131,87	180,30	197,24
Williams y Hann	120	113,55	193,06	307,60	349,54
Racional forma usual	120	16,13	33,49	61,46	75,01
Geomorfoclimático	120	92,20	154,35	243,54	276,16
XSRAIN	120	109,63	167,22	241,83	274,25
Mein y Larson	120	67,24	111,87	175,17	203,84
Nash	120	36,44	61,05	96,37	109,28
Snyder Integral	150	206,10	288,83	394,29	436,44
Snyder AEI	150	82,44	115,53	157,72	174,58
Williams y Hann	150	111,58	178,68	274,07	314,73
Racional forma usual	150	73,79	96,87	126,27	140,10
Geomorfoclimático	150	67,62	109,51	167,71	191,96
XSRAIN	150	117,92	176,33	250,91	278,47
Mein y Larson	150	71,64	116,33	178,12	208,39
Nash	150	39,05	63,13	96,73	110,76
Snyder Integral	180	169,41	243,15	333,47	373,66
Snyder AEI	180	68,87	98,84	135,56	151,89
Williams y Hann	180	67,55	115,88	181,48	212,17
Racional forma usual	180	56,01	73,31	94,49	105,19
Geomorfoclimático	180	51,87	83,38	125,31	144,76
XSRAIN	180	123,22	180,23	252,83	288,88
Mein y Larson	180	60,93	110,83	172,19	203,47
Nash	180	35,31	56,43	84,34	97,23

TABLA 6 Resultados para la quebrada La Volcana.

MÉTODOS	D	QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Snyder CUHP	15	3,77	7,76	12,59	14,97
Snyder Integral	15	18,85	28,34	38,48	43,25
Snyder AEI	15	7,13	10,72	14,56	16,36
Nash	15	2,85	5,85	9,46	11,25
Williams y Hann	15	9,54	19,59	31,88	37,96
Mein y Larson	15	10,90	19,30	28,29	32,51
SCS	15	5,68	11,57	18,67	22,27
Racional forma usual	15	3,82	5,63	7,56	8,47
Geomorfoclimático	15	6,00	15,64	29,38	36,75
Snyder CUHP	20	4,84	9,28	14,66	17,34
Snyder Integral	20	20,61	30,50	41,30	46,44
Snyder AEI	20	7,85	11,62	15,73	17,69
Nash	20	3,71	7,11	11,21	13,26
Williams y Hann	20	11,80	22,80	36,09	42,70
Mein y Larson	20	12,38	20,60	29,57	33,84
SCS	20	7,09	13,22	20,93	24,70
Racional forma usual	20	4,39	6,34	8,48	9,50
Geomorfoclimático	20	7,44	17,39	31,11	38,37
Snyder CUHP	30	6,21	911,05	16,94	19,85
Snyder Integral	30	21,97	31,86	43,01	48,31
Snyder AEI	30	8,48	12,30	16,60	18,65
Nash	30	4,89	8,67	13,29	15,56
Williams y Hann	30	14,11	25,53	39,60	46,56
Mein y Larson	30	12,91	20,69	29,44	33,60
SCS	30	8,24	14,49	22,03	25,72
Racional forma usual	30	5,13	7,24	9,60	10,73
Geomorfoclimático	30	8,66	17,79	29,78	35,83
MÉTODOS	D	QH2 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Snyder CUHP	15	2,02	4,54	7,81	9,35
Snyder Integral	15	15,33	23,61	32,86	36,94
Snyder AEI	15	5,81	8,94	12,44	13,98
Nash	15	2,13	4,80	8,24	9,86
Williams y Hann	15	7,11	16,16	27,88	33,37
Mein y Larson	15	10,55	18,38	26,95	34,93
SCS	15	3,98	10,55	17,83	24,94
Racional forma usual	15	3,26	4,93	6,79	7,61
Geomorfoclimático	15	6,53	19,97	33,97	41,51
Snyder CUHP	20	2,66	5,50	9,18	10,90
Snyder Integral	20	16,83	25,37	35,16	39,49
Snyder AEI	20	6,42	9,68	13,14	15,06
Nash	20	2,85	5,87	9,77	11,59
Williams y Hann	20	8,99	18,70	31,26	37,12
Mein y Larson	20	12,60	21,15	31,13	34,93
SCS	20	6,46	10,05	21,68	24,94
Racional forma usual	20	3,76	5,54	7,59	8,50
Geomorfoclimático	20	7,91	18,97	31,71	37,62

TABLA 6 (Continuación).

MÉTODOS	D	QH3 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Snyder CUHP	10	1,08	2,24	3,54	4,18
Snyder Integral	10	4,99	7,46	9,96	11,12
Snyder AEI	10	1,89	2,82	3,76	4,20
Nash	10	0,67	1,38	2,19	2,59
Williams y Hann	10	1,75	3,61	5,71	6,75
Mein y Larson	10	3,65	6,30	8,89	10,08
SCS	10	2,15	4,21	6,48	7,58
Racional forma usual	10	0,85	1,26	1,66	1,85
Geomorfoclimático	10	1,40	3,69	6,78	8,43
Snyder CUHP	15	1,61	3,03	4,62	5,44
Snyder Integral	15	5,84	8,59	11,42	12,83
Snyder AEI	15	2,23	3,28	4,36	4,90
Nash	15	1,03	1,93	2,94	3,47
Williams y Hann	15	2,54	4,77	7,27	8,56
Mein y Larson	15	3,89	6,32	8,80	10,03
SCS	15	2,44	4,47	6,70	7,84
Racional forma usual	15	1,07	1,54	2,03	2,27
Geomorfoclimático	15	2,05	4,66	7,98	9,80

TABLA 7 Resultados para la quebrada La Ayurá.

