



DOS ERRORES EXTENDIDOS EN LA ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE EVENTOS DE LLUVIA A PARTIR DEL PERÍODO DE RETORNO NOMINAL

JOSÉ PEDRO MONTT M., PEDRO RIVERA I. Y BONIFACIO FERNÁNDEZ L.

Centro de Aguas Urbanas. Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
Pontificia Universidad Católica de Chile.
Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.
Teléfono. 6864227. Fax 6865876. E-mail: jmontt@ing.puc.cl

RESUMEN

Se abordaron analítica y empíricamente dos problemas de cálculo de probabilidades y de frecuencias de eventos de lluvias que son habitualmente mal enfrentados en Chile debido a una mala utilización de las curvas IDF. El primero se refiere a la estimación de la frecuencia de eventos de cierto período de retorno. El segundo error corresponde al cálculo de probabilidades de un evento de cierto período de retorno en que la duración del mismo no está especificada. En ambos casos la frecuencia de ocurrencia, en un año, de una lluvia de período de retorno T dado por las curvas IDF se estima habitualmente como $1/T$, lo cual es una subestimación que puede ser importante en algunos casos. Se utilizó la precipitación de Santiago como caso de estudio.

ABSTRACT

This paper studies analytically and empirically two problems of probability and frequency of precipitations events. These problems are not correctly solved in Chile, due to an incorrect application of IDF relationships. The first one is the frequency estimation of rain events from IDF relationship. The second one is the probability of an event of an unspecified duration. In these two problems, the event frequency is calculated as $1/T$, being T the IDF's return interval. In some cases, this calculation causes an important sub-estimation. Precipitation data from Santiago was used to test the models.



DOS ERRORES EXTENDIDOS EN LA ESTIMACIÓN DE PROBABILIDADES DE EVENTOS DE LLUVIA A PARTIR DEL PERÍODO DE RETORNO NOMINAL

1 Introducción.

Se presentan dos problemas de cálculo de frecuencia de eventos de lluvia que son habitualmente mal enfrentados en Chile, y que conducen a conclusiones erróneas de importancia.

El primero de ellos ocurre en el cálculo de la frecuencia de eventos de lluvia a partir del período de retorno que entregan las curvas IDF. Comúnmente se asume que un evento de lluvia de período de retorno T tiene una frecuencia anual de $1/T$, lo cual es un error. En este trabajo se presenta una modelación analítica del problema, obteniéndose una expresión explícita para la frecuencia real de un evento de período de retorno T . También se aborda el problema empíricamente a partir de datos de precipitación horaria de Santiago obtenidos de un registro de 44 años de precipitación en intervalos de 10 minutos de la Estación Quinta Normal y se contrastan con la formulación analítica.

El segundo error típico es asumir que la probabilidad de ocurrencia anual de un evento de lluvia de período de retorno T de duración no especificada, es $1/T$. También se hace una aproximación analítica al problema. Además a partir de 80 años de registro (1917-1999, excepto 1961-1963) de precipitaciones máximas anuales en Santiago para cada duración, se obtuvo una curva empírica para la probabilidad de ocurrencia anual de un evento de período de retorno T y duración no especificada.

2 Primer error: Estimación de la frecuencia de eventos de lluvia a partir de las curvas IDF.

Tal como se mencionó anteriormente, es común en el ejercicio de la ingeniería nacional suponer que la frecuencia anual de un evento de lluvia de cierta magnitud y duración, es el inverso del período de retorno obtenido de las curvas IDF. Para cada duración de lluvia las curvas IDF entregan la distribución de probabilidades de las precipitaciones máximas anuales. Lo que no es lo mismo que la distribución de probabilidades de todas las lluvias ocurridas. Estas dos probabilidades son similares sólo para eventos de gran período de retorno, como se verá más adelante. Para eventos de gran frecuencia, en cambio, la diferencia es significativa.

