

REFERENCIAS

- Gumbel E. J. y Goldstein, N. (1964) Analysis of empirical bivariate distributions. American Statistical Ass. Jour. Vol n, 794-816
 Hollander, M y D.A. Wolfe (1973) Nonparametric Statistical Methods. J. Wiley & Sons, Nueva York.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

RELACIONES ANALÍTICAS PARA LA ESTIMACION DEL CAUDAL MÁXIMO DE CRECIDAS

VÍCTOR CUEVAS V. (1)
 LUDWIG STÖWHAS B. (2)

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología que simplifica el cálculo del caudal máximo instantáneo, utilizando diferentes distribuciones temporales de precipitación y sin necesidad de pasar a través del hidrograma unitario.

Se usó el método del Hidrograma Unitario Sintético, con diversas distribuciones temporales de precipitación, generando un gran número de resultados en cada caso, para diferentes combinaciones de las variables que caracterizan la crecida, tales como, magnitud y duración de la tormenta, capacidad de infiltración del suelo y características geomorfológicas de la cuenca. Seguidamente, se dedujeron, mediante una serie de simplificaciones, expresiones analíticas del caudal máximo instantáneo, las que posteriormente se ajustaron, comparando sus resultados con los que se obtienen al usar el método del hidrograma unitario.

El método propuesto ya fue desarrollado por Millán (9) para la distribución Centrada de ENDESA, y se basa en el hidrograma unitario sintético propuesto por Benitez y Arteaga (7) para la zona central de Chile, siendo aplicable a cuencas de tamaño intermedio.

- (1) Ingeniero Civil, Dirección de Obras Portuarias, MOP.
- (2) Ingeniero Civil, Universidad Técnica Federico Santa María.

1. INTRODUCCIÓN

En la estimación de caudales de escorrentía directa se utilizan con mayor frecuencia las estadísticas fluviométricas de los cauces de interés. Sin embargo, cuando esta información no existe o es incompleta, se recurre a métodos indirectos de estimación de crecidas basados en relaciones precipitación-escorrentía.

Existen diversos métodos usados en Chile con esta finalidad, entre los cuales se destacan la "fórmula racional", la fórmula propuesta por Verni y King (1977) y diversas otras fórmulas empíricas (DGA, 1995), que entregan una estimación del caudal máximo de la crecida.

Uno de los métodos indirectos de estimación de crecidas más usado en el país es el del hidrograma unitario, que consiste en una función de transferencia lineal que transforma una cierta precipitación efectiva en escorrentía directa. Sin embargo, los resultados de este método dependen en gran medida de la distribución temporal de precipitaciones que se adopte (1,3,5,6).

Como una manera de simplificar los cálculos, se deducen expresiones analíticas del caudal máximo instantáneo, para diferentes distribuciones temporales de precipitación. Las distribuciones consideradas son aquellas que representan distribuciones observadas en la zona central de Chile, distribuciones D1, D2, D3, D4 y D5 propuestas por Benítez y Verni (1), correspondientes a distribuciones promedio, envolventes medias y envolventes extremas a distribuciones históricas observadas, junto con otras dos distribuciones, una de Intensidad Uniforme, que genera un caudal máximo de muy baja magnitud, y otra que maximiza la crecida respetando la curva intensidad-duración de la tormenta, estimada a través de la fórmula de Grunsky o del uso de coeficientes generalizados (Seguel-Stöwhas (5)).

Se utilizaron expresiones deducidas para el caso de escurrimiento en régimen, las que fueron modificadas para extender su aplicación a casos más generales. Para ello, se compararon sus resultados con los obtenidos usando el método del hidrograma unitario sintético propuesto por Benítez y Arteaga (7). Este procedimiento se repite con cada una de las distribuciones de precipitación consideradas en este estudio.

Un desarrollo distinto requiere la distribución Seguel-Stöwhas (5). Este consiste en obtener una función con la forma del caudal máximo, pero amplificada por una constante, la que, posteriormente, se ajusta mediante comparación con los resultados que entrega el método del hidrograma unitario sintético.

