

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA VALPARAÍSO.
INFLUENCIA DEL TIPO DE SERIE**

ANTONIO ESPINOZA R.¹
JULIEN NICOUD.²
LUDWIG STOWHAS B.³

RESUMEN

Se presenta un exhaustivo análisis a la estadística pluviográfica de 40 años disponible en la estación meteorológica Valparaíso – USM, que permitió procesar información de precipitaciones máximas para 19 duraciones entre 10 minutos y 24 horas, utilizando tres distintas series:

- a) Serie de tormentas máximas anuales en 24 horas
- b) Serie de Valores Extremos Anuales para cada una de las duraciones consideradas.
- c) Serie de Excedencias Anuales para cada una de las duraciones consideradas.

En base a la información anterior se proponen curvas de Intensidad - Duración – Frecuencia y coeficientes de duración y frecuencia para la ciudad de Valparaíso, a partir de la serie de excedencias anuales.

Se analiza la influencia en los resultados de utilizar series de valores extremos anuales en vez de series de excedencias anuales, verificándose que la fórmula correctiva teórica propuesta por Langbein, sobrevalora la corrección necesaria, proponiéndose fórmulas corregidas que ajustan mejor a los datos empíricos disponibles.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

² Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, Francia

³ Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – mail: ludwig.stowhas@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) de las precipitaciones de un cierto lugar, resulta indispensable para la estimación de caudales de diseño en base a métodos basados en relaciones precipitación – escorrentía, particularmente en zonas urbanas. La información básica requerida para ello, comprende registros pluviográficos durante un número representativo de años, a partir de los cuales dichas curvas pueden ser determinadas.

El conglomerado urbano denominado Gran Valparaíso, que abarca las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana, aún cuando corresponde al segundo de mayor tamaño en el país, no cuenta hasta la fecha con curvas IDF, debido principalmente a la inexistencia de estaciones pluviográficas oficiales de la longitud mínima requerida, utilizándose normalmente para la estimación de intensidades de lluvias en distintas duraciones, fórmulas empíricas como la de Grunsky, (Arretz,1943) o coeficientes de duración determinados en lugares distintos, (Espíldora, 1971, MINVU, 1996).

Sin embargo, en la Estación Meteorológica de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicada en el Cerro Placeres de la ciudad de Valparaíso, existen registros pluviográficos desde 1964, constituyendo una base de 40 años de datos que no ha sido utilizada por tratarse de información no incorporada a la base de datos pluviométricos del país. En el presente trabajo se procesa dicha información, proponiéndose curvas IDF para la ciudad, así como los correspondientes coeficientes de duración y de frecuencia. El estudio se basa en las series de excedencias anuales, comparándose los resultados con los que se obtienen a partir de series de valores extremos anuales.

2. INFORMACIÓN Y PROCEDIMIENTO UTILIZADOS

La información disponible en la Estación USM corresponde a registros de un pluviógrafo de sifón FUESS convencional, durante el período 1964 a 1994 y de un pluviógrafo de báscula digital con registros cada diez minutos desde 1995 a 2003.

Para el período con registro gráfico, el análisis exhaustivo de las intensidades de precipitación para todas las duraciones resulta prohibitivo. Sin embargo, dadas las características climáticas de la zona, las tormentas con intensidades importantes de precipitación, difícilmente alcanzan a la decena en años muy lluviosos y no son más de tres o cuatro en años normales, por lo que el procedimiento utilizado para seleccionar la información fue el siguiente: Para cada año se determinó por inspección visual y con la ayuda de una plantilla, las tormentas que registraron la máxima precipitación para duraciones de 1 hora, 12 horas y 24 horas, conformando lo que podría denominarse series de valores extremos anuales para cada una de dichas duraciones, cabiendo mencionar que en numerosos casos las máximas intensidades para distintas duraciones coincidían en una misma tormenta. La serie de valores máximos en 24 horas fue cotejada con la serie de precipitaciones máximas diarias, verificando su consistencia.

Cada uno de los registros de las tormentas seleccionadas fue ampliado de escala, seleccionándose las intensidades medias máximas para duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 minutos,

y 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18 y 24 horas.(Espinoza, 2005). A partir de esta información se confeccionaron, para cada duración, 3 series:

- i) Serie de valores extremos anuales I, (1 dato por año), a partir sólo de la tormenta máxima en 24 horas.
- ii) Serie de valores extremos anuales II, (1 dato por año), el mayor valor de cualquiera de las tres tormentas seleccionadas cada año.
- iii) Pseudo serie de excedencias anuales, los N mayores valores registrados en N años, seleccionados entre todas las tormentas utilizadas.

En el caso de la información digital, período 1995 – 2003, fue posible efectuar el análisis exhaustivo de los datos, confeccionándose las mismas tres series antes indicadas, con la diferencia de que la serie de excedencias anuales es, en este caso, la serie exacta. (Nicoud, 2004).

Las series obtenidas se presentan en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1 Serie de valores extremos anuales en 24 hrs - Intensidades máximas de lluvia (en mm/hr) clasificadas.