Un caso típico donde se introduce este error, es en el diseño de colectores de aguas lluvias. Se diseñan en general para un evento de 2 años de período de retorno. Si la vida útil de la obra es de 50 años, se asume que, como valor esperado, fallará 25 veces. Lo correcto no es que fallará 25 veces, sino que fallará en 25 de los 50 años al menos una vez, ya que el evento máximo anual será mayor al de dos años de período de retorno. Pero en los años que falle puede hacerlo más de una vez. De hecho, en este ejemplo el número esperados de veces de falla es de 35. A continuación se desarrolla esta idea para el problema general.



2.1 Formulación analítica.

Sea x la precipitación en un intervalo de tiempo determinado, por ejemplo precipitación diaria. Considerando todos los días del año, con o sin lluvia, sea $f(x)$ la función densidad de probabilidad de la variable x , y sea $F(x)$ la función de probabilidad acumulada.

$$\begin{aligned}x &\sim f(x) \\ P(x < X) &= F(X)\end{aligned}\tag{1}$$

En que:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(u) du$$

Sea y la máxima precipitación de cierta duración (x) registrada en un intervalo de tiempo mayor.

$$y = \max(x_1, x_2, \dots, x_n)\tag{2}$$

Por ejemplo, y puede ser la máxima precipitación diaria registrada en un año. En este caso $n = 365$. Asumiendo independencia entre las variables x_1, x_2, \dots, x_n , simplificación razonable dado el tamaño de n cuando se trabaja con el máximo anual. Si $G(y)$ es la función de probabilidad acumulada de y , se cumple que:

$$P(y < Y) = G(Y) = F^n(Y)\tag{3}$$

Pero además la función $G(y)$ equivalente a las curvas IDF para una duración determinada. Es decir, es igual a la probabilidad de no ocurrencia en un año de un evento y_T de período de retorno T :

$$P(y < y_T) = G(y_T) = 1 - \frac{1}{T}\tag{4}$$

A partir de las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene la probabilidad (p_T) que la precipitación en cualquier día del año sea mayor que la precipitación correspondiente a un período de retorno T según las curvas IDF:

$$p_T = P(x > y_T) = 1 - F(y_T) = 1 - G^{1/n}(y_T) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{1/n}\tag{5}$$

Sea z_T el número de veces en el año en que $x > y_T$. Esta variable z_T tiene por lo tanto distribución de probabilidades Binomial, con probabilidad de acierto de p_T y número de intentos n :

$$P(z = z_T) = \binom{n}{z_T} p_T^{z_T} (1 - p_T)^{n - z_T}\tag{6}$$

En que $E(z_T) = np_T$ y $V(z_T) = np_T(1 - p_T)$. Por lo tanto el número de veces esperado al año (m_T) en que ocurrirá una precipitación mayor que la precipitación de período de retorno T según las curvas IDF, es:



$$m_T = E(z_T) = n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n} \right] \quad (7)$$

$$s_T^2 = V(z_T) = n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n} \right] \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n}$$

En caso de x_i = precipitación diaria y y = precipitación diaria máxima anual $n = 365$. Pero además para n grande (>35) la variable z_T (número de veces al año en que ocurre una precipitación de período de retorno T de cierta duración) tiene distribución normal con media m_T y varianza s_T^2 , en donde:

$$z_T \sim N(m_T, s_T)$$

$$m_T = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n} \right] = \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \quad (8)$$

$$s_T^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n} \right] \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{1/n} = \ln \left(\frac{T}{T-1} \right)$$

La **Tabla 1** muestra la frecuencia y el período de retorno real de un evento de período de retorno nominal T y duración fija cualquiera.

Tabla 1. Frecuencia y período de retorno reales de eventos de período de retorno nominal T .