MÉTODOS	D	QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	60	89,38	120,87	164,65	180,48
Snyder AEI	60	46,54	58,98	75,74	81,70
Snyder Integral	60	118,57	150,29	192,98	208,17
Snyder CUHP	60	33,55	45,27	61,57	67,47
Racional forma usual	60	81,24	101,36	129,27	139,16
Nash	60	31,97	43,07	58,50	64,08
XSRain SCS	60	59,81	79,88	107,48	117,40
Mein y Larson	60	73,37	94,93	123,51	133,66
Geomorfoclimático	60	70,21	94,55	128,39	140,62
Williams y Hann	90	84,64	114,65	151,68	165,62
Snyder AEI	90	40,70	53,26	68,50	74,20
Snyder Integral	90	101,62	132,98	171,02	185,25
Snyder CUHP	90	37,52	50,83	67,32	73,54
Racional forma usual	90	81,24	101,36	129,27	139,16
Nash	90	34,99	47,63	63,36	69,31
XSRain SCS	90	64,35	87,46	116,13	126,97
Mein y Larson	90	78,74	103,72	134,18	145,75
Geomorfoclimático	90	50,71	69,19	92,27	101,04

TABLA 7 (Continuación).

MÉTODOS	D	QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	120	54,06	80,04	109,34	121,15
Snyder AEI	120	33,40	46,48	60,60	66,17
Snyder Integral	120	82,04	114,19	148,86	162,56
Snyder CUHP	120	35,80	50,48	66,65	73,09
Racional forma usual	120	81,24	101,36	129,27	139,16
Nash	120	34,53	48,81	64,57	70,89
XSRain SCS	120	46,58	66,82	89,33	98,32
Mein y Larson	120	58,49	82,22	107,16	116,99
Geomorfoclimático	120	37,89	53,87	71,65	78,77

TABLA 8 Resultados para la quebrada Doña María

MÉTODOS	D (min)	MANGUALA QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
SCS	78	90,22	142,86	218,86	250,50
Mein y Larson	78	199,63	284,66	394,33	437,23
Williams y Hann	78	111,34	175,85	268,29	307,24
Snyder AEI	78	155,24	200,89	259,50	282,38
Snyder Integral	78	390,33	505,12	652,87	710,01
Snyder CUHP	78	33,14	52,26	80,00	91,56
Nash	78	34,22	54,03	82,71	94,68
Geomorfoclimático	78	85,89	135,72	207,96	238,09
Racional Forma usual	77	177,02	218,25	269,38	290,76
Regionalización forma usual	-	-	207,89	329,34	394,24

MÉTODOS	D (in)	DESEMBOCADURA QH2 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
SCS	108	154,78	250,20	369,99	415,93
Mein y Larson	108	303,40	477,22	672,43	736,01
Williams y Hann	108	142,88	219,19	312,68	348,13
Snyder AEI	108	100,05	137,11	179,30	194,74
Snyder Integral	108	-	-	-	-
Snyder CUHP	108	59,27	88,36	126,89	141,60
Nash	108	51,15	78,94	113,43	126,61
Geomorfoclimático	108	313,79	393,67	486,86	521,09
Racional Forma usual	113	145,92	189,81	230,47	247,28
Regionalización forma usual	-	-	184,56	313,86	378,40

TABLA 9 Resultados para la quebrada La Valeria

MÉTODOS	D (min)	QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	60	27,21	47,50	69,53	80,10
Snyder AEI	60	46,87	61,36	78,34	85,30
Snyder Integral	60	118,90	155,6	198,70	216,00
Snyder CUHP	60	9,79	16,1	24,46	28,10
Nash	60	12,68	20,87	31,65	36,40
SCS	60	14,98	24,54	37,02	42,50
Mein y Larson	60	31,94	46,38	62,99	69,90
Racional forma usual	60	50,68	64,54	80,90	87,60

TABLA 10 Resultados para la quebrada La Doctora

MÉTODO HIDROLÓGICO	D (min)	Cuenca QH1 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	60	74,55	113,57	170,20	193,71
Geomorfoclimático	60	78,59	110,17	178,07	202,53
Snyder (AEI)	60	65,35	88,77	120,97	134,00
Snyder (INTEGRAL)	60	165,72	225,12	306,79	339,83
Snyder (CUHP)	60	60,63	92,52	138,90	158,17
Nash	60	31,08	47,11	70,45	80,14
S.C.S	60	71,01	105,79	155,26	176,09
Mein y Larson	60	96,36	136,78	191,46	213,61
Racional forma usual	48,88	89,11	118,65	170,20	193,71