n	F = n/(N+1)	T [años]	DURACION CONSIDERADA (min)																		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
1	0,03	40,00	48,38	47,85	47,85	47,85	39,86	34,53	30,73	27,87	25,65	21,45	20,40	16,80	14,81	14,13	12,52	11,12	10,58	9,64	7,62
2	0,05	20,00	47,85	40,91	40,91	38,86	36,59	31,73	28,25	25,65	23,62	21,14	19,03	16,80	13,83	11,69	9,83	8,85	8,13	6,67	6,01
3	0,08	13,33	40,91	40,11	36,74	34,19	28,29	24,40	23,06	22,95	22,73	19,57	17,82	15,35	12,14	10,33	9,43	8,78	7,67	6,66	5,88
4	0,10	10,00	39,64	30,60	30,60	28,16	25,68	24,36	21,55	19,93	19,56	18,55	16,00	14,76	12,07	9,96	8,93	8,29	7,31	5,98	5,17
5	0,13	8,00	37,90	27,67	26,20	25,35	24,84	22,43	20,39	19,46	19,06	17,61	15,59	13,25	10,33	9,61	8,28	7,30	6,70	5,92	4,80
6	0,15	6,67	36,00	26,70	22,76	21,82	21,51	21,01	20,11	19,45	17,73	15,00	13,57	12,71	9,88	9,06	7,71	6,57	6,40	5,70	4,66
7	0,18	5,71	34,80	25,70	21,88	21,14	21,14	20,79	19,99	18,37	17,02	14,71	12,37	11,54	9,80	8,41	6,95	6,43	6,05	5,08	4,60
8	0,20	5,00	33,86	23,20	21,14	21,05	20,95	20,69	19,07	16,75	15,94	14,28	12,22	11,30	9,28	7,26	6,72	5,79	5,68	4,63	3,83
9	0,23	4,44	33,08	23,14	21,05	19,65	18,10	18,10	17,23	16,50	15,79	14,03	11,81	10,10	8,35	7,15	6,27	5,78	5,08	4,13	3,56
10	0,25	4,00	32,59	23,04	19,36	19,32	17,25	15,53	15,09	15,42	14,94	13,40	10,99	9,18	8,10	7,01	6,22	5,50	4,91	4,06	3,40
11	0,28	3,64	31,20	22,42	19,03	18,10	16,69	15,10	14,74	14,64	14,51	12,26	10,63	9,08	7,68	6,97	5,72	5,19	4,87	3,88	3,34
12	0,30	3,33	30,60	22,20	19,00	17,40	16,32	15,06	14,53	14,10	13,73	11,65	9,78	8,38	6,80	6,14	5,66	4,98	4,67	3,86	3,30
13	0,33	3,08	30,60	22,20	17,98	17,04	16,13	14,92	14,23	13,95	12,80	11,60	9,68	8,37	6,52	6,04	5,64	4,78	4,51	3,83	3,26
14	0,35	2,86	27,60	21,15	17,20	16,95	15,79	14,60	13,88	13,05	12,40	11,35	9,03	7,75	6,35	5,79	5,37	4,70	4,47	3,65	3,10
15	0,38	2,67	25,52	21,14	17,13	15,33	15,48	14,44	13,20	12,52	12,07	10,70	8,64	7,53	6,05	5,74	5,20	4,67	4,34	3,61	3,04
16	0,40	2,50	24,60	21,05	17,00	15,00	15,00	14,30	12,26	11,93	11,40	9,35	7,93	7,29	5,94	5,68	5,08	4,58	4,23	3,55	3,00
17	0,43	2,35	24,00	19,84	16,77	14,38	13,32	12,10	11,49	11,56	10,29	9,10	7,87	7,28	5,79	5,20	4,69	4,33	4,06	3,48	2,91
18	0,45	2,22	23,26	19,80	16,60	14,18	13,20	12,00	11,14	10,80	10,05	9,06	7,85	7,14	5,77	5,16	4,52	4,00	3,69	3,46	2,90
19	0,48	2,11	21,14	19,50	16,56	14,10	13,09	11,95	11,06	10,53	9,93	8,95	7,63	7,10	5,73	4,92	4,34	3,93	3,62	3,33	2,86
20	0,50	2,00	21,05	19,20	15,60	13,68	12,40	11,22	10,38	9,75	9,25	8,82	7,53	6,94	5,66	4,83	4,30	3,84	3,41	3,20	2,75
21	0,53	1,90	21,00	18,30	15,60	13,65	11,95	10,80	10,02	9,74	9,23	8,48	7,30	6,84	5,57	4,83	4,28	3,72	3,39	2,94	2,61
22	0,55	1,82	20,87	16,80	14,85	13,35	11,28	10,17	9,71	9,31	9,00	8,38	6,93	6,20	5,54	4,65	4,27	3,64	3,21	2,93	2,47
23	0,58	1,74	18,60	15,90	14,20	13,20	11,28	10,14	9,64	9,31	9,00	8,15	6,77	6,17	5,28	4,58	4,03	3,62	3,17	2,86	2,37
24	0,60	1,67	18,08	15,60	13,28	11,61	10,53	10,10	9,52	9,27	8,88	7,75	6,68	5,89	5,23	4,54	4,00	3,59	3,13	2,73	2,21
25	0,63	1,60	18,00	15,00	12,90	11,04	10,53	9,90	9,42	8,78	8,68	7,57	6,66	5,51	5,05	4,36	3,80	3,45	3,12	2,65	2,08
26	0,65	1,54	17,40	14,85	12,40	10,53	9,77	9,52	9,06	8,63	8,21	7,47	6,51	5,45	4,73	4,36	3,68	3,45	3,05	2,63	2,07
27	0,68	1,48	15,00	14,58	11,34	10,50	9,52	9,31	8,91	8,58	8,10	7,37	6,27	5,43	4,61	4,30	3,68	3,16	3,01	2,61	2,01
28	0,70	1,43	14,85	12,98	10,53	9,73	9,52	9,07	8,90	8,57	7,83	7,18	5,81	5,43	4,41	4,02	3,66	3,11	2,98	2,50	1,99
29	0,73	1,38	14,40	10,53	9,72	9,52	9,09	8,54	8,74	8,18	7,53	7,05	5,73	5,35	4,38	3,94	3,63	3,09	2,86	2,43	1,99
30	0,75	1,33	10,53	9,52	9,52	9,52	8,76	8,11	7,89	7,48	7,44	6,85	5,47	5,06	4,03	3,81	3,51	3,04	2,81	2,28	1,88
31	0,78	1,29	9,52	9,52	9,52	9,09	8,76	8,10	7,50	7,40	7,04	6,25	5,40	4,78	3,89	3,37	3,18	2,99	2,67	2,28	1,82
32	0,80	1,25	9,52	9,09	9,09	8,20	8,17	7,91	7,48	7,38	7,02	6,05	5,22	4,77	3,84	3,29	2,87	2,97	2,66	2,10	1,74
33	0,83	1,21	9,09	9,00	8,24	7,65	7,65	7,61	7,36	6,90	6,56	5,89	5,07	4,68	3,80	3,06	2,79	2,95	2,55	2,08	1,71
34	0,85	1,18	8,40	7,65	7,65	7,50	7,50	7,50	7,33	6,64	6,29	5,85	4,97	4,62	3,79	3,00	2,70	2,31	2,13	1,73	1,62
35	0,88	1,14	7,65	7,50	7,50	7,48	7,05	6,90	6,56	6,41	6,06	5,61	4,95	4,61	3,64	2,96	2,63	2,26	2,08	1,69	1,58
36	0,90	1,11	7,50	7,03	7,03	7,03	7,03	6,76	6,32	6,06	6,00	5,37	4,84	4,07	3,58	2,93	2,62	2,25	1,95	1,61	1,39
37	0,93	1,08	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	5,89	5,56	5,12	4,67	4,06	3,47	2,86	2,55	2,23	1,94	1,51	1,13
38	0,95	1,05	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	4,89	3,97	3,81	3,29	2,83	2,48	2,19	1,93	1,50	1,13
39	0,98	1,03	5,52	5,52	5,52	5,52	5,52	4,91	4,47	4,37	4,37	4,24	3,90	3,38	2,87	2,77	2,29	1,91	1,67	1,32	0,99

Tabla 2 Serie de valores extremos anuales para todas las duraciones - Intensidades máximas de lluvia (en mm/hr) clasificadas.