Período de retorno evento (como máximo anual) (años)	Frecuencia esperada del evento como máximo anual en 100 años	Frecuencia esperada del evento en 100 años ($100m_T$)	Desviación estándar de la frecuencia del evento en 100 años	Período de retorno real evento (años)
2	50	69,3	8,3	1,44
5	20	22,3	4,7	4,48
10	10	10,5	3,2	9,49
20	5	5,1	2,3	19,5
50	2	2,0	1,4	49,5
100	1	1,0	1,0	99,5

2.2 Frecuencia observada en Santiago de eventos de período de retorno T .

Con el objeto de verificar el análisis teórico expuesto, se utilizó una serie de precipitaciones observadas completas a nivel horario. A partir de ella se calcularon sus propias curvas IDF y luego se verificó la frecuencia con que se superaban los eventos de distintos períodos de retorno para cada duración. La serie utilizada fue el registro de la estación Quinta Normal, en Santiago, que cuenta con un registro completo a intervalos de 10 minutos entre 1917 y 1960.

La

Tabla 2 muestra la frecuencia de un evento de duración D y período de retorno T como máximo anual en los 44 años del registro considerado. Las frecuencias mostradas son por lo tanto las que se deducen directamente de las curvas IDF como es de esperarse. La

Tabla 3 en cambio, muestra la frecuencia de todos los eventos ocurridos, no solamente los máximos anuales. Se observa una gran diferencia entre ambas



frecuencias para eventos de 2 años de período de retorno. Este hecho muestra que en los años en que la lluvia máxima anual fue mayor a 2 años de período de retorno existieron otros eventos menores, pero de todas modos superiores al evento de 2 años. Se aprecia el mismo hecho para las lluvias de 5 años. Para períodos de retorno mayores en cambio, no hay diferencia, como es de esperarse, ya que ambas frecuencias se hacen equivalentes.

Tabla 2. Frecuencia de un evento de duración D y período de retorno T como máximo anual en 44 años de registro.

	Período de retorno nominal T (años)						
	2	5	10	20	30	50	100
Frecuencia Observada en 44 años	22	9	4	2	1	1	0

Tabla 3. Frecuencia de un evento de duración D y período de retorno T como máximo por tormenta en 44 años de registro.

D (hrs)	Período de retorno nominal T (años)						
	2	5	10	20	30	50	100
1	40	9	4	2	1	1	0
2	34	9	4	2	1	1	0
3	33	12	4	2	1	1	0
4	34	11	4	2	1	1	0
5	36	10	4	2	1	1	0
6	35	10	4	2	1	1	0
7	33	10	4	2	1	1	0
8	35	11	4	2	1	1	0
9	32	10	4	2	1	1	0
10	33	10	4	2	1	1	0
11	33	10	4	2	1	1	0
12	34	12	4	2	1	1	0
13	34	12	4	2	1	1	0

D (hrs)	Período de retorno nominal T (años)						
	2	5	10	20	30	50	100
14	34	12	4	2	1	1	0
15	34	12	4	2	1	1	0
16	34	12	4	2	1	1	0
17	35	12	4	2	1	1	0
18	35	12	4	2	1	1	0
19	35	12	4	2	1	1	0
20	35	12	4	2	1	1	0
21	36	12	4	2	1	1	0
22	34	12	4	2	1	1	0
23	34	12	5	2	1	1	0
24	34	12	5	2	1	1	0
36	34	13	4	2	1	1	0
48	34	14	4	2	1	1	0