MÉTODO HIDROLÓGICO	D (min)	Cuenca QH2 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	60	45,44	72,56	112,69	129,49
Geomorfoclimático	60	78,59	119,17	178,07	202,53
Snyder (AEI)	60	33,96	47,17	65,52	72,98
Snyder (INTEGRAL)	60	86,21	119,76	166,35	185,29
Snyder (CUHP)	60	19,26	30,69	47,63	54,73
Nash	60	18,73	29,78	46,14	53,00
S.C.S	60	40,53	62,92	95,62	109,77
Mein y Larson	60	58,40	85,20	127,48	136,22
Racional forma usual	37,21	49,29	69,27	94,95	105,55

TABLA 10 (Continuación)

MÉTODO HIDROLÓGICO	D (min)	Cuenca QH3 Periodo de Retorno (Años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	30	20,20	30,01	43,76	49,36
Geomorfoclimático	30	25,54	38,49	56,45	63,78
Snyder (AEI)	30	23,65	30,64	39,70	43,27
Snyder (INTEGRAL)	30	60,48	78,36	101,51	110,23
Snyder (CUHP)	30	11,60	17,41	25,41	28,66
Nash	30	9,093	13,69	20,06	28,66
S.C.S	30	20,18	30,16	43,87	49,43
Mein y Larson	30	32,77	44,72	60,20	66,30
Racional forma usual	22,03	27,86	36,69	47,70	52,13

TABLA 11 Resultados para la quebrada La Miel.

MÉTODO HIDROLÓGICO	D (min)	PERIODO DE RETORNO Tr (años)			
		2,33	10	50	100
Williams y Hann	75	52,29	93,10	146,58	171,48
Snyder (AEI)	75	72,30	98,20	127,92	140,34
Snyder (INTEGRAL)	75	183,33	248,84	324,15	355,60
Snyder (CUHP)	75	17,96	31,08	48,55	56,34
Nash	75	20,64	36,17	56,64	65,76
S.C.S	75	39,37	66,38	101,15	116,53
Mein y Larson	75	80,20	118,14	166,51	187,15
Geomorfoclimático	75	41,16	75,20	118,13	137,21
Racional forma usual	50	134,10	174,46	266,13	301,76

En la discusión de la selección de los caudales de diseño por parte de los diferentes autores para las diferentes quebradas se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- Todos los estudios proponen el método del hidrograma unitario sintético de William y Hann como el más apropiado para el cálculo da caudales máximos asociados a ciertos periodos de retorno. En algunos casos se pudieron hacer comprobaciones en campo que confirmaron esta selección. En otros casos se usaron procedimientos de selección (Cano, 1992) que igualmente favorecieron esta selección.

- El método de regionalización del hidrograma unitario instantáneo de Nash dio valores muy bajos en todos los casos. Esto se debe a que se usaron ecuaciones de regionalización derivadas de otras regiones de Antioquia. Para la región de estos estudios habría que recalcular el modelo de regionalización.

- El modelo geomorfoclimático dio resultados bastante aceptables y en algunos casos muy parecidos al método seleccionado de William y Hann. Es posible que con un cálculo más detallado de los parámetros de este modelo los resultados mejoren significativamente.

- Las diversas variantes del método de Snyder producen resultados muy diversos. El de Snyder con los valores de los parámetros sugeridos por Integral da resultados muy altos (los más altos de todos los métodos), y el de Snyder CUHP da resultados muy bajos (de los más bajos de todos los métodos).

- Hay varios métodos que en algunos casos dan valores muy similares como el de William y Hann, Mein y Larson y el del Soil Conservation Service.

- En todos los casos hay una gran diversidad de resultados y la falta de posibilidad de comprobación con información de lluvia - escorrentía hace muy incierta la selección de un método específico.

López y Martínez (1993) realizando un análisis y estudio de la mitigación de riesgos por inundación en la quebrada La Saladita en el municipio de Medellín, incluyeron en su estudio un análisis hidrológico usando varios métodos del hidrograma unitario sintético. Los modelos sintéticos utilizados en este estudio fueron: William y Hann, Snyder, Método Racional y el del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. Los resultados obtenidos para los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno por los diferentes métodos se muestran en la Tabla 12.

En la discusión presentada por los autores para seleccionar el caudal de diseño se propone

usar el método de William y Hann basándose en recomendaciones encontradas en otras aplicaciones en la región y en Antioquia. Esta selección se basa mucho en los resultados de Ochoa y Toro (1992).

TABLA 12 Resultados para la quebrada La Saladita.

MÉTODO HIDROLÓGICO	PERIODO DE RETORNO Tr (años)			
	2,33	10	50	100
S.C.S	14,0	27,70	44,6	53,95
Snyder (AEI)	3,54	6,96	11,2	13,57
Snyder (INTEGRAL)	9,45	18,61	30,0	36,27
Williams y Hann	9,37	18,43	29,7	35,91
Racional	22,3	32,83	44,6	51,13

Franco y Lisker (1994) estudiaron dos quebradas muy pequeñas en el municipio de Medellín (quebradas Moñonga y Chumbimbo) con el objeto de diseñar un canal para la más eficiente evacuación de las aguas de crecientes. En este estudio se usaron varios métodos del hidrograma unitario sintético entre los que se encuentran los de William y Hann, Snyder y el Método Racional. Los resultados obtenidos para los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno por los diferentes métodos se muestran en las Tablas 13 y 14.