2. HIDROGRAMAS DE CRECIDA

Se utiliza el método del hidrograma unitario sintético propuesto por Benítez y Arteaga (7) para la generación de ondas de crecida. Tanto este método, como los rangos de las variables que participan en la determinación del caudal máximo se describen en el trabajo de Cuevas (6) y son los mismos utilizados anteriormente por Millán (9). Con la información anterior se generó una base de datos con los resultados del caudal máximo para las diferentes distribuciones de precipitación consideradas en aquel trabajo.

Esta base de datos está compuesta por 720 casos, para cada distribución de precipitaciones considerada, correspondientes a 720 combinaciones de las variables de entrada dentro de los rangos normalmente esperados en la zona central de Chile (9).

Los valores considerados de las variables que caracterizan la crecida pluvial son:

Precipitación total (P): 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400 y 500 mm.
Duración de la tormenta (TD): 24, 48 y 72 horas.
Parámetro Geomorfológico (GM): 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 y 6400 (km²).
Curva Número (NC): 60, 70 y 80.

Se define como "Parámetro Geomorfológico" al factor,

$$GM = \left(\frac{Lc \cdot Lg}{\sqrt{S}} \right) \quad (1)$$

que representa las características geomorfológicas de la cuenca considerada y determina los parámetros del hidrograma unitario utilizado.

En esta última expresión,

Lc: longitud del cauce principal, en km.
Lg: distancia del centro de gravedad de la cuenca a la salida, en km.
S: índice que representa la pendiente media de la cuenca, calculado según la fórmula de Mociornita.

Posteriormente, se validó una expresión analítica generalizada del caudal máximo instantáneo, en base a los resultados que se obtuvieron usando el método del hidrograma unitario sintético, para las diferentes combinaciones de las variables de entrada recientemente cuantificadas.

3. CAUDAL DE ESCURRIMIENTO EN RÉGIMEN

Se utilizó la propiedad del hidrograma de crecida de tender al escurrimiento en régimen cuando la duración de una precipitación efectiva, de intensidad constante, resulta mayor que el tiempo base del hidrograma unitario (9). Esto se demuestra al analizar lo que sucede con la ecuación (2), puesto que, si la intensidad de la precipitación efectiva es constante en el tiempo, el término que la representa puede salir fuera de la integral y, si la duración de la precipitación es mayor que el tiempo base del hidrograma unitario, el resultado de la integración de éste, en función del tiempo, es igual al volumen unitario, lo cual se resume en los siguientes pasos:

$$q(t) = \int_0^t i(\tau) \cdot qu(t-\tau) \cdot \delta\tau \quad (2)$$

Si $i(t)$ es constante y se integra hasta más allá del tiempo base,

$$q(t) = i \quad (3)$$

De este modo, el caudal por unidad de superficie de una cuenca, alcanza un valor máximo igual a la intensidad de precipitación efectiva.

4. RANGOS DE VALIDEZ DEL PARÁMETRO GEOMORFOLÓGICO

Para cada una de las distribuciones de precipitación utilizadas en este estudio, las que para fines prácticos se traducen en hietogramas discretos, se estimaron los rangos del parámetro geomorfológico dentro de los cuales es válida la condición de escurrimiento en régimen, situación que ocurre cuando el tiempo base del hidrograma unitario es menor que el intervalo de discretización del hietograma. En la tabla N°1 se muestran los valores máximos del parámetro geomorfológico (GM) para los cuales se cumple la condición de escurrimiento en régimen para las distintas distribuciones.