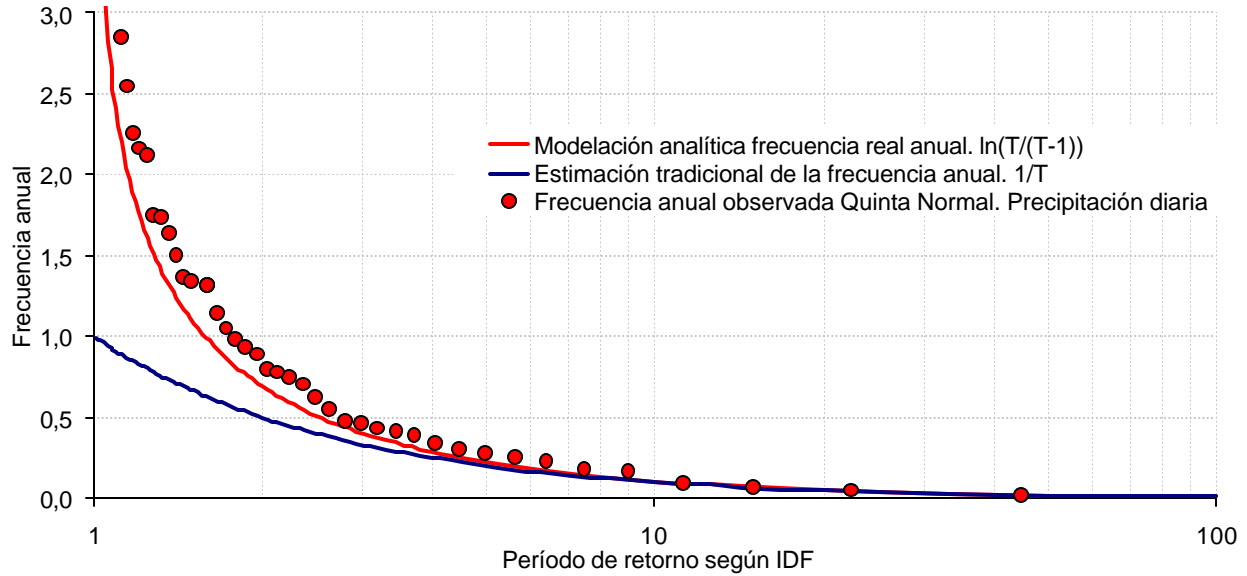


Figura 1. Frecuencia anual de evento de período de retorno T .

3 Segundo error: Cálculo de período de retorno de eventos de duración no determinada.

Existe otro error extendido en el cálculo de las probabilidades de eventos de lluvia. Este es suponer que la probabilidad que ocurra un evento de cualquier duración de período de retorno T , en un año particular, es $1/T$. Un caso típico de este error ocurre en el contrato de seguros para obras que pueden ser dañadas por lluvia durante su construcción. Es común que se asegure una obra para una lluvia de, por ejemplo, 50 años de período de retorno, sin especificar la duración de la lluvia que se está asegurando, asumiendo que si la obra dura todo un invierno la probabilidad que el evento ocurra es $1/50$. Sin embargo, la probabilidad que este evento ocurra en el caso de Santiago es de $1/16$, es decir tres veces más probable tal como se verá más adelante. La diferencia se produce porque la probabilidad que ocurra una lluvia de 50 años de cualquier duración no es lo mismo que la probabilidad que ocurra un evento de 50 años de duración determinada. Esto se debe a que en los años en que precipita mucho en un corto intervalo de tiempo no son necesariamente los mismos años en que precipita mucho en un intervalo de tiempo más largo.

En general la reducción del período de retorno para eventos de duración no especificada dependerá de cuán correlacionadas estén las precipitaciones máximas anuales de corta y de larga duración de cada lugar en particular. A continuación se hace una aproximación teórica al problema.

Sea y_i la precipitación máxima anual de una duración D_i . La probabilidad que la variable y_i sea menor que la precipitación de período de retorno T , $y_{i,T}$, es por lo tanto $1 - 1/T$.

La probabilidad que ocurra al menos un evento (E_T) de cualquier duración de período de retorno T es:

$$P(E_T) = 1 - P(y_1 < y_{1,T}; y_2 < y_{2,T}; \dots; y_k < y_{k,T}) \quad (9)$$

En que k es el número total de distintas duraciones de lluvia consideradas.



Sea r_{ij} el coeficiente de correlación entre las variables y_i e y_j . Si no existe correlación entre las variables y_i , la probabilidad de E_T es:

$$r_{ij} = 0 : \forall i, j \Rightarrow P(E_T) = 1 - (1 - \frac{1}{T})^k \quad (10)$$

En cambio, si la correlación es completa entre las variables, la probabilidad de E_T es:

$$r_{ij} = 1 : \forall i, j \Rightarrow P(E_T) = \frac{1}{T} \quad (11)$$

Para el caso general la expresión es bastante más complicada

$$P(E_T) = 1 - \int_{-\infty}^{y_{1,T}} \int_{-\infty}^{y_{2,T}} \dots \int_{-\infty}^{y_{k,T}} f(y_1, y_2, \dots, y_k) dy_k \dots dy_2 dy_1 \quad (12)$$