TABLA 13 Resultados para la quebrada La Moñonga.

MÉTODO HIDROLÓGICO	PERIODO RETORNO Tr (años)		
	10	50	100
Williams y Hann (Antioqueño)	18,19	27,53	33,18
Snyder (INTEGRAL)	24,39	30,67	34,69
Racional	18,90	27,16	30,54

TABLA 14 Resultados para la quebrada El Chumbimbo.

MÉTODO HIDROLÓGICO	PERIODO RETORNO Tr (años)		
	10	50	100
Williams y Hann (Antioqueño)	15,98	23,82	27,88
Snyder (INTEGRAL)	25,65	32,56	37,26
Racional	16,79	23,20	26,53

En la discusión presentada por los autores para seleccionar el caudal de diseño se recomienda usar nuevamente el método de William y Hann. En este estudio este modelo da resultados muy similares a los obtenidos con el método racional. El modelo de William y Hann utilizado en este estudio corresponde a una versión en donde sus parámetros han sido calibrados para Antioquia (Cardona, Londoño, 1991). Esta selección se basa también en recomendaciones hechas en otros estudios.

Cardona y Londoño (1991) usando información de seis cuencas de Antioquia calibraron los parámetros de William y Hann, y luego comprobaron este modelo en otras cuencas donde había información. Las cuencas utilizadas para calibrar este modelo fueron:

CÓDIGO	ESTACIÓN
PP-9	Quebrada Santa Bárbara en Salazar
PP-6	Río Caracolí en Caracolí
RMS-16	Río Medellín en Caldas-Matadero
RNS-23	Río Pantanillo en Lucitania
RN-31	Río Bizcocho en Bizcocho
PP-5	Río Riachón en los Suribios

En cada una de estas cuencas se consideraron cuatro tormentas a las que se les determinó el hidrograma unitario, y luego se determinó el hidrograma unitario único para cada cuenca promediando los caudales pico y los tiempos al pico, y se ajusta el hidrograma para que pase por esos puntos y tenga un volumen unitario. Las características básicas de estos hidrogramas unitarios de acuerdo con el modelo de William y Hann se relacionaron con algunas características morfométricas. Las características morfométricas utilizadas y el tiempo al

pico en minutos (t_p) y la constante de recesión (K) en horas se muestran en la Tabla 15. En esta Tabla la pendiente de la cuenca (SLP) se calcula como la relación entre la diferencia de niveles y la longitud total y L/W representa la relación largo - ancho de la cuenca.

TABLA 15 Características para calibración del modelo de William y Hann.

CUENCA	AREA (Km^2)	PENDIENTE CUENCA	L/W	T_P (min)	K (horas)
PP-9	33,07	0,1028	0,392	85	1,374
PP-6	24,20	0,0337	4,461	95	0,752
RN-31	45,40	0,0952	2,680	40	0,877
RMS-16	99,94	0,0916	2,092	75	1,500
RNS-23	36,03	0,0261	7,583	190	0,491
PP-5	98,70	0,0225	1,204	345	1,754

TABLA 16 Resultados y análisis comparativo del modelo de William y Hann calibrado en Antioquia.

CUENCA	TORMENTA	CAUDAL PICO OBSERVADO (m^3/s)	CAUDAL PICO CALIBRA (m^3/s)
Q. La Iguná	16/9/88	180,00	175,23
Q. Chorrillos	18/10/68	3,36	17,42
PP-9	30/10/87	53,83	55,83
	13/4/88	24,77	44,47
	6/8/89	29,18	41,96
	20/6/88	26,44	51,80
PP-6	29/8/85	17,09	16,64
	25/9/84	65,90	41,57
	20/9/83	70,57	69,14
	4/9/82	65,30	63,03
RMS-16	3/2/80	19,32	26,60
	7/2/82	115,94	83,78
	20/3/84	24,12	27,93
	13/5/84	29,95	41,23
RNS-23	8/10/84	15,76	15,49
	1/4/86	7,27	7,03
	3/4/82	29,31	24,62
	8/12/88	21,10	26,32
RN-31	13/6/88	111,41	90,13
	6/6/88	107,29	97,65
	2/7/88	87,65	60,94
PP-5	11/10/83	11,97	9,92
	21/8/83	12,84	15,07
	31/8/86	11,89	11,15

A partir de esta información se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$t_p = 1.6685 * A^{0.323} * SLP^{-1.0228} * \left(\frac{L}{W}\right)^{-0.1354}$$

$$K = 0.1789 * A^{0.497} * SLP^{-0.0149} * \left(\frac{L}{W}\right)^{-0.7961}$$

con coeficientes de correlación múltiple para t_p y K de 0.967 y 0.962, respectivamente.

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos con este modelo y los registrados (observados) en las estaciones con las diferentes tormentas. Se incluyen los resultados de dos cuencas no consideradas en la calibración anterior. Los resultados muestran errores desde cercanos al 100% hasta inferiores al 2%. Los autores recomiendan aplicar el modelo desarrollado para cuencas entre 20 y 100 Km^2. Los resultados indican la necesidad de realizar estudios como este, más refinados, en diferentes regiones del país. Los resultados en algunos casos son poco alentadores pero se esperarían peores resultados en el caso de usar modelos sintéticos no calibrados para cuencas de la región.

