

ESTIMACIÓN DE LÁMINAS MÁXIMAS DE LLUVIA A PARTIR DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA DIARIA

Carlos M. García, Gabriel E. Caamaño Nelli, Clarita M. Dasso

Resumen

En sitios sin registros pluviográficos es posible estimar, a partir de datos de lluvia diaria, láminas de lluvia máximas de duraciones menores o iguales a 24 horas, para utilizar en diseño hidrológico. Estas técnicas se basan en la existencia de vínculos entre las láminas máximas diarias (1 día pluviométrico), las de 24 horas y las de duraciones menores.

El objetivo de este estudio es discutir la aptitud de diversas técnicas de cálculo de esas relaciones y proponer una metodología en particular para la estimación de lluvias máximas de duraciones menores a 24 horas, estableciendo límites y errores medios esperados en su aplicación.

Para la fase experimental se emplean registros de siete pluviógrafos con series de 22 a 38 años, emplazados en la región central de Argentina. El análisis incluye evaluaciones de los siguientes aspectos: la sensibilidad de los resultados al método de estimación de lluvias máximas; la dependencia de los vínculos mencionados con la recurrencia de las láminas; la universalidad de los valores obtenidos para la región de estudio, y la conveniencia de emplear cocientes zonales y regionales.

Palabras clave: diseño hidrológico, lluvias máximas, pluviometría diaria.

INTRODUCCIÓN

Para predecir caudales críticos y, consecuentemente, para ingeniería de diseño de obras hidráulicas, es esencial asociar una probabilidad a lluvias máximas de distinta duración.

Deducir la probabilidad de ocurrencia de un evento futuro requiere contar con registros continuos de precipitación (pluviografía), escasos en Argentina (como en muchos lugares del mundo), tanto por su cobertura espacial como por la extensión temporal de sus series.

Existen, en cambio, grandes volúmenes de datos diarios (pluviometría), a partir de los cuales, con técnicas apropiadas, se pueden estimar lluvias extremas de duración menor, asociadas a un período de retorno. Estas técnicas se fundan en la determinación de vínculos entre los máximos precipitados en un día (con horario fijo de medición), en 24

horas y más breves. (Hershfield, 1961; Reich, 1963; Bell, 1969; Pierrehumbert, 1977; Chen, 1983; Franco et al., 1996).

En lo que se refiere a los vínculos $r_{d_1, d_2, T}$ entre láminas máximas de lluvia h_1 y h_2 , de duraciones d_1 y d_2 respectivamente, y de igual período de retorno T , existen antecedentes para persistencias comprendidas entre 5 minutos y 24 horas en varios países. Tales relaciones fueron calculadas a partir de curvas intensidad-duración-recurrencia (i-d-T), obtenidas a su vez de fórmulas empíricas o de funciones de densidad de probabilidad (FDP), calibradas con las láminas máximas anuales observadas para distintas duraciones.

La dependencia entre esas relaciones y el período de retorno de las láminas es uno de los aspectos analizados en los estudios. Los vínculos provenientes de ecuaciones i-d-T empíricas, debido a la estructura matemática de éstas, muestran general-

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Centro de la Región Semiárida - Instituto Nacional del Agua y del Ambiente
Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina

Artículo recibido el 18 de febrero de 1999, recibido en formas revisadas el 31 de marzo de 2000 y el 5 de julio de 2000 y aceptado para su publicación el 25 de julio de 2000. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

mente valores independientes de T. Las relaciones calculadas a partir de FDP, en cambio, varían con T, sin mostrar una tendencia definida. Bertoni et al. (1993), tras analizar esa variación, consideran que no es significativa y adoptan un valor medio como representativo.

Los resultados obtenidos para $r_{d_1, d_2, T}$ en Argentina, Australia, Brasil, India, Italia, México, Nigeria, URSS y USA muestran que los valores medios de estas relaciones se asemejan mucho entre sí, en especial para eventos de corta duración (d_1 y d_2 menores que 2 horas), debido a que la mayoría de las lluvias intensas están originadas por células convectivas, de similares características físicas en diferentes partes del mundo (Bell, 1969).

En consecuencia, es razonable asumir que esa estabilidad de los cocientes permite generalizar sus valores. Por ejemplo, para todo el territorio de USA las diferencias medias de las relaciones oscilaron entre 5 y 8 %, siendo del mismo orden de magnitud que los errores de muestreo. Esta similitud llevó a Bell (1969) a aplicar las relaciones observadas para USA en distintas localidades de África.

En los trabajos previos se evalúa también la relación R_T , entre las láminas máximas de igual período de retorno, $h_{24horas}$ y $h_{1día}$, correspondientes a lapsos de 24 horas móviles (pluviografía) y fijos (pluviometría), respectivamente. En todos los casos se propone un valor único R, independiente del período de retorno de las láminas involucradas.

Algunos autores no discriminan entre h_{24hs} y $h_{1día}$. Franco et al. (1996) trazan un plano de isohietas para lluvias de 24 horas, a partir de información de pluviómetros y pluviógrafos emplazados en la cuenca del valle de México. Este mapa se utiliza, en forma conjunta con los vínculos $r_{d_1, 24horas}$, para estimar lluvias de diseño de duraciones menores a 24 horas.

En el presente trabajo, para cada alternativa de estimación, se analiza en primer término la va-

riación de $r_{d_1, 24horas, T}$ y R_T en función de T (recurrencia de las láminas). Luego se evalúa la sensibilidad de los resultados a la elección de un vínculo en particular. Para juzgar la universalidad de las relaciones, se comparan las obtenidas en la región de estudio con las calculadas en otros puntos del planeta. Por último, se discute la conveniencia de emplear cocientes zonales y/o regionales.

SISTEMA EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en la provincia de Córdoba, cuyos 165.321 km² cubren un 4,4% de la República Argentina. Su altitud va de 60 a 2790 m s.n.m., con 15% del área arriba de 600 m, ocupada por altiplanicies y por tres cadenas de sierras al NW, en una estrecha banda de dirección Norte-Sur. La mayoría de la lluvia (55%) y de las máximas anuales diarias es producto de procesos frontales de verano; tormentas convectivas y orográficas (30%) y lloviznas de invierno completan el aporte. La precipitación decae de 900 a 400 mm anuales de ESE a NW, en igual sentido en que crece la temperatura.

