

# SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XXI CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

### SUBESTIMACIÓN DE LOS VALORES IDF EN CONCEPCIÓN. 1: DERIVACIÓN COMPLETA Y COMPARACIÓN CON OTRAS METODOLOGÍAS

XIMENA SOTO C.<sup>1</sup>  
CLAUDIO MEIER V.<sup>2</sup>

#### RESUMEN

Aprovechando que, además de los registros con rollos semanales, Concepción contaba con pluviogramas diarios en la Estación Bellavista, construimos las curvas IDF entre 10 min y 24 h con distintos enfoques, comparándolas entre sí y con los valores propuestos por otros autores. Los análisis consideraron series de máximos anuales, como es tradicional, pero también series de duración parcial, de modo de estimar mejor para períodos de retorno bajos y series cortas.

En general, los resultados validan los supuestos básicos del método de coeficientes generalizados (Varas y Sánchez, 1984): los coeficientes de duración son independientes de la frecuencia, para  $T \geq 10$  años, mientras que los coeficientes de frecuencia son razonablemente independientes de la duración para  $d \geq 1$  h. El parámetro K, la razón entre la lluvia máxima en 24 h y aquella sobre un día meteorológico, vale 1.14 para  $T = 1$  año, aumentando monótonicamente hasta 1.19 para  $T = 100$  años. No se observan grandes diferencias entre máximos anuales y duración parcial.

Muy preocupante, sin embargo, es el hecho que en comparación con nuestros resultados, los valores IDF de diseño propuestos para Concepción por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) subestiman fuertemente las intensidades para las duraciones más cortas, un sesgo que aumenta con el período de retorno. Para  $d = 1$  h y  $T = 10$  años, encontramos una intensidad de 35.4 mm/h, mientras que LEN (2002), la referencia usada para diseño en Chile, propone 19.9 mm/h, valor que según nuestros análisis ocurre cada 10½ meses. Para  $d = 1$  h y  $T = 100$  años, tenemos  $i = 50.8$  mm/h, versus los 29.0 mm/h de LEN (2002), los cuales, de acuerdo a nuestros datos, tienen un período de retorno real de menos de 3.8 años, en vez de los 100 años informados, una frecuencia de falla 27 veces mayor. Estas diferencias son excesivas, por lo que deben explicarse.

---

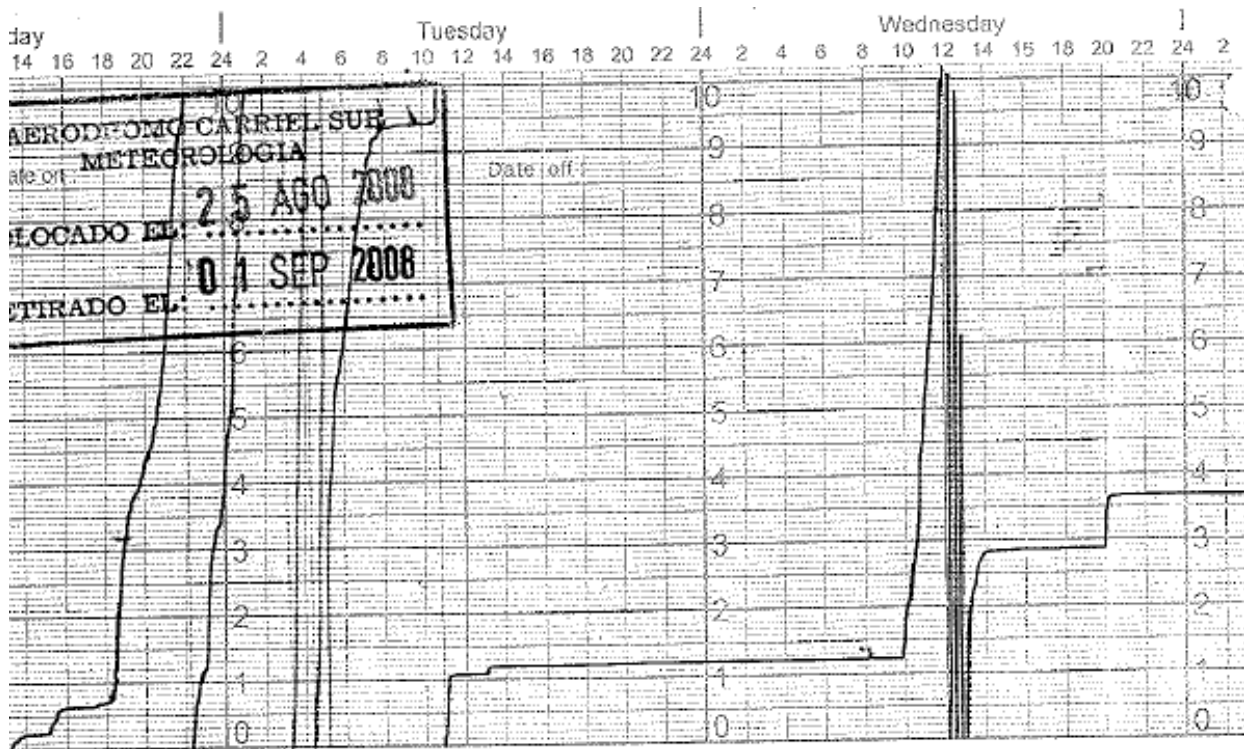
<sup>1</sup> Ingeniero Civil, Universidad de Concepción – xsotocaceres@gmail.com

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - cmeier@udec.cl

# 1. INTRODUCCIÓN

Los valores IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) son fundamentales para el diseño de obras de drenaje vial y urbano, así como en cuencas agrícolas y forestales pequeñas, en que no se cuenta con datos de caudal, debiendo usarse metodologías para convertir precipitación en escorrentía. En particular, son de mayor importancia las duraciones cortas, e.g., menores a 4 horas, puesto que es para éstas que tienen mayor sentido los supuestos de lluvia uniforme espacialmente y constante en el tiempo, requeridos los métodos simples para obtener caudales de diseño.

Las curvas IDF utilizadas para diseño en Concepción (Varas y Sánchez, 1984; LEN, 2002) se basan en los datos pluviográficos de la Estación Meteorológica Carriel Sur, operada por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Ésta cuenta con un pluviógrafo analógico Lambrecht, de la mejor calidad, pero como es usual en Chile, se usan rollos de papel semanales, los que realmente no tienen resolución suficiente para discriminar cuánto puede llover sobre las duraciones más cortas, como se ejemplifica en la Figura 1.



**Figura 1.** Ejemplo de pluviograma semanal, típicamente usado en las mejores estaciones meteorológicas en Chile (se muestran sólo dos días y medio del pluviograma completo).