Morgan y Johson (1962) usaron varios métodos sintéticos para calcular caudales pico en diferentes cuencas ubicadas en el estado de Illinois, Estados Unidos, y compararlas con observaciones. Las cuencas utilizadas y sus respectivas características morfométricas se presentan en el apéndice 4, las cuales sirven de base para el cálculo de los modelos sintéticos. Los modelos del hidrograma unitario sintético utilizados fueron el de Snyder, el del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, el de Commons y el de Mitchell. Los resultados obtenidos para el caudal pico por los diferentes métodos, para las lluvias definidas en el estudio, y los respectivos caudales picos observados (pie^3/s) se muestran en la Tabla 17.

TABLA 17 Resultados para varias cuencas en Illinois, Estados Unidos.

CUENCA	ACTUAL	SNYDER	SCS	COM-MONS	MIT-CHELL
1	1040	900	2260	2110	1580
2	2530	1390	3110	2920	2200
3	1570	1430	3160	2970	2510
4	1700	1650	3360	3150	2650
5	4010	2260	3790	3550	2800
6	1280	1710	3810	3580	2870
7	9350	2870	4340	4090	3320
8	4920	2500	4380	4120	3380
9	2140	3010	4280	4020	3480
10	9430	3230	4610	4330	3590
11	5730	3330	4530	4250	3710
12	5740	3850	4850	4540	4090

En donde se puede ver que algunos métodos producen errores hasta del 180%. Se encontró que ninguno de los métodos sobrestimaba o subestimaba sistemáticamente el caudal pico. El método del S.C.S dio los más altos valores del caudal pico seguido por los métodos de Commons, Mitchell y Snyder. Hay mucha similitud en los resultados encontrados por el método del S.C.S y el de Commons. La menor variación en la estimación del caudal pico se obtuvo con el método de Snyder.

Cuando se usa un tiempo de rezago t_L basado en observaciones y no calculado con ecuaciones, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 18. Estos resultados son mucho mejores que los anteriores.

La diferencia de los resultados obtenidos por los diferentes métodos es muy grande.

Haffmeister y Weisman (1977) usaron varios métodos de estimación del hidrograma unitario sintético, los aplicaron a varias cuencas en las regiones de Nueva Zelandia, y compararon sus resultados con observaciones. Los métodos utilizados por estos autores fueron: el modelo de Snyder derivando los parámetros usando solo la cuenca representativa (Snyder 1); el modelo de Snyder derivando los parámetros usando todas las cuencas en la región (Snyder 2), el modelo de Commons usando el tiempo al

pico de Snyder (Commons 1), el modelo de Commons usando el tiempo al pico calculado de observaciones (Commons 2), el modelo de Commons usando el tiempo base calculado de observaciones (Commons 3), el modelo de Commons usando las unidades de tiempo del hidrograma adimensional basándose en observaciones (Commons 4), el modelo del SCS usando el tiempo al pico de Snyder (SCS 1), y el modelo del SCS usando el tiempo al pico derivado de observaciones. Los resultados obtenidos para el caudal pico para las dos regiones se presentan en la Tabla 19.

TABLA 18 Resultados para varias cuencas en Illinois, Estados Unidos.

CUENCA	ACTUAL	SNY-DER	SCS	COM-MONS	MIT-CHELL
1	1040	2700	2440	2290	1710
2	2530	3600	3630	3400	2540
3	1570	1430	1560	1460	1310
4	1700	1345	1490	1400	1280
5	4010	3520	3830	3600	3110
6	1280	1200	1360	1280	1210
7	9350	9750	9830	9230	6870
8	4920	3330	3780	3550	2960
9	2140	2600	2880	2700	2480
10	9430	8320	8800	8230	6250
11	5730	11100	10080	9450	8050
12	5740	13500	12200	11450	9760

Como se puede ver, en los resultados hay una gran dispersión de los mismos, con diferencias en algunos métodos de hasta casi el 90% con respecto al caudal pico promedio. Los mejores resultados se obtuvieron con el método de Snyder

Los resultados mejoraron cuando se incluyeron cuencas adicionales a la representativa en la estimación de los parámetros y cuando se usaron observaciones para definir algunos parámetros de los modelo. El modelo de Snyder tuvo una tendencia a sobrestimar el caudal pico en un 25% para todos los casos.

TABLA 19 Resultados para dos regiones de Nueva Zelandia.

MÉTODO	Q_P (m^3/s) Hoon Hay	Q_P (m^3/s) Cash-mere	Q_P (m^3/s) Orari	Q_P (m^3/s) Opuha
H.U promedio	2,40	1,79	190	175
Snyder 1	2,84	2,23	224	206
Snyder 2	2,54	2,05	206	190
Commons 1	3,02	2,24	152	138
Commons 2	3,17	2,13	145	127
Commons 3	5,03	3,38	241	264
Commons 4	3,89	2,62	193	171
SCS 1	3,23	2,40	162	148
SCS 2	3,39	2,28	155	136

Otros estudios encontrados o reportados en la literatura internacional dan resultados similares a los presentados en los dos artículos anteriores (Coulter, 1961; Hanson y Johnson, 1964), es decir, se obtiene una gran variación en los caudales pico por los diferentes métodos, lo cual es de esperarse en el caso del uso de los métodos sintéticos. Esto está de acuerdo con las aplicaciones hechas en Colombia y presentadas anteriormente.