Tabla N°1

TD [hr]	GM _{máx} [km ²]		
	$t_b < TD/12$ Distribuciones D1, D2, D3, D4 y D5	$t_b < 2 \cdot TD/12$ Distribución Centrada de ENDESA	$t_b < 4 \cdot TD/12$ Distribución de Intensidad Constante
24	3,4	19,3	110,6
48	19,3	110,6	633,8
72	53,6	307,1	1760,1

La variable " t_b " es el tiempo base del hidrograma unitario y su valor máximo no debe exceder el mostrado en la tabla N°1 para que se cumpla la condición de escurrimiento en régimen, en los dos primeros casos, de acuerdo a la discretización propuesta por sus autores, y en el tercer caso, considerando el tiempo requerido para hacer despreciable la variabilidad de la infiltración (6).

En la tabla N°1 se puede observar que mientras mayor es el intervalo de permanencia de una intensidad efectiva constante y en consecuencia, del tiempo base del hidrograma unitario que puede aceptar una distribución de precipitaciones en escurrimiento en régimen, mayor también es el parámetro geomorfológico que cumple con esta condición.

5. EXPRESIONES ANALÍTICAS DEL CAUDAL MÁXIMO POR UNIDAD DE ÁREA

5.1. Distribuciones de Precipitación D1, D2, D3, D4, D5, Uniforme y Centrada de ENDESA.

Se dedujeron las expresiones analíticas del caudal máximo por unidad de área, para las distribuciones de precipitación D1, D2, D3, D4, D5 y Uniforme, basándose en el procedimiento realizado por Millán (9) para la distribución Centrada de ENDESA. Únicamente, la distribución de precipitaciones que maximiza la crecida (5) requiere de un tratamiento diferente, el que será explicado posteriormente.

Si el caudal por unidad de área en escurrimiento en régimen, es igual a la intensidad de precipitación efectiva (9), el caudal máximo posible corresponderá a la intensidad efectiva máxima, que se obtiene del intervalo de máxima intensidad según la distribución en análisis, a la que deberá restársele la tasa de infiltración, que en este caso se supuso constante una vez completada la tasa de infiltración inicial, resultante de la aplicación del método de la Curva Número. Efectuando los cálculos, (9) se obtiene la siguiente expresión:

$$q_m = a \cdot \frac{P}{TD} \cdot \frac{S \cdot (P - 0,2 \cdot S)}{3,3 \cdot TD \cdot (P + 0,8 \cdot S)} \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] \quad (4)$$

En la expresión anterior, "a" es una constante que depende de la distribución de precipitaciones utilizada y "S" se obtiene del método de la Curva Número mediante la expresión:

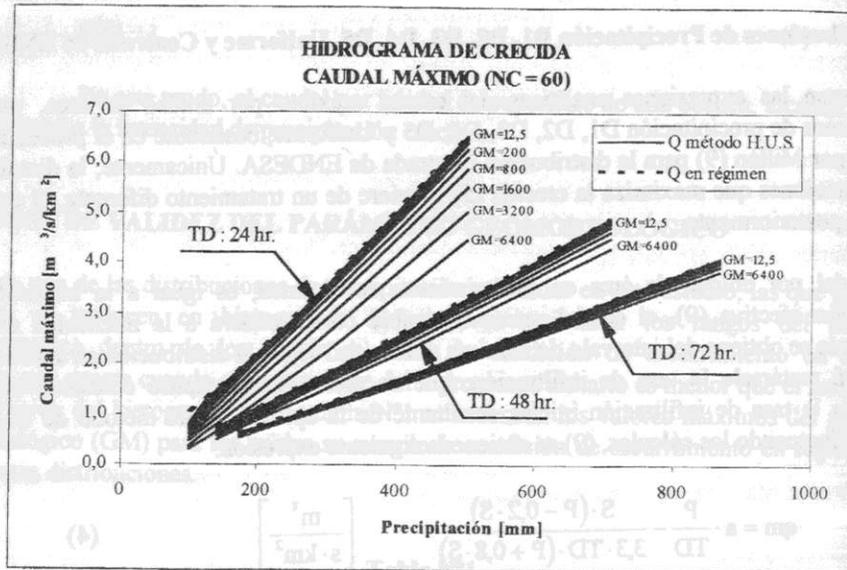
$$S = \left(\frac{1000}{NC} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad (mm) \quad (5)$$