En un estudio previo, Caamaño Nelli et al. (1995) dividieron Córdoba en siete zonas, con el fin de extrapolar curvas i-d-T. Esa partición se realizó con base en lluvia media, cota y distancia a las estaciones graficadoras. Las láminas máximas de lluvia h, de recurrencia T y duraciones d (5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360, 720, 1440 minutos y 1 día pluviométrico), provienen de dichas estaciones (Tabla 1), a las cuales se hará referencia por su sigla.

OPCIONES METODOLÓGICAS PARA EVALUAR LAS RELACIONES

Las alternativas de cálculo ensayadas para los cocientes adimensionales $r_{d_1, d_2, T}$ (entre láminas de hasta 24 horas) se describen a continuación y se hacen extensivas luego, en lo que corresponde, a los R_T , (entre máximos de 24 horas y 1 día pluviométrico).

TABLA 1: PUESTOS PLUVIOGRÁFICOS SELECCIONADOS

Estación	Sigla	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud s.n.m.	Longitud de serie
Ceres (Santa Fe)	CS	29° 53' 00"	61° 57' 00"	88 m	38 años
Córdoba Observatorio	OC	31° 24' 00"	64° 11' 00"	425 m	35 años
Laboulaye	LA	34° 07' 00"	63° 22' 00"	137 m	36 años
La Suela CIRSA	SU	31° 38' 00"	64° 35' 00"	892 m	22 años
Marcos Juárez	MJ	32° 42' 00"	62° 07' 00"	110 m	23 años
Río Cuarto	RC	33° 05' 00"	64° 16' 00"	436 m	23 años

La asociación de las variables involucradas (h-d-T) se puede lograr partiendo de una distribución probabilística, sea experimental (posición de gráfica, PG) o teórica (funciones de densidad probabilística, FDP), o bien de una ecuación i-d-T empírica, ajustada por mínimos cuadrados, donde i simboliza la intensidad de lluvia máxima. En este trabajo se experimenta con cada una de estas opciones y con combinaciones entre ellas, arribando así a ternas h-d-T diferentes, de las cuales se deducen las relaciones $r_{d1,24horas,T}$

Relaciones que parten de posiciones de gráfica

El ensayo consistió en ajustar curvas de frecuencia experimental a las series de lluvias máximas anuales de distintas duraciones, con el fin de asociar a cada valor de lámina una probabilidad de ocurrencia. Se utilizó la fórmula de Weibull, satisfactoria en series de esta índole (Chow, 1951). De esas curvas se dedujeron cocientes $r_{d1,24horas,T}$ para períodos de retorno en el rango $T \leq N+1$, donde N es la longitud de registro del pluviógrafo, en años.

Relaciones que parten de una función de densidad de probabilidad

En este caso se calcularon las relaciones entre láminas de lluvia, $h_{d,T}$, aportadas por una función de densidad de probabilidad teórica (FDP) ajustada a cada muestra observada. Puesto que el resultado depende del tipo de FDP, se hizo necesario seleccionar una. Para la Provincia de Córdoba, Caamaño Nelli et al, (1998) demostraron, basándose en el análisis estadístico de seis modelos, que la función óptima de extremos para las series de láminas (e intensidades) máximas de distintas duraciones es la distribución lognormal.

La FDP Lognormal permite arribar a una expresión analítica para $r_{d1,24horas,T}$ utilizando la ecuación general para análisis de frecuencia hidrológica propuesta por Chow (Caamaño Nelli et al., (1998); García et al., (1998)). Este vínculo analítico toma la forma:

$$r_{d1,24horas,T} = \frac{h_{d1}}{h_{24horas}} = \exp\left[\left(\mu_{d1} - \mu_{24horas}\right) + \Phi \cdot \left(\sigma_{d1} - \sigma_{24horas}\right)\right] \quad (1)$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de la serie de logaritmos de las láminas máximas de duración d , y Φ es el factor de frecuencia normal. La dependencia de la relación con la recurrencia queda explicada por Φ . En efecto, de acuerdo a la ecuación (1), según sea positiva o negativa la diferencia entre los desvíos estándar de los logaritmos de ambas muestras, la relación será creciente o decreciente en función de T .

Si bien la FDP Gumbel no presenta una expresión final analítica simple comparable a la ecuación (1), se la utilizó como estimador complementario para algunos aspectos del análisis. El ensayo se hizo sobre 20 recurrencias preestablecidas, entre 2 y 200 años.

Relaciones que parten de curvas intensidad-duración-recurrencia empíricas

El último ensayo utilizó la expresión de $r_{d1,24horas,T}$ deducida analíticamente de una fórmula i-d-T empírica, basándose en que $h_{d1} = i_{d1} \cdot d_1$. Tras analizar más de 10 tipos de tales fórmulas (que ligan la intensidad máxima de lluvia con su duración y su recurrencia), se adoptó la de Sherman (1931) por su uso generalizado y se derivó la siguiente expresión:

$$r_{d1,24horas,T} = \frac{h_{d1}}{h_{24horas}} = \frac{d_1}{24 \text{ horas}} \cdot \left(\frac{24 \text{ horas} + c}{d_1 + c}\right)^n \quad (2)$$

donde n es un parámetro obtenido por regresión múltiple entre los logaritmos de: intensidad máxima; duración y recurrencia, y c es un coeficiente de corrección que se determina optimizando dicho ajuste.

Los datos para estimar n y c provinieron de dos tipos de ternas i-d-T:

a) las deducidas con la fórmula de Weibull, que asigna a cada valor de intensidad máxima (de duración dada) una probabilidad experimental en el rango $T \leq N+1$ años y

b) las obtenidas de la FDP Lognormal, ajustada sobre cada muestra observada, sobre dos rangos posibles, $T \leq N+1$ años y $2 \text{ años} \leq T \leq 200$ años.

No existiendo motivos para desechar a priori una de esas opciones, se ensayaron ambas.

Relaciones entre láminas de 24 horas y de 1 día pluviométrico

Los vínculos R_T , entre láminas máximas $h_{24\text{horas}}$ (pluviográfica) y $h_{1\text{día}}$ (pluviométrica), de igual período de retorno T , se estimaron aplicando una metodología similar a la descrita para duraciones inferiores. La lámina pluviográfica se obtiene desplazando el intervalo de 24 horas hasta encontrar el mayor monto de lluvia precipitado en cada año, mientras que la lámina pluviométrica (o diaria) es la máxima anual observada en un lapso fijo, comprendido entre las 9:00 horas de un día calendario y las 9:00 horas del día siguiente.