En esta investigación se desarrolló un software que permite calcular y aplicar el hidrograma unitario sintético usando muchos de los métodos de estimación del mismo. Este software se probó con los resultados descritos en los casos anteriores y con casos encontrados en la literatura dando resultados similares a los ya presentados. Esos resultados obtenidos ilustran nuevamente la diversidad de resultados que se obtienen usando las diferentes metodologías. En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos con el software desarrollado, utilizando varios métodos, para el río San Carlos (Antioquia) hasta el embalse (Puerto Nuevo). Los métodos utilizados fueron los de Williams y Hann, Snyder, Soil Conservation Service (SCS), Taylor, Doble Triangular, Clark - Eaton, Clark - Johnstone Cross, Clark - O'Kelly y Mitchell.

Como se puede ver nuevamente, en los resultados hay gran dispersión con diferencias de hasta casi 9 veces en el caudal pico. Comparando los

resultados obtenidos con estudios anteriores pareciera que el método de Williams y Hann es el que mejores resultados arroja, lo cual está en concordancia con resultados presentados anteriormente.

TABLA 20 Resultados para el río San Carlos usando el software desarrollado.

Método	Caudal Pico (pie^3/s)	Tiempo al pico (horas)
Williams - Hann	644,675	2,100
Snyder (Integral)	636,700	2,307
Triangular (SCS)	502,411	1,967
Continuo (SCS)	502,411	1,967
Taylor	125,389	3,764
Doble Triangular	318,995	3,300
Clark (EATON, r=1.0)	1313,510	15,000
Clark (EATON, r=1.5)	1314,190	13,500
Clark (EATON, r=2.0)	1313,667	12,000
Clark (Johnstone Cross)	503,602	1,500
Clark (O'Kelly)	961,074	4,500
COMMONSI	578,040	2,543

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los casos de aplicación presentados en la sección anterior se pueden hacer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La forma del hidrograma unitario y su relación con las características geomorfológicas de cada cuenca es propia de cada modelo. Diferentes modelos reaccionan de manera diferente a los cambios de esas características.

- Los modelos del hidrograma unitario sintético presentados en esta investigación han sido desarrollados para regiones con características topográficas y climáticas muy distintas a las regiones de Colombia. Muy pocos intentos se han hecho por estimar los parámetros de esos modelos a nuestro medio, básicamente no se ha hecho ningún intento por desarrollar un modelo propio, y se han hecho muy pocas investigaciones para verificar la aplicabilidad de esos modelos en nuestro medio (Ochoa y Toro, 1991). Debido a esto es razonable la dispersión encontrada en las aplicaciones de los diferentes modelos. No se pueden esperar buenos resultados con la mayoría de estos modelos.

- En la mayoría de las aplicaciones el caudal pico decrece en dirección aguas abajo. Esto puede deberse a las variaciones que produce en el hidrograma unitario los cambios en las características morfométricas a medida que nos movemos hacia aguas abajo (menor pendiente, cambios en las relaciones longitud - área, etc.). Sin embargo, no es claro que este comportamiento de los modelos corresponda a la realidad, pues se ha reportado en la literatura que el caudal máximo crece con el área a un exponente entre 0.5 y 1 dependiendo del periodo de retorno (menor exponente para los mayores periodos de retorno).

- Los resultados obtenidos con el método de regionalización del hidrograma unitario de Nash aplicado a las quebradas de la zona metropolitana de Medellín produjo resultados muy bajos. Esto se debe a que se usó una regionalización realizada para otra región con cuencas de áreas mucho mayores. Este procedimiento, en caso de que se puedan estimar las ecuaciones de regionalización, es uno de los más recomendables pues significa estimar el modelo para la región de interés. Estos resultados dan una idea también de lo peligroso que puede ser tomar un modelo desarrollado en una región y aplicarlo directamente a otra.

- Prácticamente ninguno de los modelos acá presentados tiene en cuenta el efecto de la impermeabilización (urbanización) de la cuenca sobre el hidrograma unitario. La única manera de considerarlo es a través de una reducción en el tiempo de concentración.

- Uno de los aspectos más importantes en la aplicación de los modelos del hidrograma unitario sintético es la definición de la precipitación efectiva. En las aplicaciones presentadas se usó en casi todos los casos el procedimiento del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos. La aplicabilidad de este método en nuestro medio está por probarse. La definición inadecuada del hietograma de precipitación efectiva puede distorsionar por completo los resultados obtenidos con el modelo sintético del hidrograma unitario. Esto incluye tanto el proceso de separación de la precipitación efectiva como la distribución en el tiempo de la misma. En la mayoría de los casos para la distribución temporal de la lluvia (hietograma) se utiliza el procedimiento de Huff desarrollado en Estados Unidos, y cuya aplicabilidad en nuestro medio también está por probar.