Esta relación se señala con línea punteada en la figura N°1, para la distribución D3 de precipitaciones, observándose que el caudal máximo instantáneo calculado usando el método del hidrograma unitario sintético, entrega consistentemente resultados menores al caudal en régimen para valores del parámetro GM por sobre el rango de validez que aparece en la tabla N°1. La diferencia entre el máximo en régimen y el máximo real resulta ser una función de las variables precipitación (P), parámetro GM, duración de la tormenta (TD) y curva número (NC), por lo cual, se optó por modificar la ecuación (4), restándole un término de la forma:

$$a \cdot \frac{GM^b \cdot P^c}{TD^d \cdot NC^e} \quad (6)$$

Mediante regresión no lineal se ajustaron los valores de las constantes, para cada distribución temporal de precipitaciones usada, los que se muestran en la tabla N°2.

Figura N°1: Distribución D3 de Precipitaciones.



5.2. Distribución de Precipitaciones Seguel- Stöwahas.

El objetivo del procedimiento que será explicado a continuación, es encontrar una función analítica para el caudal máximo, cuyos resultados se asemejen a los obtenidos usando el método del hidrograma unitario sintético para las 720 combinaciones de las variables de entrada que se utilizaron en el trabajo de Cuevas (6).

La expresión del hidrograma de crecida, que utiliza el método del hidrograma unitario, se puede expresar en forma discreta según la ecuación:

$$q(t) = \sum_{j=1}^k PEF_j \cdot q_{uk-j+1} \quad (7)$$

En el caso de esta distribución, que utiliza la fórmula de Grunsky para definir el hietograma, se dispone de expresiones analíticas para sus ordenadas, por lo que, mediante una serie de suposiciones y aproximaciones (6), puede deducirse una expresión que representa un límite superior para el valor del caudal máximo de la crecida, obteniéndose, la siguiente expresión:

$$q_m = 0,716 \cdot \frac{P}{\sqrt{TD}} \cdot \frac{1}{GM^{0,1985}} \cdot \frac{S \cdot (P - 0,2 \cdot S)}{3,3 \cdot TD \cdot (P + 0,8 \cdot S)} \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] \quad (8)$$

Para determinar el grado de validez de la fórmula (8), sus resultados se compararon con los que se obtienen al usar el método del hidrograma unitario sintético, obteniéndose un coeficiente de correlación igual a 0,997. Esto indica, que la forma de la expresión (8), se aproxima bastante bien a la forma de la ecuación buscada. Sin embargo, los caudales estimados por la ecuación (8), resultan mayorados producto de la utilización del coeficiente teórico cuyo valor es 0,716. Se ajustó el valor de esta constante, efectuando una regresión no lineal de la ecuación (8), con los resultados que entrega el método del hidrograma unitario sintético. De este modo, se obtuvo la expresión del caudal máximo por unidad de área para la distribución de precipitaciones que maximiza la crecida (6):

$$q_m = 0,39 \cdot \frac{P}{\sqrt{TD}} \cdot \frac{1}{GM^{0,1985}} \cdot \frac{S \cdot (P - 0,2 \cdot S)}{3,3 \cdot TD \cdot (P + 0,8 \cdot S)} \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] \quad (9)$$

Los valores obtenidos al utilizar la ecuación (9), tienen una correlación de 0,9995 con los resultados que entrega el método del hidrograma unitario sintético. Los mayores errores corresponden a caudales de baja magnitud y son menores que 0,827 [m³/s/km²].

5.3. Expresión Analítica Generalizada.

Las expresiones analíticas deducidas se pueden generalizar a una expresión común que tiene la siguiente forma:

$$q_m = a \cdot \frac{P}{TD^b} \cdot \frac{1}{GM^c} \cdot \frac{S \cdot (P - 0,2 \cdot S)}{3,3 \cdot TD \cdot (P + 0,8 \cdot S)} \cdot d \cdot \frac{GM^e \cdot P^f}{TD^g \cdot NC^h} \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] \quad (10)$$

Donde P está en mm., TD en horas, GM en km² y S en mm.