Para derivar estas relaciones se consideró lo siguiente:

a) No son aplicables las funciones i-d-T, ya que la duración de ambas lluvias es la misma

b) Es posible estimar los vínculos a partir de una expresión equivalente a la ecuación (1) dada la comprobación realizada para la FDP Lognormal como función óptima de extremos para las series de láminas máximas diarias (García, 1994).

$$R_T = \frac{h_{24\text{horas}}}{h_{1\text{día}}} = \exp\left[(\mu_{24\text{horas}} - \mu_{1\text{día}}) + \right. \quad (3)$$

$$\left. \Phi \cdot (\sigma_{24\text{horas}} - \sigma_{1\text{día}})\right]$$

DEPENDENCIA DE LAS RELACIONES CON LA RECURRENCIA

Estimaciones por posición de gráfica

Las relaciones $r_{d1,24\text{horas},T}$ para duraciones entre 5 minutos y 24 horas, estimadas por PG varían de modo muy similar frente a T en todas las estaciones estudiadas. La Figura 1 muestra esa tendencia para una de ellas.

Como $r_{d1,24\text{horas},T}$ no tiene definición analítica en función de T , para el análisis hubo que elegir un valor representativo. Si se divide el rango de T en tres intervalos, se aprecia que:

a) Si $T < 2$ años, los valores no interesan para diseño hidrológico.

b) Para $2 \text{ años} \leq T \leq (N+1)/2$ años, la relación fluctúa con amplitud variable, sin tendencia definida.

c) El intervalo, $(N+1)/2 < T \leq N+1$ no es representativo, ya que el único punto que incluye, $r_{d1,d2,N+1}$ (relaciones entre las mayores láminas de cada serie), presenta importante incertidumbre en la asignación, por PG, del período de retorno (Cunane, 1989).

Por lo tanto, se adopta como valor representativo la $r_{d1,d2,T}$ media en el rango $2 \text{ años} \leq T \leq (N+1)/2$ años.

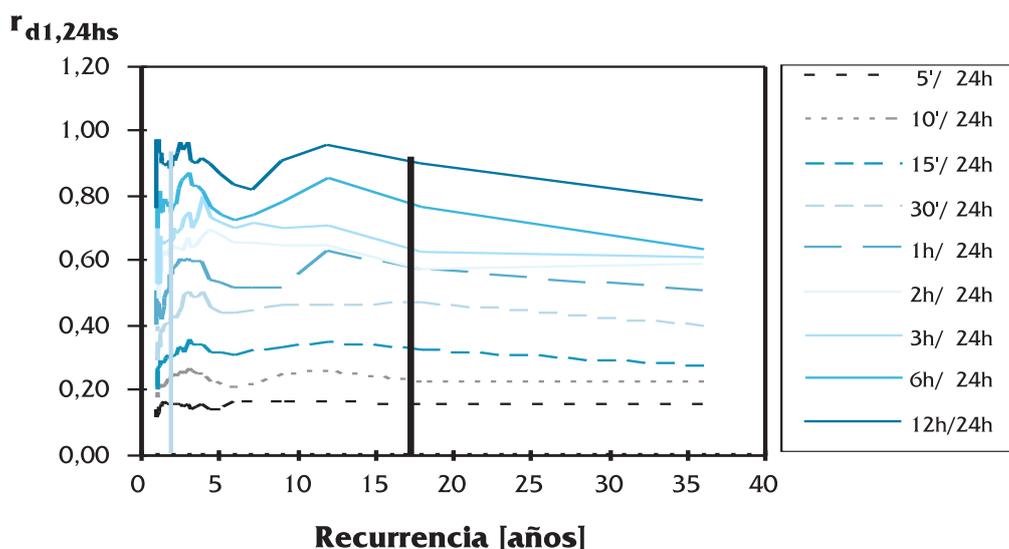


Figura 1: $r_{d1,24hs,T}$ a partir de PP Weibull. Estación Córdoba Observatorio

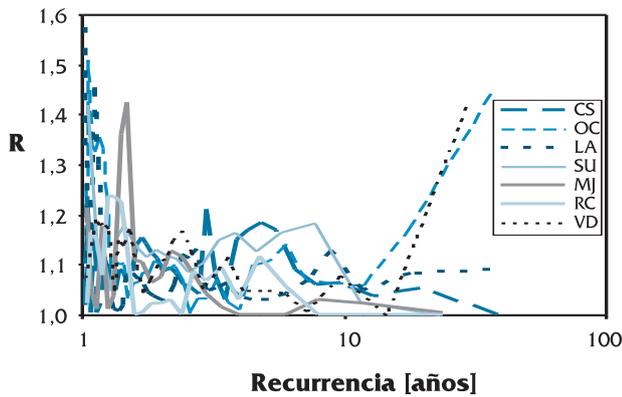


Figura 2: R_T a partir de PP Weibull.

Las relaciones R_T se comportan frente a T en forma similar a las $r_{d1,24horas,T}$ (Figura 2). Ello lleva a elegir como típico de una estación el valor medio de R para el rango $2 \text{ años} \leq T \leq (N+1)/2 \text{ años}$.

Estimaciones con una función probabilística - FDP

Las relaciones $r_{d1,d2,T}$ entre láminas de lluvias máximas de duraciones de 24 horas o menores no evidencian una tendencia definida, creciente o decreciente, frente a T , como se puede observar en la Figura 3, para una de las estaciones estudiadas. Esta particularidad, aunada a la estructura de la ecuación (2) permite deducir que:

a) Las $r_{d1,d2,T}$ son monótonas. Crecen o decrecen en función de T según el signo de la diferencia entre los valores de ρ en la ecuación (1).