Para algunas ciudades del país, se dispone de series pluviográficas con mayor resolución temporal, pero típicamente han sido obtenidas en el marco de proyectos de corto plazo (por ejemplo, para el desarrollo de los planes maestros de aguas lluvia), cubriendo sólo unos pocos eventos. Además de abarcar períodos cortos y discontinuos, estos registros se han hecho en pluviógrafos de cazoletas o báscula oscilante, con una serie de problemas conocidos: no-linealidad, subestimación hasta en un 25% para las intensidades más extremas (ASCE, 1996; Molini *et al.*, 2005), y requerimientos de calibración inicial intensivos así como un control de

calidad y mantención continuos, como mínimo a la escala semanal (Félix, 2010). Finalmente, la mayoría de estos instrumentos no han sido instalados siguiendo los estándares de calidad propios de estaciones meteorológicas patrón, de las mejores clases, como sí lo hace la DMC (i.e., criterios de Leroy, 1999, o de la Organización Meteorológica Mundial, WMO-CIMO, 2008).

Concepción fue la excepción: contó con la Estación Meteorológica Bellavista, del Departamento de Física de la Atmósfera y el Océano (hoy Depto. de Geofísica) de la Universidad de Concepción, la cual hoy está lamentablemente discontinuada. En ésta, con un pluviógrafo de sifón Lambrecht, se recolectaron 19 años de datos de precipitación en pluviogramas diarios, los que permiten discriminar mucho mejor las intensidades sobre duraciones cortas, hasta 10 min. Para ejemplificar la importancia que tiene este tipo de información, en todos los países europeos y en los EE.UU., típicamente los ingenieros disponen de valores de intensidades extremas para duraciones de hasta 5 min, o incluso 1 o 2 min, para diseño vial y urbano.

Por otra parte, en la práctica nacional sólo se usan períodos de retorno mayores a 10 años, pero en otros países hay muchos casos de drenaje urbano y vial en que, para optimizar los diseños, se recomienda usar períodos tan bajos como 1 o 2 años. El drenaje de aguas lluvia en calles de menor importancia, o el drenaje transversal de la plataforma (para evitar el *aquaplaning*) son ejemplos de lo anterior. Finalmente, en muchos casos se dispone sólo de registros pluviográficos cortos, con lo cual es difícil la estimación con series de máximos anuales.

En este trabajo, motivados por la disponibilidad de registros pluviográficos de resolución diaria en Concepción, nos enfocamos en generar curvas IDF para compararlas con las existentes, obtenidas a partir de registros semanales. Aplicamos la metodología de duración parcial, que permite estimar mejor para períodos de retorno cortos, y en el caso de series cortas, cotejándola con el tradicional análisis de máximos anuales. Los detalles de este trabajo, así como las series de datos utilizadas para los análisis de frecuencia, se encuentran en Soto (2004).

## **2. METODOLOGÍA**

Para obtener los valores IDF se requiere disponer de un registro pluviográfico, el cual se analiza con el fin de obtener, para cada tormenta independiente, las precipitaciones máximas para cada duración escogida para el análisis. Luego, de la totalidad de los datos, considerando todas las tormentas individuales, debe extraerse las series de tiempo a analizar. Esto puede efectuarse con el tradicional enfoque de los máximos anuales, o bien a la forma de series de duración parcial. Finalmente, efectuando análisis de frecuencia, puede encontrarse las intensidades asociadas a distintos períodos de retorno, para cada duración de interés.

### **Análisis de los Registros de Precipitación**

Las series pluviográficas (registros continuos) y pluviométricas (registros totalizados) utilizadas en este estudio fueron proporcionadas por el Departamento de Física de la Atmósfera y el Océano (hoy Departamento de Geofísica), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Concepción, a cargo de la Estación Bellavista, ubicada en  $36^{\circ}47'$  de Latitud Sur y  $73^{\circ}01'$  de Longitud Oeste, a una altura aproximada de 15 msnm. La estación, lamentablemente discontinuada hacen unos 10 años debido al desarrollo inmobiliario del sector, contaba con un pluviógrafo de sifón Lambrecht Göttingen, así como con un instrumento totalizador de respaldo.

### *Tipos de registros disponibles*

Los registros pluviográficos disponibles suman 29 años, y son de dos tipos:

- Pluviogramas diarios, que permiten discriminar con un paso de 0.1 mm de precipitación y de 10 min en la escala temporal, disponibles entre 1971 y 1989, y entre 1992 y 1995.
- Pluviogramas semanales, que permiten discriminar los mismos 0.1 mm de lluvia, pero sólo con un paso temporal de 2 h. Éstos se usaron en 1990 y 1991, y entre 1995 y 1999.

Existen registros totalizados cada 12 horas para el período 1965 a 1999, en que se midió el agua caída a las 8:00 y a las 20:00 de cada día (o sea, "medios días meteorológicos").

### *Análisis de la calidad de los datos*

Entre los años 1971 y 1974, y en 1999, faltaba más de la mitad de los pluviogramas en aquellos días en que el pluviómetro indicaba lluvia, por lo que no fueron considerados en el análisis. De este modo, se examinó en detalle 24 años de registros, desde 1975 hasta 1998. Previo a usar la información de los pluviogramas, era necesario asegurarse que los registros no contuviesen errores. Para ello, examinamos las anotaciones anotadas en los pluviogramas, y comparamos las mediciones de los pluviogramas, totalizándolas sobre cada día meteorológico (de las 8:00 de un cierto día hasta las 8:00 del día siguiente), con los registros del instrumento totalizador.

Así, siguiendo el procedimiento estándar, las precipitaciones obtenidas desde los pluviogramas se corrigieron sobre la base de lo registrado en el pluviómetro, puesto que un instrumento totalizador es más preciso. Para cada día meteorológico con precipitación mayor a 10 mm, se comparó lo registrado por ambos instrumentos, y se procedió como sigue:

- Si la diferencia era menor o igual a 3 mm, la alturas de precipitación leídas en el pluviograma para las distintas duraciones de interés, fueron corregidas multiplicándolas por la razón entre lo medido en el pluviómetro y lo registrado en el pluviógrafo.
- Si la diferencia estaba entre 3 y 6 mm, se corrigió de igual manera, pero por un factor calculado sobre medio día meteorológico; es decir, como se disponía de datos totalizados cada 12 horas, se refinó la corrección a la razón entre el pluviómetro y el pluviógrafo sobre el medio día respectivo, medido sea de 8:00 a 20:00, o bien de 20:00 a 8:00 del día siguiente.
- Si la diferencia era mayor a 6 mm, se descartaba ese día y no era considerado en el análisis.

Es importante notar que fueron pocos los días con errores mayores a 6 mm, por lo que no se piensa que el descartarlos haya podido causar un sesgo apreciable. Por lo demás, las diferencias entre el instrumento registrador y el totalizador fueron claramente aleatorias en torno a una media nula, con lo que se descartó la ocurrencia de errores sistemáticos.