N	F = n/(N+1)	T [años]	DURACION CONSIDERADA (min)																		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
1	0,03	40,00	50,69	47,85	47,85	47,85	39,86	34,53	30,73	27,87	25,65	21,45	20,40	16,80	14,81	14,13	12,52	11,12	10,58	9,64	7,62
2	0,05	20,00	50,64	40,91	40,91	38,86	36,59	31,73	28,25	25,65	23,62	21,14	19,03	16,80	13,83	11,69	9,83	8,85	8,13	6,67	6,02
3	0,08	13,33	48,38	40,11	36,74	34,19	28,29	26,27	26,44	24,48	22,73	19,57	17,82	15,35	12,14	10,33	9,43	8,78	7,67	6,66	5,88
4	0,10	10,00	47,85	35,59	32,43	30,64	27,23	24,40	23,06	22,95	22,03	18,55	16,00	14,76	12,07	9,96	8,93	8,29	7,31	5,98	5,17
5	0,13	8,00	44,56	35,36	30,60	28,16	25,68	24,36	21,55	19,93	19,56	17,61	15,59	13,25	10,33	9,61	8,28	7,30	6,70	5,92	4,80
6	0,15	6,67	42,00	34,11	30,55	26,25	24,84	22,43	20,39	19,46	19,06	17,12	13,57	12,71	9,88	9,25	7,71	6,57	6,40	5,70	4,66
7	0,18	5,71	40,91	32,94	28,61	25,35	22,26	21,01	20,11	19,45	17,73	15,00	12,37	11,54	9,80	9,06	6,95	6,43	6,05	5,08	4,60
8	0,20	5,00	39,65	31,50	26,73	24,92	21,51	20,79	19,99	18,37	17,02	14,34	12,22	11,30	9,58	8,41	6,72	5,99	5,68	4,63	3,83
9	0,23	4,44	39,64	30,60	26,56	24,17	21,45	20,69	19,07	16,75	15,79	14,28	11,81	10,10	9,28	7,26	6,27	5,79	5,33	4,31	3,56
10	0,25	4,00	39,15	29,55	26,20	22,82	21,35	19,24	17,52	16,00	15,31	14,03	11,28	9,79	8,72	7,15	6,22	5,78	5,08	4,24	3,40
11	0,28	3,64	37,90	29,10	25,98	22,20	21,14	19,10	17,27	15,66	14,94	13,40	10,99	9,75	8,35	7,04	6,19	5,53	4,91	4,13	3,34
12	0,30	3,33	36,92	28,73	25,60	21,82	20,95	18,97	17,08	15,42	14,66	13,22	10,63	9,43	8,10	7,01	5,94	5,50	4,87	4,06	3,30
13	0,33	3,08	36,30	27,67	23,20	21,27	20,28	18,20	15,94	15,34	14,51	12,31	10,37	9,18	7,68	6,97	5,84	5,22	4,74	3,88	3,26
14	0,35	2,86	36,00	26,70	22,81	21,14	19,97	17,80	15,88	14,64	14,37	12,26	10,06	9,02	7,53	6,66	5,72	5,19	4,67	3,86	3,10
15	0,38	2,67	35,25	26,40	22,76	21,05	18,64	15,90	15,09	14,14	13,73	11,65	9,78	8,38	7,23	6,14	5,66	4,98	4,51	3,83	3,04
16	0,40	2,50	34,80	25,50	21,21	19,95	18,24	15,75	14,74	14,10	13,00	11,60	9,68	8,37	6,57	5,79	5,64	4,78	4,47	3,61	3,00
17	0,43	2,35	33,25	24,84	21,14	19,32	17,25	15,53	14,53	14,10	12,80	11,35	9,39	7,75	6,52	5,76	5,37	4,70	4,47	3,55	2,91
18	0,45	2,22	33,06	24,19	21,05	17,40	16,69	15,10	14,23	13,95	12,78	10,70	9,03	7,68	6,35	5,74	5,08	4,58	4,34	3,48	2,90
19	0,48	2,11	32,59	23,20	19,03	17,04	16,13	15,06	13,88	13,80	12,53	10,68	8,64	7,53	6,05	5,68	4,70	4,33	4,06	3,33	2,86
20	0,50	2,00	31,80	22,42	19,00	16,95	15,79	14,92	13,88	13,05	12,07	9,90	7,93	7,29	5,79	5,20	4,69	4,00	3,69	3,20	2,75
21	0,53	1,90	31,20	22,20	17,98	15,92	15,48	14,60	13,77	12,28	11,07	9,35	7,87	7,28	5,77	5,16	4,34	3,93	3,45	2,94	2,61
22	0,55	1,82	30,60	21,98	17,57	15,33	15,00	14,44	13,20	11,56	11,00	9,10	7,85	7,14	5,75	4,83	4,30	3,93	3,39	2,93	2,47
23	0,58	1,74	30,60	21,15	17,20	15,00	13,32	12,00	11,29	11,13	10,29	8,95	7,63	7,10	5,68	4,83	4,28	3,64	3,21	2,86	2,37
24	0,60	1,67	27,60	21,14	17,00	14,38	13,09	11,95	11,14	10,80	10,05	8,61	7,30	6,84	5,66	4,65	4,27	3,59	3,17	2,78	2,21
25	0,63	1,60	26,90	21,05	16,77	14,10	12,75	11,50	11,06	10,53	9,93	8,48	7,21	6,20	5,54	4,63	3,80	3,45	3,12	2,65	2,08
26	0,65	1,54	25,52	19,80	16,76	13,94	12,20	10,63	10,02	9,75	9,76	8,41	6,93	6,17	5,42	4,58	3,80	3,45	3,05	2,63	2,07
27	0,68	1,48	24,60	19,50	16,56	13,68	11,95	10,37	9,64	9,34	9,00	8,20	6,77	5,89	5,23	4,54	3,68	3,17	3,01	2,61	2,01
28	0,70	1,43	21,79	19,20	15,60	13,58	11,75	10,30	9,26	9,27	8,88	8,15	6,51	5,83	5,05	4,36	3,68	3,16	2,98	2,50	1,99
29	0,73	1,38	21,05	18,30	14,85	13,35	11,28	10,10	9,12	8,90	8,80	7,75	6,27	5,51	4,73	4,12	3,66	3,11	2,86	2,43	1,99
30	0,75	1,33	21,00	16,89	14,20	13,20	11,28	9,90	8,99	8,78	8,68	7,57	5,84	5,43	4,68	4,02	3,63	3,09	2,81	2,28	1,88
31	0,78	1,29	20,87	15,90	13,49	12,19	10,43	9,32	8,93	8,63	8,10	7,05	5,81	5,35	4,44	3,94	3,51	3,04	2,71	2,28	1,82
32	0,80	1,25	20,40	15,60	13,17	11,61	9,77	9,29	8,91	8,18	7,66	6,85	5,56	5,07	4,41	3,81	3,49	3,00	2,70	2,27	1,74
33	0,83	1,21	18,60	15,00	12,90	11,42	9,75	8,72	8,84	8,18	7,53	6,66	5,48	5,06	4,38	3,80	3,46	2,99	2,67	2,10	1,71
34	0,85	1,18	18,08	14,58	12,40	10,50	9,54	8,54	8,74	7,99	7,27	6,62	5,40	4,78	4,03	3,37	2,87	2,97	2,66	2,08	1,62
35	0,88	1,14	17,97	13,17	11,34	9,94	8,76	8,11	7,89	7,46	7,11	6,42	5,07	4,69	3,89	3,06	2,70	2,31	2,13	1,73	1,58
36	0,90	1,11	14,40	12,98	11,06	9,73	8,76	8,10	7,48	7,38	7,04	6,05	4,95	4,68	3,80	2,93	2,62	2,26	2,08	1,69	1,39
37	0,93	1,08	12,44	12,44	9,72	7,65	7,65	7,61	7,36	7,28	6,90	5,89	4,92	4,07	3,64	2,86	2,55	2,25	1,94	1,51	1,13
38	0,95	1,05	9,53	8,29	7,84	7,61	7,48	7,39	7,32	6,64	6,29	5,85	4,67	4,07	3,47	2,83	2,48	2,23	1,93	1,50	1,13
39	0,98	1,03	7,65	7,65	7,65	7,48	7,05	6,76	6,56	6,41	6,00	5,12	4,50	3,81	2,87	2,77	2,29	1,91	1,67	1,32	0,99

3. RESULTADOS OBTENIDOS

La información recopilada se sometió a análisis de frecuencia gráfico, utilizando la posición de ploteo de Weibull y a análisis de frecuencia analítico utilizando las distribuciones de frecuencia normal, log-normal, Gumbel, Pearson III y log-Pearson III. La Tabla 4 y Figura 1, muestran los resultados obtenidos para la serie de excedencias anuales, que es la que corresponde usar para expresar las probabilidades de excedencia en términos de períodos de retorno expresados en años.