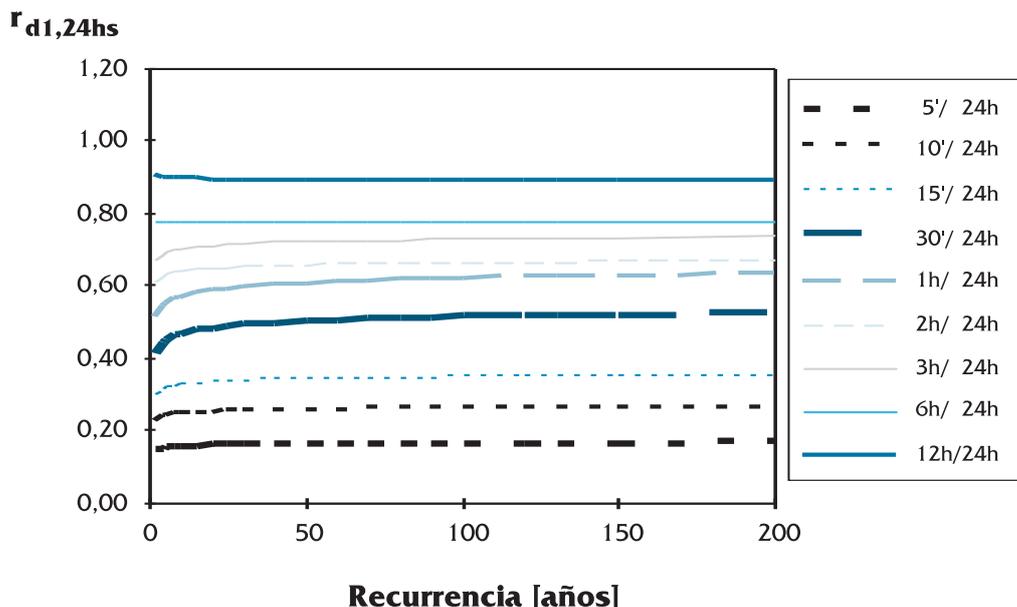


Figura 3: $r_{d1,24hs,T}$ a partir de FDP Lognormal. Estación Córdoba Observatorio

b) Más del 50% de la variación se da para $T \leq 25$, debido a que el factor de frecuencia Φ muestra incrementos no lineales cuando aumenta T (Camaño et al, 1997).

c) Para que $r_{d1,24hs,T}$ no dependa de T , el desvío estándar de las dos series debe coincidir. La Figura 4 exhibe los σ en los 7 pluviógrafos.

d) Si bien la ecuación (1) describe en forma analítica a $r_{d1,24horas,T}$, su aplicación se limita a duraciones para las cuales se estiman μ_{d^*} y σ_{d^*} .

e) Al ser monótona la función (1), el valor medio de $r_{d1,24horas}$ depende del rango de T elegido.

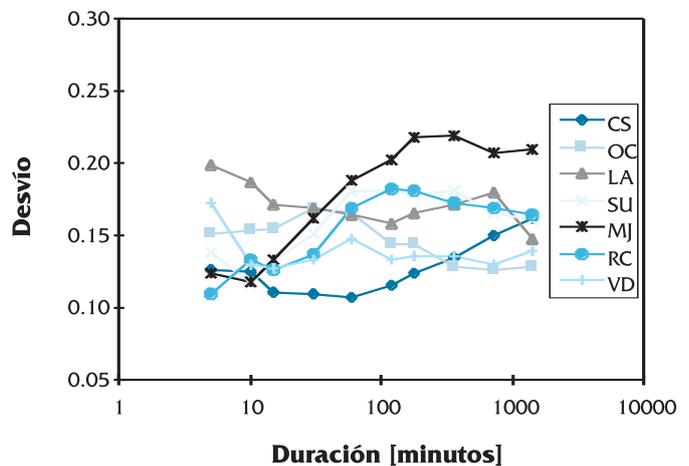


Figura 4: Desvíos de las series de logaritmos de láminas máximas de distintas duraciones.

En más del 85 % de las 63 series de $r_{d_1,24horas,T}$ de 9 duraciones d_1 (5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360 y 720 minutos) en las 7 estaciones de la región- los desvíos relativos con respecto a la media, en el rango 2 años $\leq T \leq 50$ años, fueron inferiores a 0,15. Sólo en el 5 % de las series, la mayor diferencia relativa superó 0,20, con un máximo de 0,31.

En cuanto a las series con valores de $d_1 \leq 30$ minutos, todas presentan variaciones menores a 0,20. En consecuencia, si se acepta el margen de error que esto implica, se puede considerar a la media como representativa del comportamiento en el intervalo.

En cambio, las relaciones R_T , entre lluvias de 24 horas y 1 día, muestran una tendencia decreciente frente a T, a partir de estimaciones con la FDP Lognormal (Figura 5).

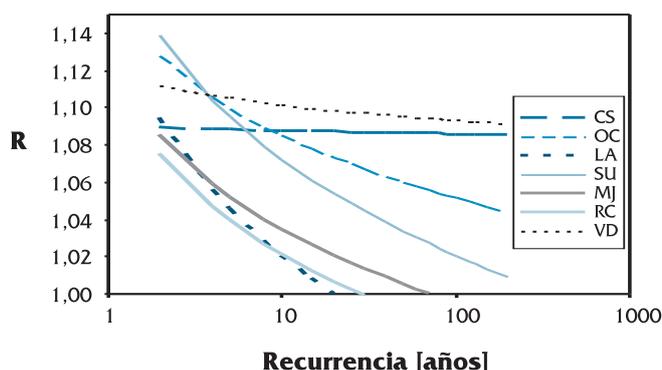


Figura 5: R_T a partir de FDP Lognormal

En todos los casos, la diferencia negativa entre los σ de la ecuación (3) es la que provoca la tendencia monótona decreciente respecto a T.

Se dan valores de $R_T < 1$ para $T > 20$ años, lo cual conlleva una inconsistencia física, ya que la lámina de 24 horas debe ser al menos igual a la diaria. Este problema es común también si se utiliza FDP Gumbel, con algunas excepciones (relaciones crecientes con T), de donde se infiere que la tendencia decreciente dada por la FDP Lognormal se

debe más a la forma de representar el proceso físico que a las características propias del mismo.

Estimaciones tomadas de curvas i-d-t empíricas

En general, las funciones i-d-T empíricas establecen una proporcionalidad directa entre intensidad de lluvia máxima y recurrencia, o una función de ésta. En consecuencia, las relaciones analíticas $r_{d_1,d_2,T}$ a las que conducen son independientes de T. Sólo el cociente derivado de la ecuación h-d-T planteada por Pfafstetter (1957) varía con T, pero su forma compleja y la cantidad de parámetros (al menos 6) llevan a desecharla de antemano.