- En general en los diferentes estudios para seleccionar el modelo que definiera los caudales de diseño se tomaba el que produjera los resultados más conservadores (mayores valores del caudal pico), o que hubiera sido recomendado por otro estudio. Con excepción de Ochoa y Toro (1992) ninguna recomendación se hizo basándose en comparaciones con datos observados.

- En la mayoría de los estudios se recomendó el modelo de William y Hann como el más adecuado, seguido por el modelo del hidrograma unitario adimensional del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (modelo XS-Rain).

- Es necesario implementar instrumentación en las cuencas de las áreas metropolitanas de las diferentes ciudades de Colombia que permitan estimar para nuestros casos no solo los modelos sintéticos del hidrograma unitario, sino también verificar la aplicabilidad de los procedimientos para definir la precipitación efectiva (separación) y su distribución en el tiempo (hietograma). Esto permitiría uniformizar las metodologías de cálculo y tener más confiabilidad en esos procedimientos. Con seguridad que el ahorro económico por usar un procedimiento más adecuado y no los resultados más conservadores en el diseño de las obras, pagaría con creces este tipo de investigaciones.

- Es importante que en los análisis hidrológicos se tengan en cuenta y sean ilustradas las limitaciones y condiciones en que fueron desarrollados los diferentes modelos sintéticos. Esto ayudaría de una manera decidida a seleccionar el modelo más adecuado en cada caso y que esta selección no se haga únicamente en los resultados obtenidos.

- En los pocos estudios en que los resultados de los modelos sintéticos se pudieron comparar con datos observados, todos los modelos presentaron errores considerables en la estimación del caudal pico. En todas las comparaciones y evaluaciones realizadas el único criterio considerado fue el caudal pico, otras importantes características del hidrograma de escorrentía como el tiempo al pico y el volumen del hidrograma no fueron consideradas.

- No se recomienda acá una metodología específica para el cálculo del hidrograma unitario sintético. Lo más recomendable sería adelantar una exhaustiva investigación sobre la "nacionalización" de algunas de estas metodologías, y no aplicarlas directamente. En este sentido se reconoce el trabajo de Cardona y Londoño (1991) tratando de adoptar a nuestro medio el modelo de Williams y Hann. Tal vez lo mejor sería recomendar como método sintético del hidrograma unitario el procedimiento de regionalización de modelos conceptuales, con el cuidado de usarlo solo en las regiones donde sea estimado y no

usarlo en otras regiones. Hace falta igualmente un trabajo mucho más exhaustivo sobre la aplicabilidad de los métodos sintéticos en nuestro medio, comparando los resultados con datos observados en la misma dirección de Ochoa y Toro (1991).

4. REFERENCIAS

Ardis C.V Jr. A double triangular model for generating storm hydrographs. Proceedings of the First World Congress on Water Resources, vol 4. Chicago, 1973.

Arias L.A y Palacio C.M. Estudio Hidrológico de la quebrada La Miel. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Atehortúa C.G y Moreno O.L. Control de inundaciones de la zona central de Medellín. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1990.

Barnes B.S. Unitgraph Procedures. Buream of Reclamation, Departamento del Interior de Estados Unidos, 1952.

Bidwell V.J. Regression Analysis of Nonlinear Catchment Systems. Water Resources. Research, vol. 7(5), p. 1118-1126, 1971.

Boyd M.J. A storage - routing model relating drainaje basin hydrology and geomorphology. Water Resources Research, 1978.

Boyd M.J. A linear branched network model for storm rainfall and runoff. In Rainfall - Ronoff Relationship, edited by V.P Singh, III-25. Littleton, Colo. Water Resources Publications, 1982.

Boyd M.J, Pilgrim D.H y Cordery I. A storage routing model based on catchment geomorphology. Journal of Hydrology, 1979.

Calderon L.V y Bedoya J.F. Estudio Hidrológico de la quebrada La Volcana. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Cano L.P y Sierra M.L. Estudio Hidrológico de la quebrada Piedras Blancas. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Cardona A y Londoño G.A. Calibración de los parámetros del modelo de Williams y Hann para cuencas Antioqueñas. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1991.

Chow V.T. Runoff. Handbook of Applied Hydrology, Chow VT. Editor McGraw Hill Inc., New York, 1988.

Chow V.T, Maidment D.R y Mays L.W. Applied Hydrology. Mc Graw Hill Book Co, New York, 1988.

Clark C.O. Storage and the U.H. Trans.Am.Soc.Civil Engrs, Volumen 110, 1945.

Commons G.G. Flood Hydrographs. Civil Engineering, 1942.

Cordery I. Synthetic unit graphs for small catchments in Eastern New South Wales. Civil Engineering Transactions of the Institute of Engineers, vol 10. Australia, 1968.

Cordery I. Estimation of design hydrographs for small rural catchment. Journal of Hydrology, 1971.

Croley II T.E. Gamma Synthetic hydrograph. Journal of Hydrology, vol 47, p 41-52, 1980.

Dávila F.I y García G.L. Estudio Hidrológico de la quebrada La Doctora. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Duque J.G y Nigrinis O.R. Estudio hidrológico de la quebrada Doña Maria. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Eaton T.D. The derivation and Synthesis of unit hydrographs when rainfall records are inadequate. Institution of Engineers Journal (Australia), 1954.