Tabla 3 Serie de excedencias anuales - Intensidades máximas de lluvia (en mm) clasificadas.

N	F = n/(N+1)	T [años]	DURACION CONSIDERADA (min)																		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
1	0,03	40,00	50,69	47,85	47,85	47,85	39,86	34,53	30,73	27,87	25,65	21,45	20,40	16,80	14,81	14,13	12,52	11,12	10,58	9,64	7,62
2	0,05	20,00	50,64	40,91	40,91	38,86	36,59	31,73	28,25	25,65	23,62	21,14	19,03	16,80	13,83	11,69	9,83	8,85	8,13	6,67	6,02
3	0,08	13,33	48,38	40,11	36,74	34,19	28,29	26,27	26,44	24,48	22,73	19,57	17,82	15,35	12,14	10,33	9,43	8,78	7,67	6,66	5,88
4	0,10	10,00	47,85	35,59	32,43	30,64	27,23	24,40	23,06	22,95	22,03	18,55	16,00	14,76	12,07	9,96	8,93	8,29	7,31	5,98	5,17
5	0,13	8,00	44,56	35,36	30,60	28,16	25,68	24,36	21,55	19,93	19,56	17,61	15,59	13,25	10,33	9,61	8,28	7,30	6,70	5,92	4,80
6	0,15	6,67	42,00	34,11	30,55	26,25	24,84	22,43	20,39	19,46	19,06	17,12	13,57	12,71	9,88	9,25	7,71	6,57	6,40	5,70	4,66
7	0,18	5,71	40,91	32,94	28,61	25,35	22,26	21,01	20,11	19,45	17,73	15,00	12,37	11,54	9,80	9,06	6,95	6,43	6,05	5,08	4,60
8	0,20	5,00	39,65	31,50	26,73	24,92	21,51	20,79	19,99	18,37	17,02	14,71	12,22	11,30	9,58	8,41	6,72	5,99	5,68	4,63	3,83
9	0,23	4,44	39,64	30,60	26,56	24,17	21,45	20,69	19,07	16,75	15,94	14,34	12,20	10,10	9,28	7,26	6,27	5,79	5,33	4,31	3,56
10	0,25	4,00	39,15	29,55	26,20	22,82	21,35	19,24	17,52	16,50	15,79	14,28	11,81	10,00	8,72	7,15	6,22	5,78	5,08	4,24	3,40
11	0,28	3,64	37,90	29,10	25,98	22,20	21,14	19,10	17,27	16,00	15,31	14,03	11,28	9,79	8,35	7,04	6,19	5,53	4,91	4,13	3,38
12	0,30	3,33	36,92	28,73	25,60	21,82	20,95	18,97	17,23	15,66	14,94	13,40	10,99	9,75	8,10	7,01	5,94	5,50	4,87	4,06	3,34
13	0,33	3,08	36,30	27,67	23,20	21,27	20,28	18,20	17,08	15,42	14,66	13,22	10,63	9,43	7,68	6,97	5,84	5,26	4,87	3,88	3,30
14	0,35	2,86	36,00	26,70	22,81	21,14	19,97	18,10	15,94	15,34	14,51	12,31	10,37	9,18	7,53	6,66	5,72	5,22	4,74	3,86	3,26
15	0,38	2,67	35,25	26,40	22,76	21,05	18,64	17,80	15,88	14,64	14,37	12,26	10,06	9,08	7,23	6,40	5,66	5,19	4,67	3,83	3,23
16	0,40	2,50	34,80	25,70	21,88	19,95	18,24	15,90	15,09	14,14	13,73	11,65	9,78	9,02	7,02	6,14	5,64	4,98	4,51	3,81	3,20
17	0,43	2,35	33,86	25,50	21,21	19,65	18,10	15,75	14,74	14,10	13,00	11,60	9,68	8,53	7,01	6,04	5,57	4,78	4,47	3,65	3,10
18	0,45	2,22	33,25	24,84	21,14	19,44	17,25	15,53	14,53	14,10	12,80	11,35	9,39	8,38	6,80	5,79	5,37	4,70	4,47	3,61	3,04
19	0,48	2,11	33,08	24,19	21,05	19,32	16,69	15,10	14,23	13,95	12,78	10,70	9,37	8,37	6,70	5,76	5,20	4,67	4,34	3,55	3,00
20	0,50	2,00	33,06	23,20	19,36	18,10	16,40	15,06	13,88	13,80	12,53	10,68	9,03	7,75	6,57	5,74	5,08	4,58	4,23	3,52	2,98
21	0,53	1,90	32,59	23,14	19,03	17,40	16,32	14,92	13,88	13,05	12,07	10,35	8,77	7,68	6,52	5,68	4,85	4,33	4,06	3,49	2,91
22	0,55	1,82	31,80	23,04	19,00	17,04	16,13	14,60	13,77	12,52	11,40	9,90	8,64	7,62	6,35	5,67	4,70	4,04	3,81	3,48	2,90
23	0,58	1,74	31,20	22,42	17,98	16,95	15,79	14,40	13,20	12,28	11,07	9,35	8,14	7,53	6,05	5,46	4,69	4,04	3,71	3,46	2,86
24	0,60	1,67	30,60	22,20	17,57	15,92	15,48	14,30	12,84	11,56	11,00	9,16	7,93	7,47	5,94	5,20	4,52	4,00	3,69	3,40	2,75
25	0,63	1,60	30,60	22,20	17,20	15,33	15,00	14,28	12,26	11,34	10,29	9,10	7,87	7,29	5,79	5,16	4,39	3,98	3,63	3,33	2,70
26	0,65	1,54	27,60	21,98	17,20	15,00	13,32	12,00	11,32	11,13	10,17	9,06	7,85	7,28	5,77	5,11	4,34	3,93	3,62	3,20	2,64
27	0,68	1,48	27,00	21,15	17,13	14,38	13,09	11,95	11,29	11,03	10,05	8,95	7,63	7,14	5,75	4,92	4,31	3,93	3,46	3,13	2,61
28	0,70	1,43	27,00	21,14	17,00	14,18	12,75	11,71	11,14	10,80	10,02	8,82	7,53	7,10	5,73	4,83	4,30	3,93	3,45	2,94	2,47
29	0,73	1,38	26,90	21,05	16,77	14,10	12,40	11,50	11,06	10,53	9,93	8,82	7,50	6,94	5,68	4,83	4,28	3,89	3,45	2,86	2,35
30	0,75	1,33	25,55	21,01	16,76	13,94	12,25	11,27	10,72	10,28	9,76	8,61	7,30	6,84	5,66	4,65	4,27	3,84	3,41	2,82	2,27
31	0,78	1,29	25,52	20,10	16,60	13,68	12,20	11,22	10,38	9,75	9,68	8,48	7,21	6,46	5,57	4,63	4,11	3,72	3,39	2,80	2,24
32	0,80	1,25	24,60	19,84	16,56	13,58	12,05	10,80	10,02	9,74	9,25	8,48	7,03	6,20	5,54	4,62	4,03	3,64	3,17	2,78	2,21
33	0,83	1,21	24,08	19,80	15,79	13,35	11,95	10,63	9,71	9,34	9,23	8,41	6,93	6,17	5,44	4,58	4,00	3,62	3,13	2,73	2,08
34	0,85	1,18	24,00	19,71	15,14	13,21	11,80	10,37	9,64	9,31	9,16	8,38	6,77	6,17	5,42	4,54	3,80	3,45	3,12	2,65	2,08
35	0,88	1,14	23,26	19,50	14,99	13,20	11,75	10,30	9,52	9,31	9,00	8,20	6,68	6,13	5,23	4,36	3,80	3,45	3,05	2,63	2,07
36	0,90	1,11	21,79	19,20	14,85	13,06	11,37	10,26	9,47	9,27	9,00	8,15	6,66	5,83	5,05	4,36	3,68	3,17	3,01	2,61	2,01
37	0,93	1,08	21,39	19,01	14,76	13,03	11,28	10,17	9,42	9,16	8,88	7,78	6,65	5,82	4,73	4,30	3,68	3,16	2,98	2,50	1,99
38	0,95	1,05	21,14	18,30	14,54	12,19	11,28	10,14	9,41	8,90	8,87	7,75	6,51	5,59	4,71	4,12	3,66	3,11	2,86	2,43	1,99
39	0,98	1,03	21,05	16,89	14,20	12,00	10,53	10,10	9,26	8,89	8,80	7,71	6,27	5,57	4,68	4,02	3,63	3,09	2,81	2,28	1,98