La Tabla 2 presenta, entre otros, los valores de los cocientes obtenidos de la relación (2) en la estación Córdoba Observatorio, según las alternativas de datos de calibración. Valores de r^2 de regresión $> 0,987$ en toda la región indican el nivel de ajuste alcanzado.

SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS A LAS DISTINTAS TÉCNICAS.

El análisis comparativo se realizó sobre los cocientes representativos para el rango de recurrencias comprendidas entre 2 años $\leq T \leq (N+1)$ años.

Las relaciones entre láminas de duraciones hasta 24 horas presentan, en el 90% de los casos, diferencias entre las distintas técnicas y la PG Weibull menores al 5%, y todas las variaciones son inferiores al 15%. En la Tabla 2 se muestran los valores $r_{d_1,24hs}$ resultantes de cada técnica para una estación seleccionada.

Un comportamiento semejante se observa en todos los puestos, aún considerando mayores recurrencias ($T \leq 200$ años). En consecuencia, en esta región, el vínculo $r_{d_1,24hs,T}$ no es sensible a la técnica adoptada. Este resultado adquiere mayor trascendencia debido a que dicha decisión metodológica es uno de los temas más discutidos en hidrología estadística (França Pires, 1994).

Tabla 2: $r_{d_1,24hs}$ a partir de distintas técnicas de estimación. Estación OC.

Estimación h-d-T	$r_{5',24hs}$	$r_{10',24hs}$	$r_{15',24hs}$	$r_{30',24hs}$	$r_{60',24hs}$	$r_{2h,24hs}$	$r_{3h,24hs}$	$r_{6h,24hs}$	$r_{12h,24h}$
PG Weibull	0,153	0,245	0,328	0,463	0,570	0,645	0,710	0,800	0,906
FDP Lognormal	0,155	0,240	0,319	0,447	0,544	0,630	0,690	0,779	0,900
FDP Gumbel	0,154	0,237	0,316	0,443	0,542	0,628	0,683	0,769	0,885
Empírica/PG	0,148	0,236	0,297	0,406	0,514	0,617	0,676	0,778	0,885
Empírica/Logn.	0,157	0,251	0,316	0,433	0,546	0,649	0,707	0,802	0,899
Promedio	0,153	0,242	0,315	0,438	0,543	0,634	0,693	0,786	0,895

ESTIMACIÓN DE LÁMINAS MÁXIMAS DE LLUVIA A PARTIR DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA DIARIA

Tabla 3: R_T a partir de distintas técnicas de estimación

Estimación h-d-T	CS	OC	LA	SU	MJ	RC	VD	Media
PG Weibull	1,095	1,075	1,065	1,124	1,046	1,045	1,079	1,076
FDP Lognormal	1,088	1,104	1,053	1,103	1,058	1,046	1,106	1,080
FDP Gumbel	1,079	1,125	1,070	1,087	1,041	1,037	1,122	1,080
Promedio	1,088	1,101	1,063	1,105	1,049	1,043	1,102	

La Tabla 3 presenta un análisis similar sobre R_T para cada una de las estaciones.

Se observaron diferencias, debidas al método, menores al 5% para todas las estaciones. Si bien estas variaciones no son significativas, las inconsistencias físicas de los resultados limitan la aplicabilidad de las técnicas fundadas en distribuciones probabilísticas.

En consecuencia, resulta conveniente considerar representativos de los cocientes entre láminas máximas, los valores medios obtenidos de PG Weibull para 2 años $\leq T \leq (N+1)/2$ años, tanto de duraciones menores y 24 horas como de 24 horas y 1 día pluviométrico.

CONTRASTE CON RELACIONES OBTENIDAS EN OTROS PAÍSES

Los cocientes adimensionales obtenidos en la

región de estudio se contrastaron con los correspondientes a más de 40 localidades de 10 países de los 5 continentes. La Tabla 4 resume los valores máximo y mínimo estimados por región para cada rango.

Para aquellos estudios, indicados con * en la tabla, que no incluyen los vínculos entre lluvias máximas de distintas duraciones, se los calculó a partir de datos publicados de láminas o intensidades máximas de distintas duraciones y recurrencias.

La división entre tormentas de corta y larga duración ($r_{d_1, 24hs, T}$ para $d_1 \leq 2hs$), se obtienen dos grupos con comportamiento más uniforme, que permiten la generalización de las relaciones. La homogeneidad observada se puede explicar por el hecho que, desde el punto de vista físico, los parámetros de lluvias de corta duración podrían relacionarse solo indirectamente con los de larga duración, ya que obedecen a fenómenos diferentes.

Tabla 4 : Relaciones estimadas para varios países

Región	Autor y año	Índice	$r_{d_1, 24hs}$ para distintas d_1 [minutos]								
			5	10	15	30	60	120	180	360	720
América Central	Hargreaves, 1981*	Máximo				0.50	0.56	0.64	0.69	0.78	0.88
		Mínimo				0.35	0.42	0.51	0.57	0.69	0.83
Argentina	Lucero, 1994*; Medina et al, 1975	Máximo	0.12	0.20	0.28	0.45	0.57	0.78	0.78	0.82	0.97
		Mínimo	0.10		0.23	0.32	0.39	0.52	0.54	0.69	0.83
Argentina (Córdoba)	García et al, 1998	Máximo	0.22	0.33	0.41	0.55	0.65	0.73	0.79	0.87	0.94
		Mínimo	0.11	0.19	0.26	0.41	0.52	0.60	0.67	0.79	0.91
Australia	Pierrehumbert, 1997	Máximo	0.12	0.17	0.22	0.31	0.40	0.48	0.53	0.63	0.78
		Mínimo	0.10	0.15	0.19	0.27	0.35	0.41	0.45	0.56	0.74
Brasil	Bertoni et al, 1993	Máximo	0.14		0.26	0.37	0.45	0.56		0.72	0.85
		Mínimo	0.07		0.19	0.28	0.40	0.53			
India	Kothyari et al, 1992*	Máximo	0.19	0.24	0.27	0.33	0.40	0.49	0.55	0.67	0.82
		Mínimo	0.18	0.23	0.25	0.31	0.39	0.48	0.54	0.66	0.81
Nigeria	Oyebande, 1982*	Máximo					0.74		0.84	0.92	0.95
		Mínimo					0.56		0.71	0.81	0.85
USA	Hershfield, 1961; Chen, 1983*; French, 1983*; Peterson, 1986* Osborn et al, 1988* Bell, 1969; Froehlich, 1995*	Máximo	0.14	0.23	0.44	0.49	0.56	0.63	0.68	0.77	0.88
		Mínimo			0.28	0.38	0.40	0.50	0.56	0.70	0.84
Coeficiente de variación de máximos			0.26	0.26	0.29	0.22	0.22	0.19	0.17	0.13	0.08
Coeficiente de variación de mínimos			0.36	0.21	0.16	0.16	0.17	0.11	0.15	0.12	0.06

Estas afirmaciones se consideran válidas para los vínculos que involucren láminas de persistencia > 10 minutos. En general, las láminas de lluvia de duraciones menores están muy influidas por el método de registro y análisis utilizado en cada puesto en particular.