### *Independencia entre tormentas*

Los postulados de la teoría de probabilidades indican que, para poder realizar un análisis de frecuencia, las series de tiempo deben componerse de valores independientes entre sí, que sean homogéneos (esto es, provengan de la misma distribución). Por ello, fue necesario adoptar un criterio para separar los eventos entre sí. Considerando que las tormentas en Concepción corresponden normalmente a eventos de tipo frontal (ciclones extra-tropicales), se fijó un lapso mínimo de 12 horas sin precipitación para poder suponer que dos eventos eran independientes

entre sí. Si bien este "período seco" de 12 h entre tormentas puede parecer largo, en comparación con las 2 h de Eagleson (1970), las 6 a 8 h de LEN (2002), o las 10 h de Buishand (1990), se destaca que en Concepción no ocurren realmente eventos convectivos, razón por la cual se adoptó el mismo criterio de independencia que en Pranzini y Meier (2001). Por igual motivo, al tenerse sólo tormentas frontales, es razonable suponer homogeneidad estadística, reconociendo que en realidad ocurren eventos tanto por el paso de frentes cálidos como fríos.

#### *Obtención de datos desde los pluviogramas*

Para cada año de registro, se individualizaron los eventos según el criterio anterior, despreciando aquellos en que la altura de agua caída fuese menor a 10 mm. En efecto, se consideró difícil que tales tormentas pudiesen contribuir intensidades extremas. La Tabla 1 muestra el número de tormentas analizadas cada año para obtener las series de datos, con un gran total de 727 eventos:

**Tabla 1.** Cantidad de eventos independientes de precipitación analizados por año

<b>Año</b>	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
<b>Eventos</b>	35	22	41	34	34	37	36	39	24	30	32	32	19
<b>Año</b>	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	<b>Total</b>	
<b>Eventos</b>	27	23	28	29	40	34	27	28	22	31	23	<b>727</b>	

Las duraciones consideradas en el análisis fueron 10, 20, 30 y 45 minutos, y 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, y 24 horas. Debido a que hay 5 años de pluviogramas semanales, que sólo permiten discriminar con un paso temporal de 2 h, se contó con 19 años de datos para las duraciones iguales o menores a 1 h, pero con 24 años para las duraciones mayores o iguales a 2 h.

Para identificar las cantidades máximas de agua caída sobre cada duración de análisis, se dibujaron ventanas demarcando cada duración sobre un papel transparente, las cuales se deslizaron a lo largo de los pluviogramas. Así, para cada uno de los 727 eventos analizados (565 para las duraciones  $d \leq 1$  h), y para cada duración, se identificó la máxima lluvia caída.

#### **Construcción de las Series de Datos**

Las precipitaciones máximas obtenidas de los pluviogramas se corrigieron o descartaron según lo indicado anteriormente, antes de extraer las series para el análisis de frecuencia. Para formar las series de máximos anuales, se seleccionó el valor máximo de agua caída en cada año de registro, para cada una de las duraciones. Como se indicó en la Introducción, sin embargo, también se formaron series de duración parcial (conocidas como "*peaks over a threshold*" - máximos por sobre un umbral - en inglés), con tres objetivos: (i) estimar con suficiente precisión los valores IDF para períodos de retorno bajos, (ii) estimar mejor para el caso de registros cortos, como los que se tiene en este caso, y (iii) estimar para los períodos de retorno reales. Para extraer tales series, los valores obtenidos desde los pluviogramas para cada duración de interés fueron ordenados de mayor a menor, escogiéndose todos aquellos por sobre un umbral escogido de modo tal que se incluyese cuatro eventos por año, en promedio.

Así, para cada una de las duraciones menores o iguales a 1 h, en que se tenía 19 años de registro, se ordenaron los cerca de 600 valores de mayor a menor, escogiéndose los 76 mayores ( $76 = 19 \cdot$

4). En cambio, para las duraciones mayores o iguales a 2 h, con 24 años de registro, así como para los datos pluviométricos para medio día meteorológico (D/2) y día meteorológico completo (D) se extrajo los 96 ( $= 24 \cdot 4$ ) mayores valores desde la muestra de más de 700 tormentas.

### **Análisis de Frecuencia**

Los análisis probabilísticos se efectuaron con el fin de obtener las intensidades asociadas a cada duración para períodos de retorno de hasta 100 años. En el caso de las series de máximos anuales, éstas siempre tienen una cola hacia la izquierda debido a que incorporan algunos valores bajos, al "obligarse" a muestrear incluso en años sin eventos realmente extremos. Para tales series, se consideraron las siguientes distribuciones: lognormal de 2 y 3 parámetros, Pearson de 3 parámetros, logPearson de 3 parámetros, y Gumbel (valores extremos tipo I).

Por otra parte, las series de duración parcial, al consistir sólo de valores por sobre un umbral, tienen un comportamiento muy diferente, decreciendo monotónicamente la densidad, o sea con una sola cola larga hacia la derecha. En tal caso, se ajustó las distribuciones exponencial y Gamma de 2 parámetros, pero a los valores de precipitación desfasados, restándoles el umbral. Alternativamente, lo anterior corresponde a ajustar las distribuciones exponencial de 2 parámetros y Gamma de 3 parámetros, pero a los datos originales, sin desfase.

#### *Selección de los modelos probabilísticos*

Para escoger las distribuciones a utilizar en cada caso, se aplicó el método gráfico, y se calculó el estadígrafo de Kolmogorov-Smirnov (K-S). El primero consiste en dibujar las funciones de densidad de probabilidades y el histograma en un mismo gráfico, observando el comportamiento de los distintos modelos (ver ejemplo en las Figuras 2 y 3). En el segunda caso, se mide la máxima desviación absoluta entre las funciones de distribución acumulada muestral y teórica.