*: valores no retenidos para suavizar las curvas

Tabla 4 Distribuciones teóricas seleccionadas para cada duración e Intensidades (en mm/hr) correspondientes a 6 periodos de retorno.

		Duración [Min]																		
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
Periodo de retorno [Años]	Distribución seleccionada	Log-Pearson III			Pearson III				Log-Pearson III											
	100	58,04	50,80*	51,28	46,69	40,24	35,27	34,92	32,02	30,21	26,17	23,81	20,35	16,95	15,27	13,20	11,86	11,03	9,59	8,08
	50	54,12	45,75*	44,77	41,72	36,32	32,09	30,82	28,36	26,69	23,15	20,71	17,87	14,82	13,25	11,44	10,30	9,55	8,23	6,96
	20	48,74	39,48*	37,05	35,15	31,05	27,78	25,77	23,86	22,38	19,46	17,03	14,88	12,29	10,87	9,38	8,46	7,81	6,67	5,65
	10	44,41	34,98	31,75	30,14	26,97	24,38	22,18	20,63	19,34	16,84	14,51	12,80	10,55	9,26	7,98	7,20	6,62	5,63	4,77
	5	39,70	30,56	26,77	25,05	22,72	20,76	18,69	17,49	16,40	14,32	12,16	10,82	8,91	7,76	6,70	6,03	5,53	4,68	3,94
2	32,04	24,40	20,25	17,93	16,49	15,24	13,90	13,15	12,39	10,88	9,09	8,17	6,75	5,82	5,04	4,51	4,12	3,48	2,88	

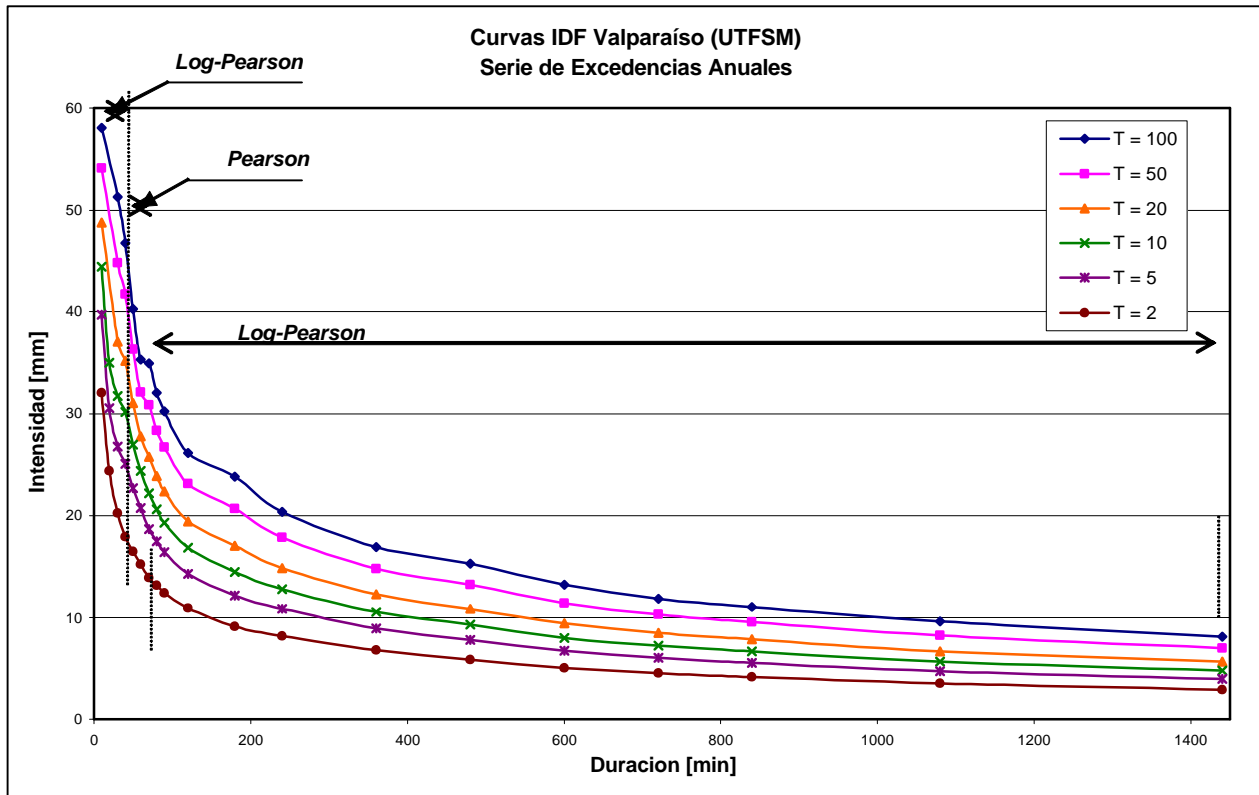


Figura 1: Curvas IDF para la serie de excedencias anuales.

3.1 Coeficientes de duración y frecuencia.

A partir de las curvas IDF determinadas, fue posible calcular los coeficientes de frecuencia con base 10 años y los coeficientes de duración con base 24 hrs. para cada una de las series estudiadas. Las Tablas 5 y 6 y las Figuras 2 y 3 muestran los coeficientes de frecuencia y duración obtenidos para distintas duraciones, para la serie de excedencias anuales.