En cuanto al vínculo entre láminas máximas de igual período de retorno, de 24 horas y 1 día pluviométrico, Hershfield (1961) halló que, para estimar aquella a partir de ésta en USA, se debería usar el factor $R=1,13$. Hargreaves (1988), al evaluar lluvias extremas de África y otras áreas, asumió que ese coeficiente puede ser aplicado en todo el mundo.

Sin embargo, se informan valores menores en Brasil: 1,14 para San Pablo (CETESB, 1979) y 1,10 para Río de Janeiro (Taborga, 1974). En Argentina, Di Benedetto (1992) analizó RT para una serie pluviográfica de 16 años de la estación La Suela (Córdoba) y arribó a valores decrecientes, desde 1,16 para $T = 2$ años, hasta 1 para $T > 10$ años.

El valor medio $R=1,08$ de la región central de Argentina, aunque inferior a los informados en otras áreas, es razonablemente coherente con ellos. La diferencia no puede atribuirse a distintas técnicas de estimación, irrelevante para el resultado, como muestra la Tabla 3.

El dato obtenido amplía el rango estimado en Brasil (1,10 a 1,14) y sugiere que, si fuese admisible adoptar un valor planetario único para regiones sin información, como propone Hargreaves (1988), este podría ser menor que el 1,13 calculado por Hershfield (1961).

En resumen, se considera que cuando, como en este caso, es posible definir un valor regional de R , no tiene sentido apelar a un índice global.

CONVENIENCIA DE COCIENTES ZONALES Y/O REGIONALES

Por último, para precisar la mejor metodología, cabe analizar la posibilidad de emplear promedios regionales (de las 7 estaciones, en este caso), en lugar de los cocientes zonales (del pluviógrafo base de la zona en que se halla el pluviómetro incógnita (Caamaño et al, 1998)) en la hipótesis de que este procedimiento disminuirá el efecto de errores locales.

Puesto que este criterio se puede aplicar o no a R o a los vínculos con láminas de menor duración, existen cuatro estimadores alternativos, según se empleen:

a - $r_{d1,24hs}$ y R zonales.

b - $r_{d1,24hs}$ zonales y R regional.

c - $r_{d1,24hs}$ regionales y R zonales.

d - $r_{d1,24hs}$ y R regionales.

En los puestos zonales base, donde se dispone de registros pluviográficos, la técnica habitual para estimar lluvias máximas de duración ≤ 24 horas es la siguiente:

- Elaboración de las series de lluvias máximas anuales de distintas duraciones.

- Asignación de probabilidades a estos valores (posición de gráfica, según Weibull).

- Ajuste a cada serie de una FDP. En la región de estudio se adoptó como óptima para todas las duraciones la FDP Lognormal (Caamaño et al, 1998).

- Estimación de lluvias máximas de duraciones y períodos de retorno establecidos.

Los valores de lámina de lluvia máxima, estimados de este modo en los 7 puestos, para recurrencias comprendidas entre 2 años $\leq T \leq 100$ años, sirven de referencia para evaluar la conveniencia de aplicación de las distintas técnicas propuestas en la región de estudio.

La Tabla 5 exhibe las diferencias medias y máximas obtenidas al emplear las alternativas a , b , c y d en ese rango, a partir de PG Weibull, en promedio para 2 años $\leq T \leq (N+1)$ años. La hipótesis implícita en esta decisión es que los vínculos $r_{d1,24hs}$ y R no dependen del período de retorno de las láminas, en concordancia con el análisis de sensibilidad previo.

A la luz de esta información es fácil advertir que, cualquiera sea el método, las diferencias medias son proclives decrecer con la persistencia de la lluvia.

Con base en ello, es válido diferenciar tres rangos de duración para simplificar el análisis:

ESTIMACIÓN DE LÁMINAS MÁXIMAS DE LLUVIA A PARTIR DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA DIARIA

Tabla 5: Diferencias porcentuales observadas en la estimación de láminas máximas de distintas duraciones

	Técnica	Duración [minutos]									
		5	10	15	30	60	120	180	360	720	1440
Promedio de valores absolutos en 7 estaciones	a	20%	20%	20%	17%	11%	7%	5%	5%	6%	6%
	b	20%	20%	20%	17%	11%	8%	6%	6%	6%	6%
	c	34%	33%	30%	23%	15%	11%	8%	7%	6%	6%
	d	33%	32%	29%	23%	15%	10%	7%	6%	6%	6%
Máximas por estación	a	43%	50%	46%	30%	24%	20%	15%	13%	8%	10%
	b	47%	54%	50%	33%	22%	17%	13%	11%	11%	12%
	c	79%	86%	62%	38%	35%	27%	22%	16%	10%	10%
	d	71%	78%	55%	38%	32%	25%	20%	14%	10%	12%

- Duraciones breves, $d \leq 0,5$ horas, con diferencias medias de 17% al doble de este valor.

- Duraciones intermedias, $0,5 \text{ horas} < d \leq 2$ horas, con diferencias medias de 7 a 15%.

- Duraciones prolongadas, $2 \text{ horas} < d \leq 24$ horas, rango de 5 a 7%, con una excepción.

Las diferencias máximas exhiben una tendencia similar, aunque no tan nítida (los errores extremos se dan para 10 minutos y 12 horas). Los límites entre intervalos se ubican, con excepciones, en 35% y 20%.