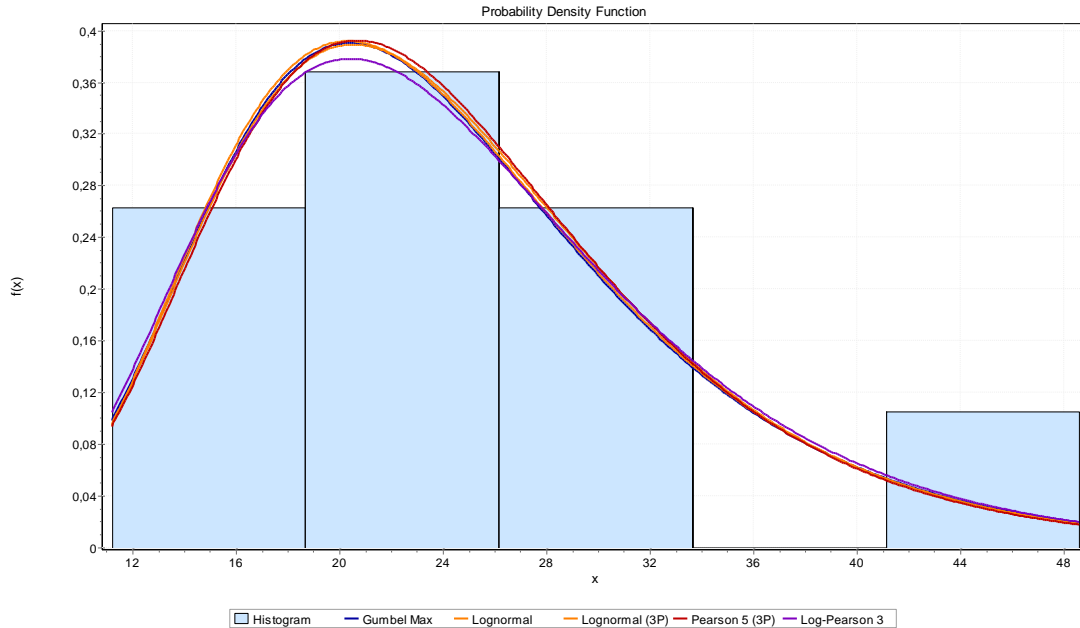
Según lo anterior, se escogió la distribución Gumbel para las series de máximos anuales, y la Gamma de 2 parámetros para las series de duración parcial. Es importante destacar que, en el caso de los máximos anuales,  $N = 19$  o bien  $N = 24$  no constituyen en ningún caso tamaños muestrales que permitan escoger adecuadamente una distribución (Slack *et al.*, 1975; Klemeš, 1987). Para las series de duración parcial, los ajustes fueron consistentemente mejores con la Gamma, dado que la exponencial, con su parámetro único, no tiene suficiente flexibilidad. La única excepción a esta regla la constituyeron ambos tipos de datos pluviométricos (para medio día D/2 y día meteorológico entero D), en que la exponencial tuvo mejor ajuste.

Una vez ajustadas las distribuciones, se obtuvieron las intensidades asociadas a períodos de retorno de 1.5, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años, para el caso de máximos anuales, períodos a los cuales se sumaron estimaciones para  $T = 6$  meses, 9 meses, y 1 año, en el caso de series de duración parcial.

### **Comparación entre Máximos Anuales y Duración Parcial**

Los valores de precipitación (o intensidad) obtenidos para un cierto  $T$  a partir de series de máximos anuales no son exactamente equivalentes a aquellos derivados con duración parcial. En efecto, si se considera la definición aceptada de período de retorno ("tiempo promedio que transcurre entre la recurrencia de un cierto evento" o "tiempo medio de recurrencia"), se tiene

realmente que sólo los valores obtenidos desde series de duración parcial cumplen con tal significado. Aquellos valores IDF estimados a partir de series de máximos anuales cumplen con una definición distinta: “tiempo promedio que transcurre entre años en que se excede al menos una vez la magnitud de un cierto evento”, puesto que sólo consideran el máximo valor anual.

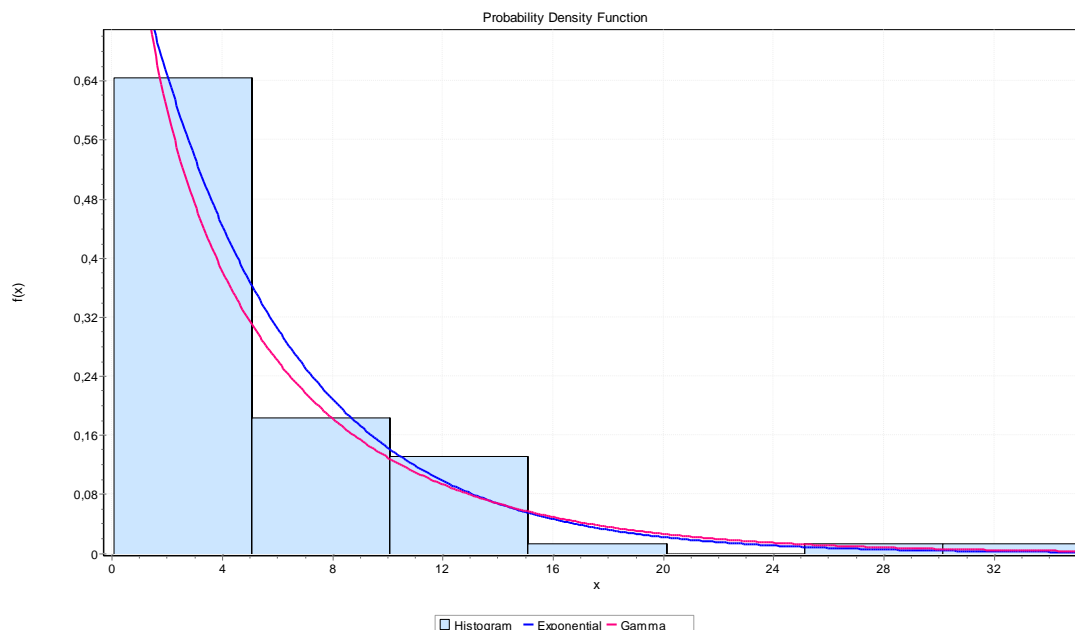


**Figura 2.** Ajuste de distintas distribuciones para la serie de máximos anuales, duración 1 h. El eje de las abscisas muestra los valores de altura caída sobre 1 h, en mm.

Para diferenciar entre estas dos definiciones alternativas de período de retorno, le llamaremos  $T_p$ , período de retorno de un evento obtenido por duración parcial, a la definición real de período de retorno, mientras que denominaremos  $T_a$ , período de retorno por máximos anuales, a la segunda definición. Claro está, para períodos de retorno altos se tendrá que los valores de  $T_a$  y  $T_p$  convergerán, puesto que es altamente improbable que puedan repetirse eventos poco frecuentes dos o más veces en un mismo año. Sin embargo, para períodos de retorno bajos, estas dos definiciones resultarán en valores divergentes de precipitación, ya que eventos comunes tienen mayor probabilidad de ocurrir dos o más veces en un mismo año. En tal caso, el enfoque de duración parcial (definición correcta de período de retorno) considerará todos y cada uno de tales eventos, resultando en un período de retorno que puede ser incluso menor a 1 año. Si se asume un comportamiento de Poisson, esto es, que las tormentas tienen igual probabilidad de ocurrencia en el tiempo, se puede relacionar ambos períodos de retorno usando la expresión:

$$T_p = - \frac{1}{\ln \left( 1 - \frac{1}{T_a} \right)} \quad \text{Ec. (1)}$$

En los hechos, se sabe que la precipitación tiene una marcada estacionalidad en Chile central, por lo que la tasa de llegada de eventos no es constante. Sin embargo, de todas formas se utilizará esta expresión para poder comparar las magnitudes de las intensidades obtenidas con ambos enfoques, haciendo equivalencia entre los dos tipos de período de retorno.