Tabla 5 Coeficientes de Frecuencia Serie de Excedencias Anuales

	10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
200	1,40	1,61	1,85	1,72	1,64	1,58	1,78	1,75	1,77	1,76	1,89	1,81	1,84	1,90	1,91	1,90	1,92	1,99	1,98
100	1,31	1,45	1,62	1,55	1,49	1,45	1,57	1,55	1,56	1,55	1,64	1,59	1,61	1,65	1,65	1,65	1,67	1,70	1,69
50	1,22	1,31	1,41	1,38	1,35	1,32	1,39	1,37	1,38	1,37	1,43	1,40	1,40	1,43	1,43	1,43	1,44	1,46	1,46
20	1,10	1,13	1,17	1,17	1,15	1,14	1,16	1,16	1,16	1,16	1,17	1,16	1,16	1,17	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	0,89	0,87	0,84	0,83	0,84	0,85	0,84	0,85	0,85	0,85	0,84	0,85	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83
2	0,72	0,70	0,64	0,59	0,61	0,63	0,63	0,64	0,64	0,65	0,63	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,60

Tabla 6 Coeficientes de Duración Serie de Excedencias Anuales

T años	10	20	30	40	50	60	90	120	180	240	360	480	720	840	1080	1440
100	0,050	0,087	0,132	0,161	0,173	0,182	0,234	0,270	0,368	0,420	0,524	0,630	0,734	0,796	0,890	1,000
50	0,054	0,091	0,134	0,167	0,181	0,192	0,240	0,277	0,372	0,428	0,532	0,635	0,740	0,800	0,887	1,000
20	0,060	0,097	0,137	0,173	0,191	0,205	0,248	0,287	0,377	0,439	0,544	0,641	0,749	0,806	0,885	1,000
10	0,065	0,102	0,139	0,176	0,196	0,213	0,253	0,294	0,380	0,447	0,553	0,647	0,755	0,810	0,885	1,000
5	0,070	0,108	0,142	0,177	0,200	0,220	0,260	0,303	0,386	0,458	0,565	0,657	0,765	0,819	0,891	1,000
2	0,077	0,118	0,146	0,173	0,199	0,220	0,269	0,315	0,395	0,473	0,586	0,674	0,783	0,834	0,906	1,000
Promedio	0,063	0,100	0,138	0,171	0,190	0,205	0,251	0,291	0,380	0,444	0,551	0,647	0,754	0,811	0,891	1,000

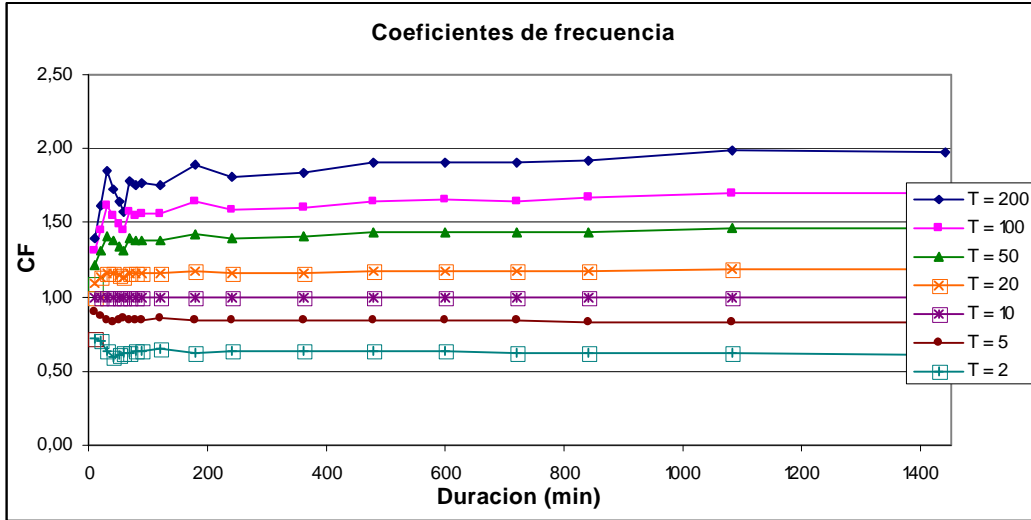


Figura 2. Coeficientes de Frecuencia Serie de Excedencias Anuales

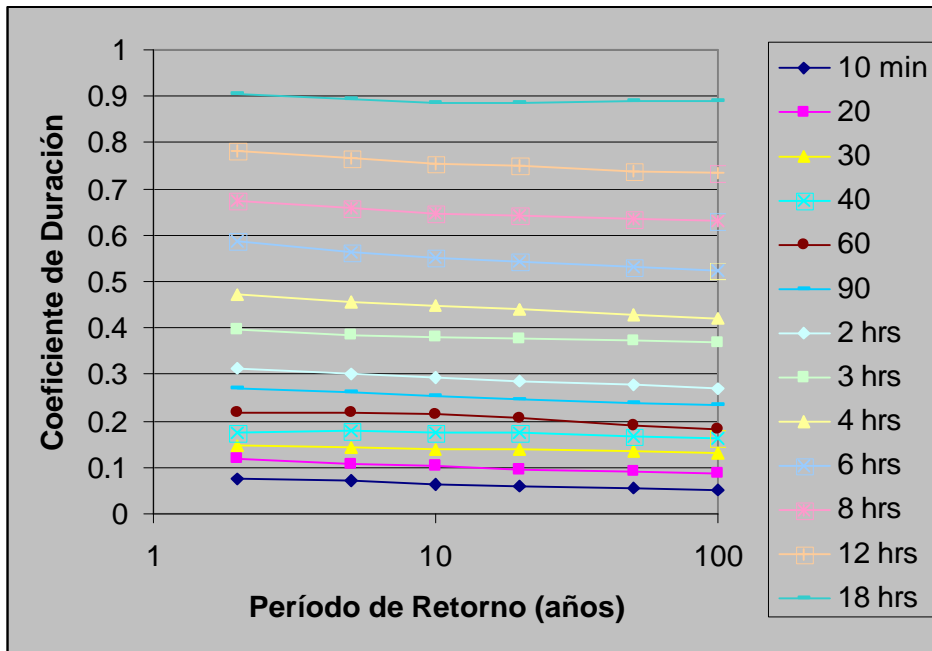


Figura 3 Coeficientes de Duración Serie de Excedencias Anuales

Se observa que los coeficientes de frecuencia, salvo para duraciones muy pequeñas, donde se producen oscilaciones atribuibles a errores de ajustes de distribución o de lectura de datos, resultan sensiblemente independientes de la duración de la lluvia. Los coeficientes de duración, sin embargo, muestran una disminución ligera pero sistemática con el incremento del período de retorno, lo que dificulta el establecimiento de coeficientes únicos de duración independientes de su frecuencia.

Dada la conveniencia, sin embargo, de disponer de estos coeficientes únicos, bajo la hipótesis de independencia entre duración y frecuencia, se analizaron diferentes criterios para su determinación, teniendo como propósito lograr estimaciones con el menor error posible respecto a las verdaderas magnitudes de intensidad para las diferentes duraciones y períodos de retorno. Los mejores resultados se obtuvieron con los siguientes criterios:

- a) Definir el coeficiente de frecuencia como el promedio obtenido para todas las duraciones.
- b) Utilizar el coeficiente de duración correspondiente al período de retorno de 10 años.

Con estos criterios, los coeficientes de duración y frecuencia propuestos para la ciudad de Valparaíso, son los que se indican en las Tablas 7 y 8. El error absoluto promedio de estimación resulta de 2.8% y los errores máximos sólo superan un 10% para períodos de retorno sobre 100 años o duraciones menores o iguales a 10 minutos, es decir, situaciones de poco interés práctico para el uso de curvas IDF.