En que $f(y_1, y_2, \dots, y_k)$ es la función de densidad de probabilidad conjunta que depende fundamentalmente de la distribuciones de probabilidad marginales de las variables y_i y de las matriz de correlaciones r_{ij} . Sin embargo, $P(E_T)$ depende sólo de la matriz de correlaciones r_{ij} . De todos modos no existe una expresión simple o explícita para $P(E_T)$ para el caso general, por lo que se debe estimar numéricamente u obtener empíricamente para cada lugar en particular.

En el caso de la estación Quinta Normal en Santiago, se cuenta con las precipitaciones máximas anuales entre los años 1917 y 1999, para duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 24 y 48 horas. La **Tabla 4** muestra la media, desviación estándar y la matriz de correlaciones de las precipitaciones máximas anuales para las duraciones mencionadas.

Tabla 4. Media, desviación estándar y correlaciones de las precipitaciones máximas anuales de distintas duraciones.

Precipitación máxima anual y_i .	Duración (horas) D_i .	Media (mm)	Desviación estándar (mm)	Coeficiente de Correlación r_{ij}										
				y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	y_{10}	y_{11}
y1	1	7,9	2,5	1	0,93	0,85	0,77	0,73	0,70	0,68	0,67	0,64	0,63	0,57
y2	2	13,2	4,1	0,93	1	0,94	0,87	0,81	0,78	0,76	0,75	0,71	0,71	0,65
y3	4	21,7	7,6	0,85	0,94	1	0,97	0,93	0,90	0,88	0,87	0,83	0,80	0,74
y4	6	27,8	10,8	0,77	0,87	0,97	1	0,98	0,96	0,94	0,93	0,88	0,85	0,79
y5	8	32,3	13,3	0,73	0,81	0,93	0,98	1	0,99	0,97	0,96	0,91	0,86	0,80
y6	10	35,4	15,1	0,70	0,78	0,90	0,96	0,99	1	0,99	0,98	0,94	0,89	0,83
y7	12	37,8	16,7	0,68	0,76	0,88	0,94	0,97	0,99	1	0,99	0,97	0,92	0,85
y8	14	39,7	18,1	0,67	0,75	0,87	0,93	0,96	0,98	0,99	1	0,98	0,93	0,87
y9	18	43,5	20,9	0,64	0,71	0,83	0,88	0,91	0,94	0,97	0,98	1	0,97	0,91
y10	24	49,1	24,2	0,63	0,71	0,80	0,85	0,86	0,89	0,92	0,93	0,97	1	0,95
y11	48	52,9	26,1	0,57	0,65	0,74	0,79	0,80	0,83	0,85	0,87	0,91	0,95	1

Sea p_T la probabilidad de excedencia de un evento de período de retorno T , es decir, $p_T = 1/T$. La Figura 2 muestra la curva empírica de probabilidad ($1-P(E_T)$) del evento (E_T) que en un año ocurra al menos una lluvia de probabilidad de no excedencia ($1-p_T$) para alguna duración, en el caso de Quinta Normal.