**Figura 3.** Ajuste de distintas distribuciones para la serie de duración parcial sobre un umbral de 13.45 mm, para duración 1 h.

### Verificación de Supuestos del Método de Curvas IDF Generalizadas

Varas y Sánchez (1984) plantearon curvas IDF generalizadas para Chile, tales que la precipitación asociada a cualquier duración  $d$  (horas) y período de retorno  $T$  (años), queda dada por:

$$P_d^T = K \cdot CD_d \cdot CF_T \cdot P_D^{10}$$

donde:  $P_d^T$  es la precipitación para una duración  $d$  horas y período de retorno  $T$  años  
 $K$  es un parámetro que relaciona la lluvia máxima en 24 horas (ventana libre) y la máxima diaria caída en un día meteorológico (de 8:00 a 8:00 del día siguiente)  
 $CD_d$  coeficiente de duración correspondiente a  $d$  horas ( $1 \leq d \leq 24$  horas)  
 $CF_T$  coeficiente de frecuencia correspondiente a  $T$  años ( $10 \leq T \leq 100$  años)  
 $P_D^{10}$  es la precipitación diaria con período de retorno 10 años

Con las lluvias que obtuvimos para las distintas duraciones y períodos de retorno, verificamos si se cumplen en Concepción los dos supuestos principales de este método: (i) que los coeficientes de duración son independientes del período de retorno, y (ii) que los coeficientes de frecuencia son independientes de la duración. También estimamos el valor  $K$ , para cada período de retorno, calculado como la razón entre la lluvia máxima caída en 24 horas y la lluvia máxima diaria (día meteorológico). Varas y Sánchez (1984) recomendaron usar un valor  $K = 1.1$ , tentativamente.

### Comparación con Estudios Anteriores

Finalmente, los valores IDF obtenidos en este trabajo fueron comparados con todos aquellos disponibles en estudios anteriores, hechos por Varas y Sánchez (1984), Celis (1984), Ruiz (2000), LEN (2002), y Pizarro *et al.* (2013).



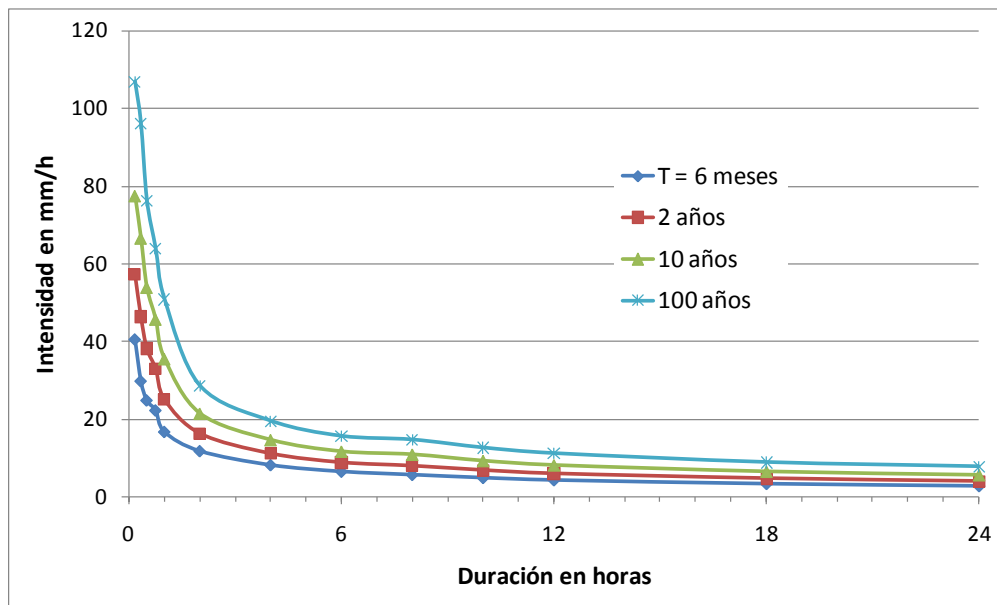
### 3. RESULTADOS

#### Valores IDF

Los valores obtenidos para Concepción con el análisis más completo se muestran en la Tabla 2, mientras que la Figura 4 presenta las curvas IDF correspondientes, para cuatro  $T_p$  distintos. Se enfatiza que todos estos valores provienen del análisis de duración parcial, realizado a partir de muestras de tamaño 76 o bien 96 (según sea la duración), obtenidas para todas y cada una de las tormentas con altura total caída mayor a 10 mm. Por ende, los períodos de retorno indicados son del tipo  $T_p$ , esto es, corresponden a la definición asociada al tiempo medio de recurrencia.

**Tabla 2.** Valores PDF para Concepción, para duraciones  $d$  entre 10 min y 24 h y períodos de retorno  $T_p$  entre 6 meses (0.5 años) y 100 años, obtenidos con análisis de duración parcial.