En la tabla N°2, se muestran los valores de las constantes de la ecuación (10), para cada una de las distribuciones de precipitación vistas en este estudio.

Por otro lado, en la tabla N°3, se muestran los coeficientes de correlación, entre los valores que entrega el método del hidrograma unitario sintético y los que resultan de usar la función analítica, y los máximos errores, absolutos y relativos, que se producen al comparar los resultados de ambos métodos.

Tabla N°2

Distribuciones de Precipitación	Constantes de la expresión analítica							
	a	b	c	d	e	f	g	h
D1	1,208	1	0	3,488	0,154	0,912	1,387	0,241
D2	0,613	1	0	1,743	0,282	0,877	1,716	0,290
D3	0,391	1	0	1,124	0,531	0,802	2,348	0,370
D4	0,483	1	0	0,470	0,445	0,888	2,081	0,180
D5	1,244	1	0	1,533	0,175	0,945	1,408	0,098
Intensidad Uniforme	0,278	1	0	0,456	1,562	0,568	4,370	0,863
Centrada de ENDESA	0,383	1	0	1,402	0,607	0,794	2,588	0,396
Seguel- Stöwhas	0,390	0,5	0,1985	0	0	0	0	0

Tabla N°3

Distribuciones de Precipitación	C.E.P.		R ²	M.E.A. [m ³ /s/km ²]	M.E.P. %
	N°	%Total			
D1	6	0,83	0,9936	1,109	-28,37
D2	8	1,11	0,9979	0,446	-23,45
D3	10	1,39	0,9996	0,221	30,31
D4	8	1,11	0,9994	0,238	21,64
D5	22	3,06	0,9961	0,907	29,48
Intensidad Uniforme	2	0,28	0,9999	0,104	23,82
Centrada de ENDESA	10	1,39	0,9995	0,237	33,37
Seguel- Stöwhas	17	2,36	0,9998	0,676	29,43

Donde:

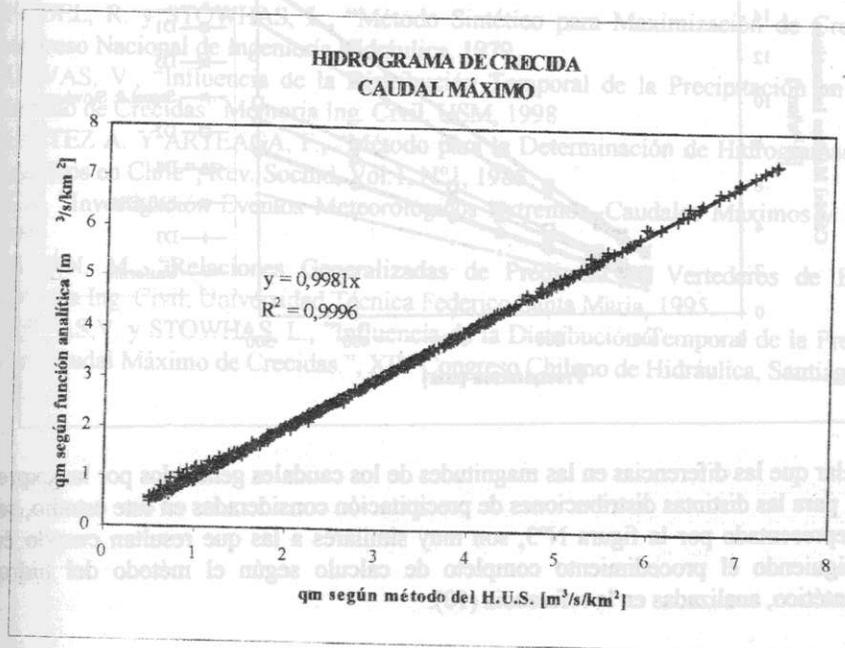
- C.E.P. : Combinaciones de las variables de entrada utilizadas en este estudio, cuyo error relativo porcentual excede el 35% y que no fueron consideradas en el análisis.
- R² : Coeficiente de correlación entre los resultados obtenidos mediante la función analítica y el método del hidrograma unitario sintético.
- M.E.A. : Máximo error absoluto, en [m³/s/km²], de los resultados que entrega la función analítica, relativo a los que se obtienen usando el método del hidrograma unitario sintético.
- M.E.P. : Máximo error porcentual de los resultados de la función analítica, con respecto a los resultados que entrega el método del hidrograma unitario sintético.