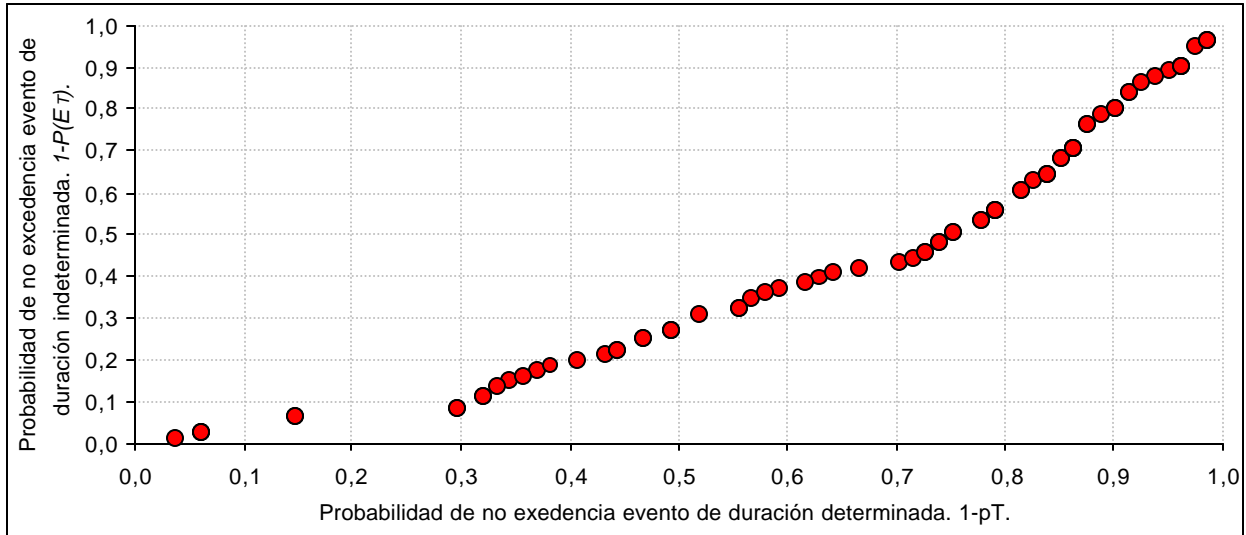


Figura 2. Probabilidad q , de un evento de probabilidad p de duración indeterminada.

La Figura 3 muestra la relación entre el período de retorno T de un evento de duración determinada y el período de retorno T_T del evento E_T .

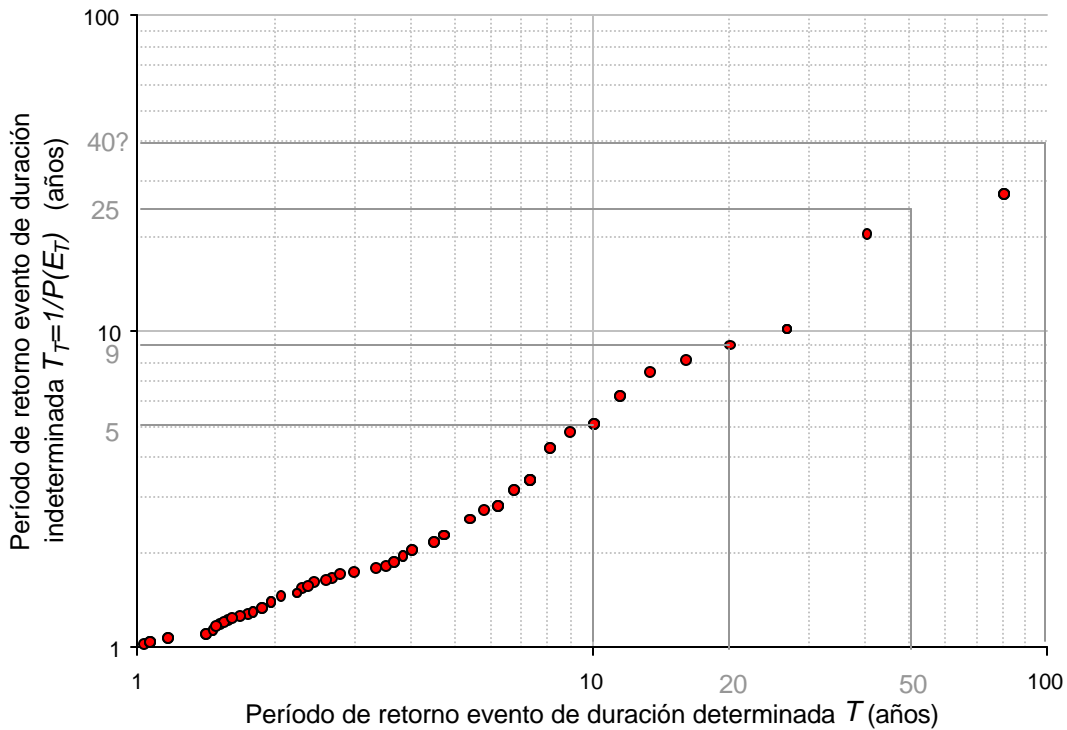


Figura 3. Período de retorno T_T de un evento de duración indeterminada de período de retorno T . Estación Quinta Normal.