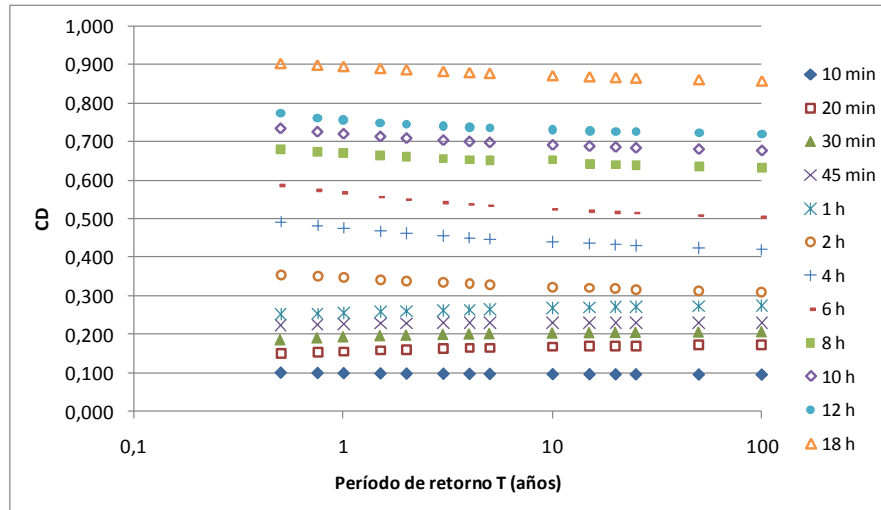
$T_p / d$	10 min	20 min	30 min	45 min	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	18 h	24 h
0.5	6,73	9,90	12,38	14,79	16,67	23,49	32,62	38,94	45,31	48,90	51,45	60,12	66,54
0.75	7,53	11,47	14,33	16,88	19,00	26,21	36,14	43,05	50,67	54,56	57,22	67,53	75,12
1	8,11	12,61	15,73	18,38	20,72	28,11	38,62	45,97	54,50	58,64	61,44	72,83	81,34
1.5	8,94	14,26	17,69	20,49	23,22	30,74	42,10	50,11	59,93	64,42	67,51	80,32	90,24
2	9,53	15,44	19,09	21,99	25,03	32,58	44,56	53,06	63,79	68,55	71,88	85,66	96,61
3	10,38	17,12	21,06	24,12	27,61	35,17	48,03	57,21	69,26	74,40	78,09	93,19	105,7
4	10,98	18,32	22,47	25,62	29,46	36,99	50,48	60,17	73,15	78,56	82,54	98,54	112,1
5	11,45	19,26	23,55	26,79	30,91	38,39	52,38	62,46	76,17	81,80	86,00	102,7	117,1
10	12,91	22,18	26,93	30,43	35,44	42,74	58,28	69,58	86,56	91,88	96,83	115,6	132,8
15	13,77	23,90	28,91	32,56	38,11	45,27	61,73	73,76	91,07	97,79	103,2	123,2	142,0
20	14,38	25,13	30,32	34,07	40,02	47,06	64,17	76,72	94,98	102,0	107,8	128,6	148,5
25	14,86	26,08	31,41	35,25	41,50	48,45	66,07	79,02	98,02	105,2	111,3	132,8	153,6
50	16,33	29,05	34,79	38,90	46,12	52,75	71,94	86,16	107,5	115,4	122,3	145,7	169,5
100	17,81	32,03	38,18	42,55	50,77	57,03	77,82	93,31	116,9	125,6	133,3	158,7	185,3



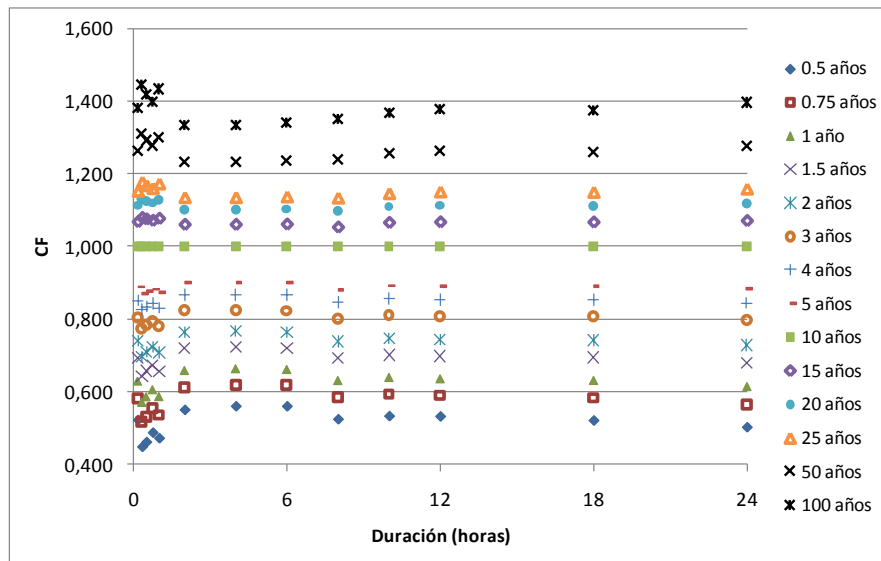
**Figura 4.** Curvas IDF para Concepción, para período de retorno real  $T_p = 0.5, 2, 10$  y 100 años.

## Coeficientes de Duración y Frecuencia

Las Figuras 5 y 6 muestran el comportamiento de los coeficientes de duración y frecuencia, para Concepción. Éstos fueron obtenidos a partir de los valores IDF de la Tabla 2, en modo de predicción hidrológica (esto es, para diseño), y no como razones para tormentas individuales.



**Figura 5.** Comportamiento del Coeficiente de Duración, CD, en Concepción, en función del período de retorno T.



**Figura 6.** Coeficiente de Frecuencia, CF, como función de la duración d, para Concepción.

Se observa que el coeficiente de duración varía suavemente con T, al menos para  $T < 10$  años. Para períodos de retorno mayores, si bien aún hay variabilidad, CD puede suponerse constante e independiente del período de retorno, para todas las duraciones. En la Figura 6, por otra parte, donde se grafica el comportamiento de CF en función de la duración, se observa mayor variabilidad, con curvas que no son monótonicas. De todas formas, la dispersión de los valores probablemente no sea relevante desde el punto de vista del diseño ingenieril, por lo que no es un mal supuesto suponer que los CF son constantes e independientes de la duración, en Concepción.

### Razón entre Máximos Pluviográficos y Pluviométricos

En el presente caso, debido a que el pluviómetro de la Estación Bellavista era controlado dos veces al día, a las 8:00 y a las 20:00, es posible estimar el comportamiento de dos parámetros que relacionan las precipitaciones máximas medidas desde el pluviograma continuo ("con ventana de tiempo libre") con aquellas obtenidas en instrumentos totalizadores.

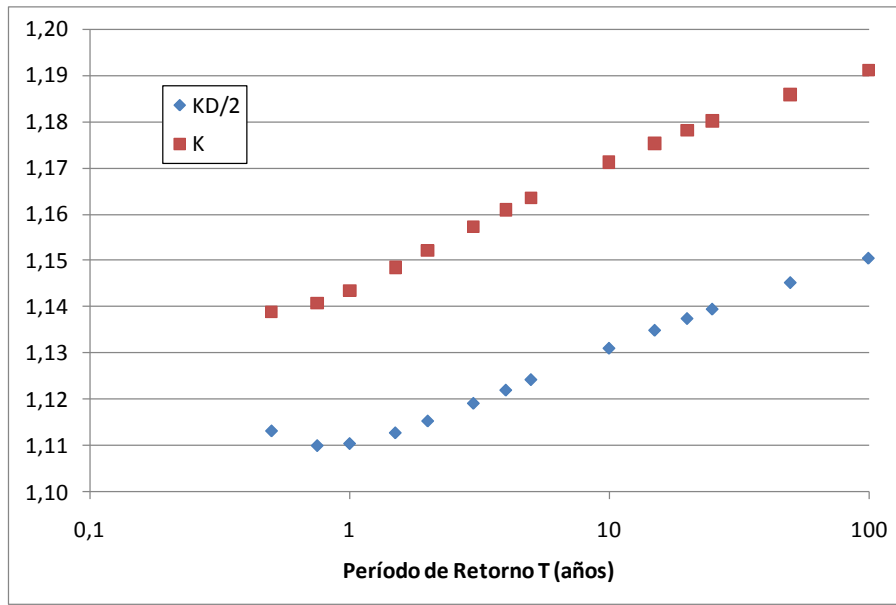
Tal como en Varas y Sánchez (1984), se estima  $K$ , la razón entre la lluvia máxima sobre 24 h,  $P_{24}$ , obtenida con datos pluviográficos, y su equivalente diario,  $P_D$ , medido en un pluviómetro, sobre un día meteorológico. Análogamente, se define  $K_{D/2}$ , que corresponde a la razón entre la lluvia máxima sobre 12 h,  $P_{12}$ , considerando datos continuos, y su equivalente sobre medio día meteorológico,  $P_{D/2}$ , considerando "ventana fija" entre 8:00 y 20:00 o bien entre 20:00 y 8:00. Notar que las razones se calculan entre lluvias con igual probabilidad, y no por evento.