En lo que se refiere a la comparación entre estimadores, el hecho más notorio es la incidencia desfavorable de utilizar medias regionales para las relaciones entre láminas de duraciones inferiores con la de 24 horas. Esto se advierte por el incremento de las diferencias (tanto medias como máximas, salvo en las dos persistencias mayores) que se observa al pasar de las técnicas que emplean cocientes $r_{d1,24hs}$ zonales (*a* y *b*) a los correspondientes regionales (*c* y *d*).

Distinta es la incidencia de la sustitución de cocientes zonales por promedios para vínculos R (24horas/1día). Pasar de la alternativa a a la b no

tiene efecto sensible en las diferencias promedios en el 70% de las duraciones y es muy bajo en los restantes (1%); en tanto, para las máximas hay incrementos en las duraciones de lluvias breves, disminución en las intermedias y ambos casos en las prolongadas.

El paso de *c* a *d*, por su parte, implica ganancia en el 60% y no afecta al resto de los casos para los promedios, a la vez que, para diferencias máximas en una estación, hay una proporción del 70% de mejorías y aumento en sólo una duración, apreciándose, en general, una compensación parcial en los errores causados por el uso de $r_{d1,24hs}$ regionales.

En vista de estos resultados, es perfectamente aceptable el uso de un cociente medio regional R.

Como corolario de esta discusión, es posible recomendar el procedimiento $r_{d1,24hs}$, utilizando $r_{d1,24hs}$ zonales (de una estación pluviográfica) y R regionales (promedio de todas). La Tabla 6 muestra los resultados de la aplicación de ese criterio para cada estación, donde las diferencias medias en valor absoluto producidas son del orden del 6% para duraciones prolongadas, de 8% a 11% y de 20% para breves, mientras que las diferencias máximas correspondientes, en términos generales, duplican esos valores.

Tabla 6: Máximas diferencias porcentuales observadas en la estimación de láminas máximas de distintas duraciones usando técnica b.-

Estación	Duración [minutos]									
	5	10	15	30	60	120	180	360	720	1440
CS	11%	14%	22%	23%	22%	17%	13%	11%	3%	-1%
OC	-7%	-5%	-4%	-8%	6%	-1%	1%	5%	-4%	-5%
LA	-10%	8%	9%	8%	11%	12%	8%	5%	6%	12%
SU	22%	31%	24%	18%	4%	-2%	-4%	-5%	-5%	-6%
MJ	47%	54%	50%	33%	19%	14%	6%	8%	11%	8%
RC	29%	25%	25%	22%	9%	3%	6%	6%	8%	10%
VD	-15%	-4%	4%	4%	3%	5%	3%	2%	5%	-3%
Promedio	20%	20%	20%	17%	11%	8%	6%	6%	6%	6%
Máximo	47%	54%	50%	33%	22%	17%	13%	11%	11%	12%

CONCLUSIONES

Si bien la forma más conveniente para estimar láminas máximas, de distinta duración y período de retorno dado, es un tema discutido en hidrología, los cocientes $r_{d_1,24hs}$ y R entre láminas para esta región muestran poca sensibilidad a esa decisión. Se adoptan para ambos los valores estimados a partir del uso de posiciones de gráfica de Weibull.

El tipo de variación de los cocientes $r_{d_1,24hs}$ con la recurrencia de las láminas depende del modo de estimar el vínculo h - d - T , no de la región de aplicación. Partir de posiciones de gráfica lleva a trazas irregulares. La estructura de las fórmulas empíricas anula en forma automática la fluctuación. Las funciones probabilísticas generan curvas monótonas, decrecientes o crecientes según la duración.

Al usar funciones de densidad de probabilidad (FDP), los resultados para R presentan inconsistencias físicas ya que se dan valores de los cocientes < 1 para $T > 20$ años. Además, empleando la distribución Gumbel, se presentan relaciones crecientes con T en algunos puestos; lo que permite enunciar que la tendencia decreciente, observada con la distribución Lognormal, no se debe a una característica del proceso físico en sí, sino a la forma de representarlo.

Se adoptan como representativos de las relaciones entre láminas máximas de 24 horas y de duraciones menores y entre 24 horas y 1 día pluviométrico, relaciones constantes con el período de retorno, iguales a los valores medios estimados a partir del uso de PG Weibull en el intervalo $2 \text{ años} \leq T \leq (N+1)/2$ años.

Lo observado en la región central de Argentina, y en más de 40 puntos de 10 países de los 5 continentes, indica que los cocientes r_{d_1,d_2} se asemejan mucho entre sí, sobre todo al dividir los eventos en grupos de duración mayor y menor que 2 horas.

En la zona de estudio se observa un comportamiento homogéneo de R . El valor medio $R = 1.08$, calculado para la región central de Argentina, amplía el rango determinado en Brasil (1.10 a 1.14) y sugiere que, cuando sea admisible admitir un valor planetario único para regiones sin información, este podría ser menor que el 1,13 calculado por Hershfield (1961). En los casos en que es posible definir un valor regional de R , no tiene sentido apelar a un índice global.

Con respecto a la aplicación de cocientes regionales únicos, (en vez de los zonales de un pluviógrafo), para la estimación de lluvias máximas de duraciones ≤ 24 horas en emplazamientos pluviométricos, se concluye que no es recomendable para los vínculos $r_{d_1,24hs}$, en los cuales, las características locales son sensiblemente más notorias.

En consecuencia se propone una metodología en particular para la estimación de lluvias máximas para duraciones que van desde una hasta 24 horas, ambas inclusive. Esta consiste en la combinación de valores $r_{d_1,24hs}$ estimados para cada estación y un valor R medio regional. En ambos casos se adoptan cocientes constantes con el período de retorno e iguales a los valores medios estimados a partir del uso de PG Weibull en el intervalo $2 \text{ años} \leq T \leq (N+1)/2$ años. Los errores medios esperados al utilizar esta metodología van del 6 al 11% y los máximos, del 11 a 22%, decayendo en general al aumentar la duración de lluvia.