La Tabla 5 muestra el período de retorno que fue superado por la precipitación máxima del año para cada una de las duraciones. Los datos de lluvia corresponden a 80 años de registro de la estación Quinta Normal entre los años 1917-1960 y 1964-1999. La curva IDF con que se midió el período de retorno de las precipitaciones corresponde a las curvas de frecuencia empírica derivada a partir de los mismos datos.



Tabla 5. Período de retorno (en años) de las precipitaciones máximas anuales para cada duración en estación Quinta Normal.

n	Año	Duración lluvia (horas)												Máximo período de retorno superado
		1	2	4	6	8	10	12	14	18	24	36	48	
1	1917	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2
2	1918	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1919	2	2	2	2	2	2	5	5	10	10	20	10	20
4	1920	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1921	10	10	20	20	20	20	10	10	20	20	10	5	20
6	1922	20	20	10	10	5	5	5	5	5	10	5	5	20
7	1923	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1924	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1925	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1926	10	5	10	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20
11	1927	5	5	5	5	5	10	10	5	5	5	5	5	10
12	1928	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	1929	1	1	1	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5
14	1930	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	5
15	1931	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2
16	1932	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2
17	1933	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
18	1934	20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	20	50
19	1935	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
20	1936	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
21	1937	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2
22	1938	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
23	1939	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2
24	1940	2	2	5	5	5	5	2	5	2	2	2	2	5
25	1941	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	2	2	5
26	1942	2	2	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	5
27	1943	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1944	5	2	2	5	5	5	2	2	2	2	2	2	5
29	1945	50	20	20	20	20	20	20	20	10	5	5	5	50
30	1946	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1947	2	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5
32	1948	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2
33	1949	2	5	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	5
34	1950	1	2	2	2	2	5	5	2	2	2	2	2	5
35	1951	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	1952	2	2	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5	5
37	1953	10	20	20	20	10	10	10	10	20	20	20	50	50
38	1954	20	10	10	2	2	2	2	2	2	1	1	1	20
39	1955	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1956	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
41	1957	1	1	2	2	2	2	2	2	5	5	5	10	10
42	1958	2	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	5
43	1959	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
44	1960	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
45	1964	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
46	1965	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
47	1966	5	10	5	5	5	2	2	2	2	2	2	1	10
48	1967	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
49	1968	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1969	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
51	1970	10	2	2	2	2	2	2	5	5	10	10	10	10
52	1971	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	1972	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2
54	1973	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
55	1974	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
56	1975	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5
57	1976	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
58	1977	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2
59	1978	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
60	1979	1	2	5	5	10	10	10	10	5	2	2	2	10
61	1980	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
62	1981	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



63	1982	5	10	10	10	10	5	5	5	2	2	10	10	10
64	1983	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	1984	2	2	2	2	5	5	5	10	10	5	5	5	10
66	1985	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
67	1986	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
68	1987	2	2	5	10	10	10	20	20	10	10	10	20	20
69	1988	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	1989	1	1	2	2	2	5	2	5	5	2	2	2	5
71	1990	1	1	1	2	2	5	2	5	2	2	2	2	5
72	1991	2	5	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	5
73	1992	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
74	1993	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
75	1994	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
76	1995	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
77	1996	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	2
78	1997	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5
79	1998	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	1999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
N° de Eventos	T													
	2 años	38	40	39	40	40	40	40	40	40	40	40	40	56
	5 años	14	15	16	16	16	16	13	16	16	15	16	16	32
	10 años	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	16
	20 años	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	9
50 años	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	