La Tabla 3 entrega los cuantiles para  $P_{12}$ ,  $P_{24}$ ,  $P_D$ , y  $P_{D/2}$ , obtenidos según el análisis de frecuencia de las series de duración parcial, así como los correspondientes valores de  $K = P_{24} / P_D$  y  $K_{D/2} = P_{12} / P_{D/2}$ . En la Figura 7, se grafica el comportamiento de los parámetros  $K$  y  $K_{D/2}$ , sobre el rango de períodos de retorno considerados en el presente estudio.

**Tabla 3.** Valores para Concepción de la precipitación máxima en 12 h,  $P_{12}$  (mm), precipitación máxima en 24 h,  $P_{24}$  (mm), precipitación máxima sobre medio día meteorológico,  $P_{D/2}$  (mm), precipitación máxima diaria,  $P_D$  (mm), y de los parámetros  $K_{D/2}$  y  $K$  (adimensionales), sobre el rango de períodos de retorno analizados en el presente trabajo.

$T_p$	$P_{12}$	$P_{24}$	$P_{D/2}$	$P_D$	$K_{D/2}$	$K$
<b>0.5</b>	51,45	66,54	46,22	58,42	1,113	1,139
<b>0.75</b>	57,22	75,12	51,55	65,85	1,110	1,141
<b>1</b>	61,44	81,34	55,33	71,13	1,110	1,144
<b>1.5</b>	67,51	90,24	60,67	78,57	1,113	1,149
<b>2</b>	71,88	96,61	64,45	83,85	1,115	1,152
<b>3</b>	78,09	105,7	69,78	91,29	1,119	1,157
<b>4</b>	82,54	112,1	73,57	96,56	1,122	1,161
<b>5</b>	86,00	117,1	76,50	100,7	1,124	1,164
<b>10</b>	96,83	132,8	85,62	113,4	1,131	1,171
<b>15</b>	103,2	142,0	90,95	120,8	1,135	1,175
<b>20</b>	107,8	148,5	94,74	126,1	1,137	1,178
<b>25</b>	111,3	153,6	97,67	130,2	1,139	1,180
<b>50</b>	122,3	169,5	106,8	142,9	1,145	1,186
<b>100</b>	133,3	185,3	115,9	155,6	1,150	1,191

Se observa que  $K$  fluctúa suave y monótonicamente entre un valor mínimo de 1.14 para  $T = 1$  año y un valor máximo de 1.19 para  $T = 100$  años. Esto implica que el valor  $K = 1.1$  recomendado preliminarmente por Varas y Sánchez (1984) no sería conservador para ningún período de retorno, en el caso de Concepción. Para fines ingenieriles, sería razonable el suponer que  $K$  es constante, con un valor medio de 1.18, correspondiente a la media para los períodos de retorno mayores, entre 10 y 100 años. El valor de  $K$  propuesto para Concepción en LEN (2002), de 1.03, tiene un fuerte sesgo negativo y no debe ser utilizado.



**Figura 7.** Comportamiento de los parámetros  $K_{D/2}$  y  $K$  (adimensionales), en función de  $T$ .

### Comparación Duración Parcial con Máximos Anuales

No resulta simple comparar los valores IDF que hemos obtenido con duración parcial versus aquellos derivados con el tradicional enfoque de máximos anuales, por tres motivos:

- (i) Los períodos de retorno involucrados tienen definiciones distintas: a igual valor numérico del período de retorno, la precipitación asociada a  $T_p$  es mayor que aquella correspondiente a  $T_a$ , sobre todo para períodos de retornos bajos, e.g., menores a 20 años.
- (ii) Los tamaños muestrales son mucho menores para el enfoque de máximos anuales, lo cual resulta en mayor variabilidad (mayor error de estimación).
- (iii) Las distribuciones utilizadas son diferentes en ambos casos, al ser muy distinto el comportamiento de los histogramas.

Al comparar, decidimos usar el período de retorno para serie de duración parcial,  $T_p$ , puesto que corresponde a la definición más racional (tiempo medio de recurrencia), aunque sólo se ocupe raramente en la práctica. Para lograr equivalencia entre valores IDF para un cierto  $T_p$ , derivados con duración parcial, con aquellos obtenidos con el enfoque de máximos anuales, se utilizó la Ecuación (1), asumiendo que las llegadas de eventos de lluvia se distribuyen Poisson.

Por ejemplo, la intensidad para duración 1 h con  $T_p = 2$  años,  $i_{1h}^{2 años}$ , vale 25.0 mm/h según la Tabla 2, obtenida ajustando una Gamma a la serie de duración parcial. Si se estimase la misma intensidad con la serie de máximos anuales, ajustando una Gumbel, resultaría que  $i_{1h}^{2 años}$  ahora vale 23.0 mm/h, una diferencia de -8%. Sin embargo, los períodos de retorno de 2 años en este ejemplo, aunque sean numéricamente iguales, no son comparables. Para poder cotejarlos, se aplicó entonces la Ecuación (1), la cual indica que el valor de  $T_a$  equivalente a  $T_p = 2$  años corresponde a 2.54 años. Entrando nuevamente a la Gumbel pero ahora con este " $T_a = 2.54$  años, equivalente a  $T_p = 2$  años", resulta que  $i_{1h}^{2 años}$  vale 25,3 mm/h, un valor muy cercano al determinado originalmente con duración parcial.