Tabla 7 Coeficientes de Duración para Valparaíso con respecto a D = 24 hrs

Duración (min)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	120	180	240	360	480	600	720	840	1080	1440
CD	0,065	0,102	0,139	0,176	0,196	0,213	0,226	0,240	0,253	0,294	0,380	0,447	0,553	0,647	0,697	0,755	0,810	0,885	1,000

Tabla 8 Coeficientes de Frecuencia para Valparaíso con respecto a T = 10 años

Periodo de retorno (Años)	200	100	50	20	10	5	2
CF	1,789	1,577	1,389	1,161	1,000	0,845	0,635
Valor DGA,	1.73	1.56	1.39	1.17	1.0	0.83	0.58

El valor base para el uso de estos coeficientes, corresponde al valor $P_{24}^{10} = 114,48$ mm, precipitación máxima en 24 horas para T = 10 años en Valparaíso-USM, obtenido con la serie de excedencias anuales.

La Tabla 8 incluye los valores de coeficientes de frecuencia propuestos por DGA (1991) para la zona, observándose que salvo para un período de retorno de 2 años, los coeficientes de frecuencia logrados son sensiblemente similares.

Los coeficientes de duración se comparan en la Figura 4 con los valores que estima la fórmula de Grunsky y con los valores propuestos por MINVU (1996), para la ciudad de Valparaíso. Para duraciones menores de 18 hrs, los valores obtenidos son significativamente mayores a los propuestos por MINVU. La fórmula de Grunsky, para duraciones entre 3 y 18 hrs también subestima los coeficientes obtenidos en aproximadamente un 10%, aún cuando para duraciones menores a media hora los sobreestima.

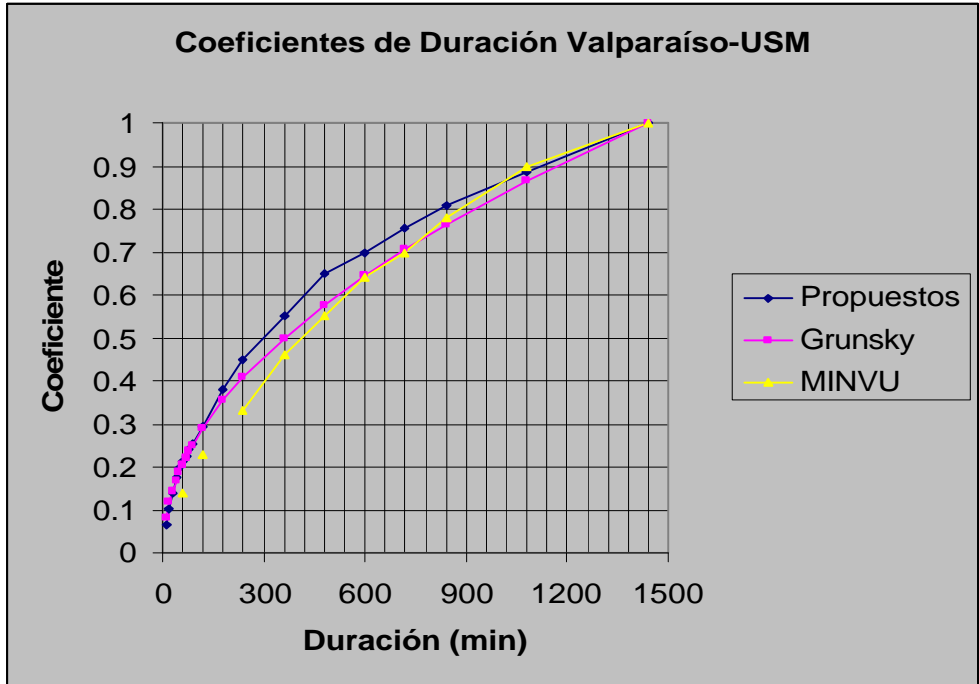


Figura 4

3.2 Influencia del tipo de serie en los resultados.

3.2.1 Análisis de frecuencia gráfico.

En estricto rigor, y especialmente para períodos de retorno bajos, las series a utilizar para que el período de retorno tenga realmente la dimensión años que se le atribuye, corresponde a la serie de excedencias anuales. En la práctica rutinaria, sin embargo, es mucho más frecuente el uso de series de valores extremos anuales, por la muchísima menor dificultad que significa su obtención.

Según el criterio de Langbein, (Espíldora, 1975), suponiendo que los eventos pluviométricos son eventos aleatorios con distribución Poisson, se demuestra que la relación entre las probabilidades o períodos de retorno calculados a partir de series de valores extremos anuales respecto a series de excedencias anuales, viene dada por las expresiones:

$$p_{ex}(VE) = 1 - e^{-p(EA)} \quad \text{o} \quad T_{VE} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{T_{EA}}}} \quad (1)$$

Las relaciones inversas resultan:

$$p_{EA} = \ln\left(\frac{1}{1 - p_{VE}}\right) \quad \text{o} \quad T_{EA} = \frac{1}{\ln\left(\frac{T_{VE}}{T_{VE} - 1}\right)} \quad (2)$$

La Figura 5 muestra las curvas de frecuencia acumulada de las intensidades medias máximas en 24 horas, utilizando la posición de ploteo de Weibull, para las series de valores extremos anuales y de excedencias anuales del pluviógrafo Valparaíso-USM. Se observa la coincidencia de ambas series para períodos de retorno mayores a aproximadamente 2.5 años y de acuerdo a la teoría, cómo la serie de valores extremos sobrevalora los períodos de retorno, especialmente para valores muy bajos, respecto a la serie de excedencias anuales.

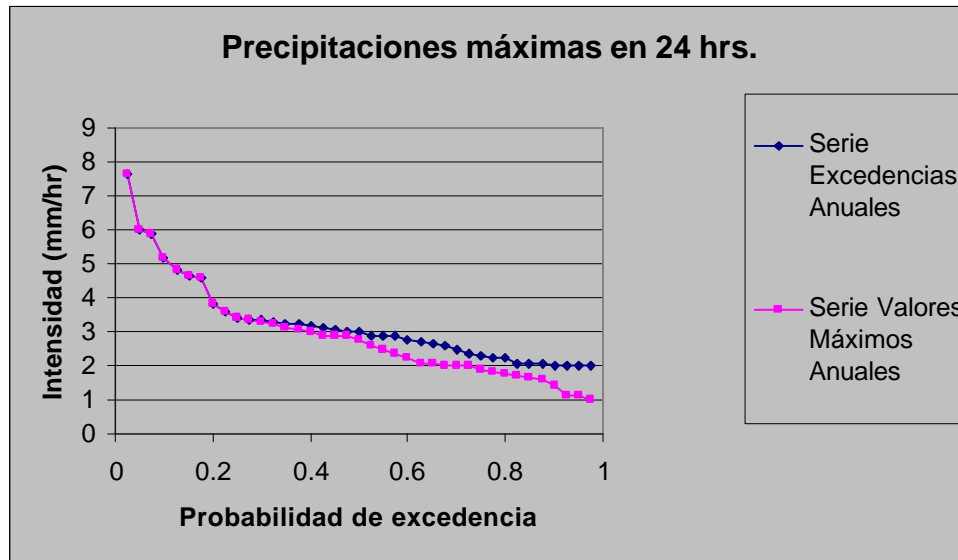


Figura 5 Curvas de Frecuencia Acumulada

La Figura 6 muestra las mismas variables en términos de los períodos de retorno, incluyendo los períodos de retorno corregidos para la serie de valores extremos anuales, de acuerdo al criterio de Langbein.