El uso de las funciones analíticas que pertenecen a las distribuciones Seguel- Stöwhas, D1, D2, D4, D5 y de Intensidad Uniforme, está restringido a combinaciones de las variables de entrada que producen errores relativos menores al 35% en los valores del caudal máximo, que como

puede apreciarse en la tabla N°4, corresponden a 83 casos de un total de 5760, la inmensa mayoría de los cuales corresponden a condiciones de alta infiltración, asociada en este caso a la Curva Número 60.

En la figura N°2 se muestra, por ejemplo, la correlación entre los caudales máximos producidos usando la función analítica y los obtenidos utilizando el método del hidrograma unitario sintético para la distribución D3 de precipitaciones.

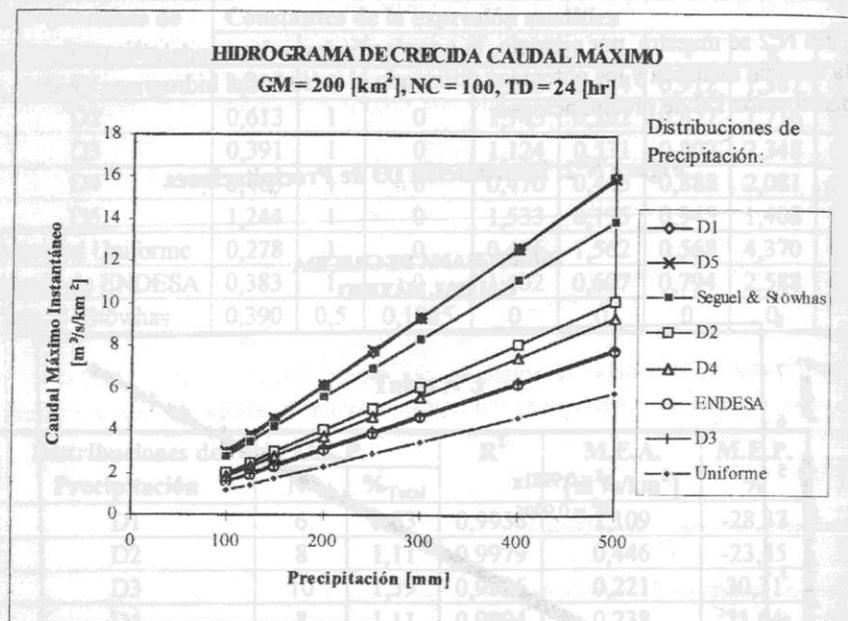
Figura N°2: Distribución D3 de Precipitaciones



En la figura N°2 (correspondiente a la distribución D3) se puede observar que las mayores diferencias en la magnitud del caudal máximo, que resulta al usar ambos métodos, corresponden a caudales de baja magnitud, fundamentalmente a los casos con alta infiltración (Curva Número = 60) y precipitaciones inferiores a 120 mm. El mismo efecto se aprecia en otras distribuciones de precipitación (Cuevas (6)), lo que restringe la aplicabilidad de las fórmulas propuestas en los casos de estimación de crecidas de bajo período de retorno.