LISTA DE SÍMBOLOS

- d** Duración de la lluvia máxima anual.
- h** Lámina máxima de lluvia anual
- i** Intensidad máxima de lluvia anual.
- N** Longitud de la serie de lluvias máximas, en años, en cada pluviógrafo.
- T** Período de retorno de la lámina de lluvia máxima.
- $r_{d_1,d_2,T}$** Cociente entre láminas máximas de lluvia, h_1 y h_2 , de duraciones d_1 y d_2 respectivamente, y de igual período de retorno T , para persistencias comprendidas entre 5 minutos y 24 horas.
- RT** Relación entre láminas máximas h_{24hs} y $h_{1día}$, del mismo período de retorno T , para intervalos de 24 horas desplazables (pluviografía) y fijos (pluviometría).
- R** Relación independiente del período de retorno, entre láminas máximas de lluvia h_{24hs} y $h_{1día}$, correspondientes a intervalos de 24 horas desplazable y fijo.
- μ_d** Media de la serie de logaritmos de las láminas máximas de duración d .
- σ_d** Desvío estándar de la serie de logaritmos de las láminas máximas de duración d .
- Φ** Factor de frecuencia normal.

REFERENCIAS

- Bell, F.C., 1969. Generalized Rainfall - duration - frequency Relationships. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 95. N°1. pp. 311-327.
- Bertoni, J.C. y Tucci, C.E.M. 1993. *Precipitação. Capítulo 5 en Hidrología, Ciência e Aplicação*. Edit.: C. Tucci. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- Cañaño Nelli, G. 1995. Regionalización de Precipitaciones Máximas para la Provincia de Córdoba. 3er Informe al CONICOR. CIHRSA. Villa Carlos Paz, Argentina.
- Cañaño Nelli, G. y García, C. 1997. "Estimación de Máximos en Hidrología: Factores de Frecuencia Normal y Lognormal". *Cuadernos del CURIHAM, Año 3. N° 3*. pp 1-17. Rosario, Argentina.
- 1998. "Estimación de la Función i-d-T a Escala Regional mediante el Factor de Frecuencia Normal". II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII Congreso Nacional del Agua, Tomo 2, pp 157-167. Santa Fe, Argentina.
- Cañaño Nelli, G.; García, M.; y C. Dasso. 1998. "Zonalización de Tormentas de Diseño para la Provincia de Córdoba". II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII Congreso Nacional del Agua. Tomo 2, pp 168-178. Santa Fe, Argentina.
- Cetesb, 1979. *Drenagem Urbana: Manual de proyecto*. Sao Pablo, Brasil.
- Chen, C., 1983. Rainfall Intensity - duration - frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 109, N° 12, pp 1603-1620.
- Chow, V.T., 1951. A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis. *Transactions American Geophysical Union*. Vol. 32, N° 2, pp 231 - 237.
- Cunane, C. 1989. *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*. WMO. OHR33. Ginebra, Suiza.
- Di Benedetto, H., 1992. Análisis y elaboración de metodologías para aprovechamiento de la lluvia diaria en la estimación de intensidades. Informe Final Beca Primer Nivel. CONICOR. Córdoba, Argentina.
- França Pires, C.L., 1994. Análise de Freqüência: Revisão Metodológica. *A Água em Revista*. CPRM, Año 2, N° 3, pp 13-22. Belo Horizonte, Brasil.
- Franco, V. y Domínguez Mora, R. 1996. Método para calcular la lluvia media de diseño en una cuenca urbana, usando factores de ajuste por duración, área y período de retorno. XVII Con. Latinoam. Hidráulica, pp 237-247. Guayaquil, Ecuador.
- French, R.H. 1983. Precipitation in Southern Nevada. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. V.109. N°7. pp 1023 - 1036.
- Froehlich, D. C., 1995. Intermediate Duration-rainfall-intensity Equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. Vol.121. N° 10. pp 751 -756.
- García, C. M., 1994. Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la Provincia de Córdoba. Trabajo Final Ing. Civil. Univ. Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- García, C. M., Cañaño Nelli, G.E. y DASSO, C.M. 1998. Relaciones entre Lluvias Máximas de Igual Recurrencia y Distintas Duraciones para la Región Central de Argentina. II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII Congreso Nacional del Agua. Tomo 2, pp 179-188. Santa Fe, Argentina.
- Hargreaves, G.H. 1981. Simplified Method for Rainfall Intensities. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. Vol.107. N° IR3. pp 281 - 289.
- Hargreaves, G.H. 1988. Extreme rainfall for Africa and other developing areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. Vol.114. N° 2. pp 324 - 333.
- Hershfield, D.M., 1961. *Rainfall Frequency Atlas of the U.S. for Duration from 30' to 24h and Return Periods from 1-100 years*. U.S. Weather Bureau. Technical Paper N°40. Washington, USA.
- Kothiyari, U.C. y Garde, R.J. 1992. Rainfall Intensity-duration-frequency Formula for India. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE Vol.118. N°2. pp 323-336.
- Lucero, O. 1994. La Tormenta de Proyecto Estadística para la Ciudad de Buenos Aires. CIHRSA. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas. Córdoba, Argentina.
- Medina, L. y Moyano, M.C. 1975. Estudio piloto de lluvias intensas en la República Argentina. Instituto Nac. de Ciencia y Técnica Hídricas. Buenos Aires, Argentina.
- Osborn, H.B. y Renard, K.G. 1988. Rainfall Intensities for Southeastern Arizona. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. Vol.114. N°1. pp 195 -199.
- Oyebande, L. 1982. Deriving rainfall intensity - duration - frequency relationships and estimates for regions with inadequate data. *Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol.27. N°3. pp. 353 - 367.
- Peterson, M. 1986. Short-Duration Precipitation for Billings, Montana. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol.112. N°11. pp 1089 - 1093.
- Pierrehumbert, C.L. 1977. Rainfall Intensity-frequency-duration Estimation. Capítulo 2 en *Australian rainfall and Runoff*. The Institution of Engineers. Canberra, Australia.
- Pfaffetter, O., 1957. *Chuvas intensas no Brasil*. DNOS. Río de Janeiro, Brasil.
- Reich, B. M. 1963. Short Duration Rainfall Intensity Estimates and Other Design Aids for Regions of Sparse Data. North Holland Publishing Co., Amsterdam. pp. 3-28.
- Sherman, C. W., 1931. Frequency and Intensity of Excessive Rainfalls at Boston, Mass. *Transactions American Society of Civil Engineers*. ASCE. 95. pp. 951 -960.
- Taborga, J.T., 1974. *Praticas Hidrológicas*. Río de Janeiro. Brasil.