Se observa, al menos en este caso, que el criterio de Langbein sobreestima la corrección necesaria a los períodos de retorno estimados.

Se proponen las siguientes fórmulas modificadas, que permite un mejor ajuste a la corrección necesaria a los períodos de retorno estimados mediante la serie de valores extremos anuales, que como muestra la figura, dan un ajuste muy bueno.

$$T_{VE} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{T_{EA} + 0.22}}} \quad (3) \quad \text{o} \quad T_{EA} = \frac{1}{\ln\left(\frac{T_{VE} + 0.22}{T_{VE} - 0.78}\right)} \quad (4)$$

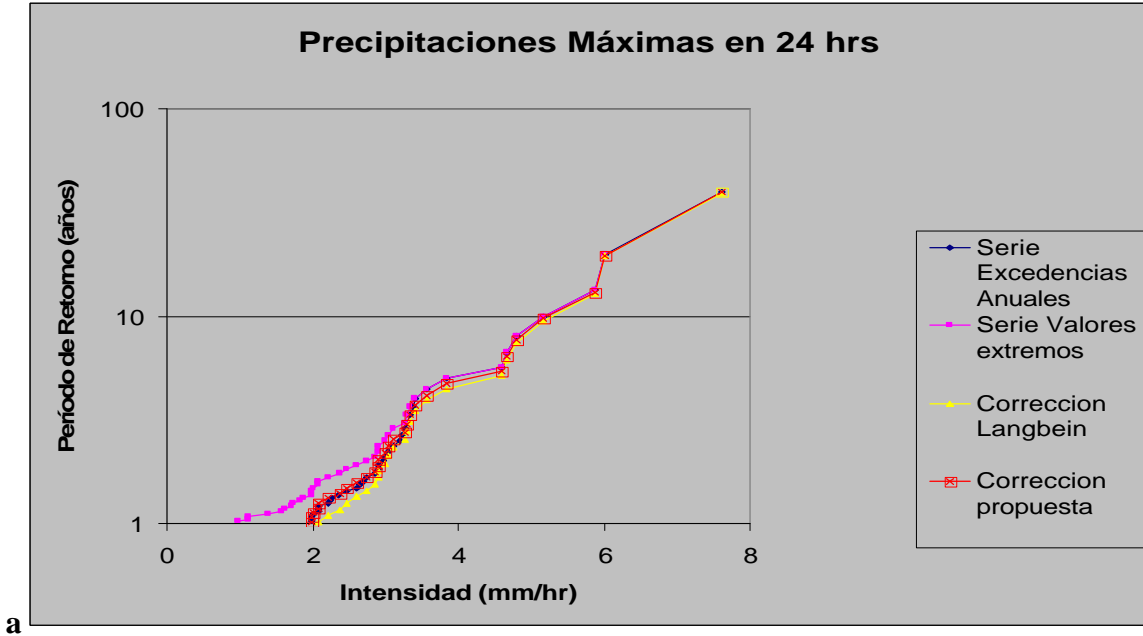


Figura 6 Curva de Frecuencia Acumulada

3.2.2 Análisis de frecuencia analítico.

Al intentar efectuar el mismo análisis en forma analítica, ajustando a ambas series una función de distribución de frecuencia, se observó un efecto que merece mayor atención en estudios futuros. Como las series de valores extremos anuales y de excedencias anuales son coincidentes para valores altos y sólo comienzan a diferir para períodos de retorno bajos, la serie de valores extremos anuales resulta de menor promedio y mayor desviación estándar, por lo que la pendiente de su curva de frecuencia acumulada es mayor y los ajustes analíticos de las distribuciones de frecuencia habitualmente utilizadas, en el caso de la serie de valores extremos anuales no sólo no sobreestima el período de retorno de los valores extrapolados altos, sino que los subestima, en contradicción a la teoría. Para períodos de retorno bajos, se cumple la subestimación estimada, pero nuevamente en una magnitud menor a la estimada por el criterio de Langbein.

En este caso, el análisis se efectuó para todas las duraciones de lluvia en función de distintos períodos de retorno, llegándose a proponer una expresión corregida con la siguiente estructura, que logra el mejor ajuste con la serie de excedencias anuales tanto en el rango de subestimación como de sobreestimación:

$$T_{VE} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{k}{T_{EA}}}} \quad (5) \quad \text{o}$$

$$T_{EA} = \frac{k}{\ln\left(\frac{T_{VE}}{T_{VE} - 1}\right)} \quad (6)$$

Los valores obtenidos para la constante k, para los distintos períodos de retorno, se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9 Valores de la constante k

Período de retorno (años)	k
2	1.125
5	1.125
10	1.200
20	1.225
50	1.225
100	1.225

Un valor único universal propuesto para la constante k, que logra el mejor ajuste a todos los datos, corresponde al valor $k = 1.15$

Al respecto cabe señalar que las series de valores extremos anuales consideradas en el análisis fueron las construidas con el máximo valor anual correspondiente a cada duración específica. Si se pretende construir curvas de intensidad duración frecuencia a partir de sólo la tormenta anual que registra el valor máximo en 24 horas, los errores que resultan para duraciones pequeñas alcanzan magnitudes inadmisibles, ya a partir de períodos de retorno de 10 años o menores.

4. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se proponen curvas IDF y coeficientes de duración y frecuencia para la ciudad de Valparaíso, basadas en un análisis exhaustivo de la información pluviográfica disponible, que permitió la determinación casi exacta de las series de excedencias anuales para todas las duraciones de lluvia entre 10 minutos y 24 horas, con resultados que llenan un importante vacío de información hidrometeorológica en la ciudad.

El análisis comparativo de resultados considerando el uso de series de valores extremos anuales para cada una de las duraciones, confirma que éstas sobreestiman los reales períodos de retorno, pero en una magnitud inferior a la predicha con el criterio de Langbein.

La confección de curvas IDF a partir de sólo la tormenta máxima anual en 24 horas conduce a errores de magnitud mayor para períodos de retorno menores o iguales a 10 años.

Lo anterior deja en evidencia la necesidad de establecer con claridad la metodología utilizada en la determinación de curvas IDF y coeficientes de duración en el país, pues los resultados dependen en forma importante de la metodología utilizada, para períodos de retorno bajos.

REFERENCIAS

Arretz, A. 1943. Método de Grunsky para el Cálculo de Crecidas, Revista Chilena de Ingeniería, N°2, Santiago, Chile.

DGA, 1991, Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 Días, Santiago, Chile.

Espíldora, B. 1971. Estimación de Curvas IDF Mediante Coeficientes Generalizados, I Coloquio Nacional de Hidráulica, Santiago.

Espíldora, B. et al., 1975, Elementos de Hidrología, Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile

Espinoza A. 2005. Curvas IDF de la Estación Valparaíso-USM, Mem. Ing. Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

MINVU, 1996. Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en sectores Urbanos. Guía de Diseño.

Nicoud J. 2004. Curvas IDF para la Ciudad de Valparaíso. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.