En la figura N°3, se comparan los valores del caudal máximo, de las diferentes distribuciones de precipitación vistas en este estudio, utilizando la función analítica (10), para el caso en que GM=200 [km²], TD=24 [hr] y NC=100. La elección de una infiltración nula permite comparar, solamente, el efecto de las distribuciones de precipitación en la magnitud de la crecida.

Figura N°3



Cabe señalar que las diferencias en las magnitudes de los caudales generados por las expresiones analíticas, para las distintas distribuciones de precipitación consideradas en este estudio, según el ejemplo representado por la figura N°3, son muy similares a las que resultan cuando éstas se estiman siguiendo el procedimiento completo de cálculo según el método del hidrograma unitario sintético, analizadas en la referencia (10).

7. VENTAJAS DE LA EXPRESIÓN ANALÍTICA

La principal ventaja de contar con una expresión analítica para la obtención del caudal máximo de crecidas es la simplicidad y rapidez conseguida para obtener los resultados.

Por otro lado, en una sola expresión se ha podido agrupar a un número considerable de distribuciones porcentuales de precipitación, obteniéndose de esta forma una expresión generalizada de gran utilidad en la determinación preliminar del caudal máximo de crecidas, que permite efectuar un análisis rápido de la incertidumbre y sensibilidad de los resultados en la estimación de crecidas de diseño en base al método del Hidrograma Unitario Sintético, producto de la utilización de diversos criterios para la definición de la distribución temporal de la tormenta, dada su magnitud y duración total.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- BENÍTEZ, A. y VERNI, F., "Distribución Porcentual de las Precipitaciones de una Duración "t", para $12 \text{ h.} \leq t \leq 72 \text{ h.}$ ", VII Cong. Nac. Ingeniería Hidráulica, 1985.
- 2.- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, S.C.S., Tech. Rel. N°55, 1986.
- 3.- ESPÍLDORA, B. y ECHAVARRÍA, A., "Criterios para la Caracterización y Selección de Lluvias de Diseño", IV Congreso Nac. de Ingeniería Hidráulica, 1979.
- 4.- VARAS, E., "Hietogramas de Tormentas de Diseño", VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, 1985.
- 5.- SEGUEL, R. y STÖWHAS, L., "Método Sintético para Maximización de Crecidas", IV Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, 1979.
- 6.- CUEVAS, V., "Influencia de la Distribución Temporal de la Precipitación en el Caudal Máximo de Crecidas" Memoria Ing. Civil, USM, 1998.
- 7.- BENITEZ A. Y ARTEAGA, F., "Método para la Determinación de Hidrogramas Unitarios Sintéticos en Chile", Rev. Sochid, Vol.1, N°1, 1986.
- 8.- DGA, "Investigación Eventos Meteorológicos Extremos, Caudales Máximos y Mínimos", 1994.
- 9.- MILLÁN, M., "Relaciones Generalizadas de Prediseño en Vertederos de Embalses", Memoria Ing. Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, 1995.
- 10.- CUEVAS, V. y STOWHAS, L., "Influencia de la Distribución Temporal de la Precipitación en el Caudal Máximo de Crecidas.", XIV Congreso Chileno de Hidráulica, Santiago, 1999.

distribuciones temporales de la precipitación en las tormentas intensas es motivo de diversos fines, meteorológicos, hidrológicos, edafológicos o de ingeniería. Obtener representativos de esas distribuciones requiere decisiones y acciones metodológicas antes y durante la síntesis de los patrones de comportamiento.

Se exponen algunas alternativas para caracterizar los eventos (tormentas intensas) (conjuntos) y analizar y para sintetizar esos patrones. Se discuten criterios mínimos (magnitud e intensidad) para definir eventos críticos, las pautas para desagregarlos, y los métodos de síntesis propuestos por Elgim et al. y por Huff.

El estudio experimental contempla alrededor de un millar de tormentas severas registradas en siete años con 30 años de longitud promedio de serie, situadas en la región central de Argentina.

Como resultado del análisis de resultados se propone una metodología para definir hietogramas críticos y su probabilidad de ocurrencia.