Edson C.G. Parameters for relating unit hydrographs to watershed characteristics. Transactions of the American Geophysical Union, 1951.

Franco M.J y Lisker C.E. Estudio Hidrológico y diseño de un canal para la quebrada El Chumbimbo. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1994.

Gray D.M. Synthetic unit hydrographs for small watersheds. Journal of the hydraulics Division, proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1961.

Gray D.M. Derivation of hydrographs for small watersheds from measurable physical characteristics. Research Bulletin 506, 514-79, Agricultural and Home Economics Experiment Station. Lowa State University, Ames, 1962.

Gray D.M. Handbook on the Principles of Hydrology. A general text with special emphasis on Canadian conditions. Editor In-Chief. United States of America, 1970.

Gregory R.L y Arnold C.E. Ronoff - rational runoff formulas. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1932.

Gupta V.K, Waymire E y Wang C.T. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. Water Resources Research, 1980.

Gutiérrez A.M y Moreno M.C. Estudio Hidrológico de la quebrada La Ayurá. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1992.

Hickok R.B, Keppel R.V y Rafferty B.R. Hydrograph synthesis Agricultural Engineering, 1959.

Hoffmeister G y Wessman R.N. Accuracy of Synthetic hydrographs derived from representative basins. Hydrol. Science Bul. vol 22(2) : 297 - 312 , 1977.

Jaramillo A.E y Montoya A.C. Control de inundaciones de la quebrada Bodegas (municipio de Santuario). Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1990.

Laurenson E.M. Hydrograph synthesis by runoff routing. Technical Report No 66, Water Resources Laboratory. University of New South Wales, Kensington, New South Wales, Australia, 1962.

Lienhard J.H. A statistical mechanical prediction of the dimensionless unit hydrograph. Journal of Geophysical Research, 1964.

Linsley R.K. Application of the synthetic unigraph in the western Mountain States. Transactions of the American Geophysical Union, 1943.

López L.E y Martinez D. Análisis y mitigación de riesgos de inundación en la quebrada La Saladita. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín, 1993.

Morgan P.E. y Johnson S.M. Analysis of Synthetic Unit - Graph methods. ASCE J. Hydr. Div., vol 88 (HY2) : 199 - 220, 1962.

Ochoa J.C y Toro J.C. Acerca de la aplicabilidad de algunas Hidrógrafas Unitarias Sintéticas. Tesis. Medellín, 1992.

O'Kelly J.J. The employment of unit hydrograph to determine the flows of Irish arterial drainage channels. Proceedings of the Institution of civil engineers. Dublin, Irlanda, vol 4 (3), p 365 - 412, 1955.

Osorio I.D y Quintero Y.A. Estudio Hidrológico de la quebrada La Valeria. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellin, 1992.

Ramirez M.S, Smith R.A y Mesa O.J. Estimación y regionalización del modelo de Nash para el hidrograma unitario instantáneo. XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, Nov 8 - 10, 1990.

Reich B.M y Wolf D.A. The triangle as a tentative unit hydrograph. Proceedings of First World Congress of Water Resources, Chicago, Ill, vol 4, 1973.

Rodriguez - Iturbe I. The coupling of climate and geomorphology in rainfall - runoff analysis. In Rainfall - Runoff Relationship, edited by V.P. Singh, 431-48. Littleton, Colo. Water Resources Publications, 1982.

Rodriguez - Iturbe I, Devoto, G y Valdés J.B. Discharge response analysis and hydrologic similarity : the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. Water Resources Research, 1979.

Rodriguez - Iturbe I, M González - Sanabria y Bras A. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. Water Resources Research, 1982.

Rodriguez - Iturbe I, M González - Sanabria y Caamano G. On the climatic dependence of the IUH : a rainfall - runoff analysis of the Nash model and the geomorphoclimatic theory. Water Resources Research, 1982.

Rodriguez - Iturbe I y Valdés J.B. The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resources Research, 1979.

Salazar J.E y Betancur J.E. Estudio Hidrológico e Hidráulico de las quebradas La Hueso, La Ana Diaz y La Picacha. Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellin, 1991.

Snyder F.F. Synthetic unit graphs. Transactions of the American Geophysical Union, 1938.

Snyder W.M, Mills W.C y Stephens J.C. A Method for Derivation of Nonconstant Watershed Response Functions. Water Research., vol. 6(1). p. 261-274, 1970.

Snyder W.M. Hydrograph analysis by the method of least squares. Proceedings ASCE, No 793, 1955.

Soil Conservation Service. Hydrology. SCS National Engineering Handbook, sec 4. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C, 1971.

Taylor A.B y Schwarz H.E. United Hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. Transactions of the American Geophysical Union, 1952.

Tennessee Valley Authority. Storm hydrographs using a double triangle model. Research paper No 9, Div of Water Control Planning, Hydrologic Research and Analysis Staff, Hydraulic Date Branch, Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tenn, 1972.

Valdés J.B, Fiallo Y y Rodríguez Iturbe I. A rainfall - runoff analysis of the geomophologic IUH. Water Resources Research, 1979.