En la parte final de la Tabla 5 se resume el número de años en que se produjo eventos de período de retorno T . Se observa por ejemplo, que en 10 de los 80 años se producen precipitaciones mayores a 10 años de período de retorno para todas las duraciones. Lo cual es lógico, dado que así se construyen las curvas IDF. Sin embargo, si se observa la última columna, se aprecia que en 16 de los 80 años se produjeron eventos iguales o mayores a 10 años para alguna duración. Es decir, en promedio cada 5 años se produce un evento de 10 años de período de retorno para alguna duración. Esto equivale a decir, tal como se muestran en la Figura 3, que el período de retorno del evento que se produzca una precipitación de 10 años para alguna duración, es de 5 años. La Tabla 6 muestra la frecuencia con que ocurren eventos de período de retorno T para alguna duración. Para el caso de Santiago cada 27 años se produce un evento de 50 años para alguna duración, cada 9 años se produce un evento de 20 años, cada 5 uno de 10 años y cada 2,5 uno de 5 años. Por lo tanto una regla sencilla es que el período de retorno del evento que se produzca una precipitación de período de retorno T para al menos una duración, es $T/2$.

Tabla 6. Frecuencia eventos de período de retorno T y duración libre. Estación Quinta Normal.

Período de retorno evento de duración fija T	Número de años en que ocurre y_{iT} para alguna duración D_i	Frecuencia (%)	Período de retorno evento de duración libre T_T
2 años	56	70%	1,4
5 años	32	40%	2,5
10 años	16	20%	5
20 años	9	11%	9
50 años	3	3,8%	27

4 Conclusiones.

Se abordaron dos confusiones típicas acerca del uso de las curvas IDF en la estimación de frecuencia de eventos de lluvia.



El primer error ocurre en la estimación de la frecuencia de eventos a partir del su respectivo período de retorno según las curvas IDF. Es común asignar una frecuencia anual de $1/T$ a un evento de período de retorno T , lo cual es cierto sólo para período de retorno grandes y no por ejemplo para $T = 2$ años, en que la frecuencia es bastante mayor a una vez cada dos años. A partir de una modelación analítica del problema se dedujo que la frecuencia de un evento de período de retorno T es $\ln(T/(T-1))$ y no $1/T$. Esta fórmula es general y no depende de la forma de las curvas IDF ni del tipo de funciones de distribución de probabilidades que mejor se ajuste a los datos. A partir de datos de Santiago se obtuvieron también las respectivas frecuencias observadas. Una de las principales aplicaciones de esta fórmula es la mejor estimación de la frecuencia de falla de la red de colectores la que incide directamente en el cálculo del beneficio social producido por el ahorro de daños.

El segundo error típico es suponer que la probabilidad de ocurrencia en un año de un evento de período de retorno T de duración no determinada es $1/T$, lo cual es cierto sólo para eventos de duración fija. Se realizó una aproximación analítica y empírica con datos de Santiago, para el cálculo del problema de probabilidad de estos eventos. A partir de este análisis se concluye que para el caso de Santiago el período de retorno de un evento de lluvia de duración no determinada es un tercio del período de retorno de un evento de lluvia en que se fija la duración de la tormenta. Este hecho tiene una implicancia directa en el contrato de seguros de daños por eventos de lluvia.

5 Referencias.

Chow, Ven Te, Maidment, David R. y Mays Larry W. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá.

Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Manual de Carreteras. 2001.

Korn, Granino A. y Korn, Theresa M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Dover Publications, Inc. New York, 2000. 1130 p.

Urban Drainage and Flood Control District. Urban Storm Drainage, Criteria Manual. 2001, Denver, Colorado.

Weisstein, Eric W. CRC Concise Encyclopedia of Mathematics. CRC Press, 2002. 3252 p.

6 Agradecimientos

Esta investigación fue financiada con aportes del FONDEF de CONICYT, como parte del proyecto FONDEF D00I1011 "Sistemas Estandarizados de Drenaje de Aguas Lluvias en Urbanizaciones y Viviendas".