La Tabla 4 muestra tal comparación para las duraciones de 1 y 6 h. Para períodos de retorno bajos, las diferencias fueron mínimas, pero aumentaron con T, aunque manteniéndose acotadas. Tal como se esperaba, al comparar intensidades con igual período de retorno (numéricamente), siempre primaron aquellas obtenidas con duración parcial. El hecho que los valores obtenidos por máximos anuales hayan sido mayores que los valores de duración parcial, a pesar del ajuste, se ascribe a la mayor desviación presente en las distribuciones que se ajustaron a datos de máximos anuales, debida en gran medida a lo pequeño de las muestras, y al hecho que se introducen valores bajos en éstas, de años en que no ocurrieron realmente intensidades extremas.

**Tabla 4.** Comparación entre valores IDF (mm/h) obtenidos con duración parcial (DP) para períodos de retorno  $T_p$  (años) y con máximos anuales (MA) para períodos de retorno  $T_a$  (años) equivalentes, para las duraciones de 1 y 6 horas.

$T_p$	1 h DP	1 h MA	6 h DP	6 h MA	$T_a$
2	25,0	25,3	8,84	9,11	<b>2,54</b>
5	30,9	31,8	10,4	10,8	<b>5,52</b>
10	35,4	36,6	11,6	12,1	<b>10,5</b>
15	38,1	39,5	12,3	12,8	<b>15,5</b>
20	40,0	41,5	12,8	13,4	<b>20,5</b>
25	41,5	43,1	13,2	13,8	<b>25,5</b>
50	46,1	48,0	14,4	15,1	<b>50,5</b>
100	50,8	52,9	15,6	16,4	<b>100,5</b>

#### Comparación con Valores IDF Existentes

En la Tabla 4 se resumen los trabajos anteriores en que se ha derivado valores IDF para la ciudad de Concepción, indicando en cada caso los autores, la estación meteorológica utilizada para el análisis, el período y longitud del registro, el tipo de enfoque utilizado para extraer la serie de tiempo a analizar, y finalmente la función de densidad de probabilidades utilizada.

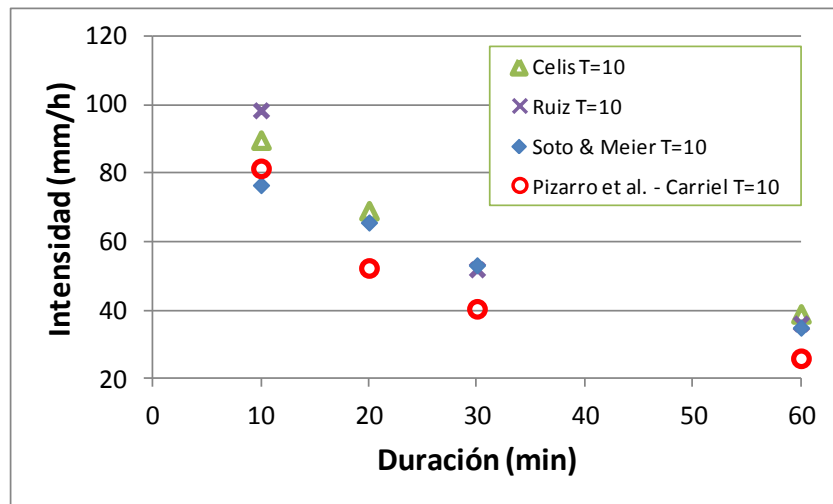
**Tabla 4.** Resumen de estudios anteriores de valores IDF hechos en Concepción

Autores	Estación	Período	Longitud	Tipo de análisis	Distribución
Varas y Sánchez (1984)	Carriel Sur	1961 - 1981	17 años	Máximos anuales	Gumbel
Celis (1984)	Bellavista	1971 - 1983	13 años	Máximos anuales	Lognormal3
Ruiz (2000)	Bellavista	1971 - 1999	29 años	Máximos anuales	Weibull
LEN (2002)	Carriel Sur	1961 - 1999	33 años	Máximos anuales	Gumbel
Pizarro <i>et al.</i> (2013)	Carriel Sur Bellavista	n/d n/d	n/d n/d	Máximos anuales Máximos anuales	Gumbel Gumbel
Presente investigación	Bellavista	1974 - 1998	24 años	Máximos anuales	Gumbel
				Duración parcial	Gamma

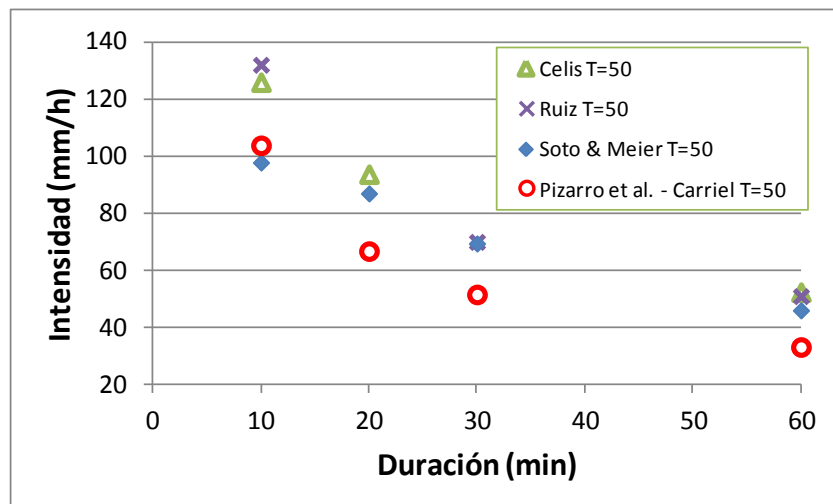
n/d: Información no está disponible en la referencia citada

Para comparar nuestros valores, obtenidos con duración parcial, con aquellos de los demás autores, todos con el enfoque de máximos anuales, se debió decidir entre: (i) comparar valores obtenidos para igual período de retorno (numéricamente), independientemente de la metodología usada en la derivación; (ii) usar nuestros valores  $T_p$  y ajustar los valores  $T_a$  de los demás a un  $T_p$  equivalente, según indica la Ecuación (1); o bien (iii) usar los valores  $T_a$  de los demás y ajustar nuestros valores  $T_p$  a un  $T_a$  equivalente, también usando la Ecuación (1). En este caso, se optó por la alternativa (iii), es decir, las comparaciones mostradas a continuación se refieren todas a valores IDF asociados a períodos de retorno  $T_a$ , que corresponden a análisis de máximos anuales.

Las Figuras 8 y 9 muestran esta comparación para duraciones menores e iguales a 1 h, para  $T_a = 10$  y 50 años, respectivamente. Para estas duraciones más cortas, sólo es posible comparar con los trabajos de Celis (1984) y Ruiz (2000), quienes usaron los mismos datos de Bellavista, aunque sobre un período de registro bastante más corto en el caso de Celis (1984), y con los resultados de Pizarro *et al.* (2013), para los datos de Carriel Sur.



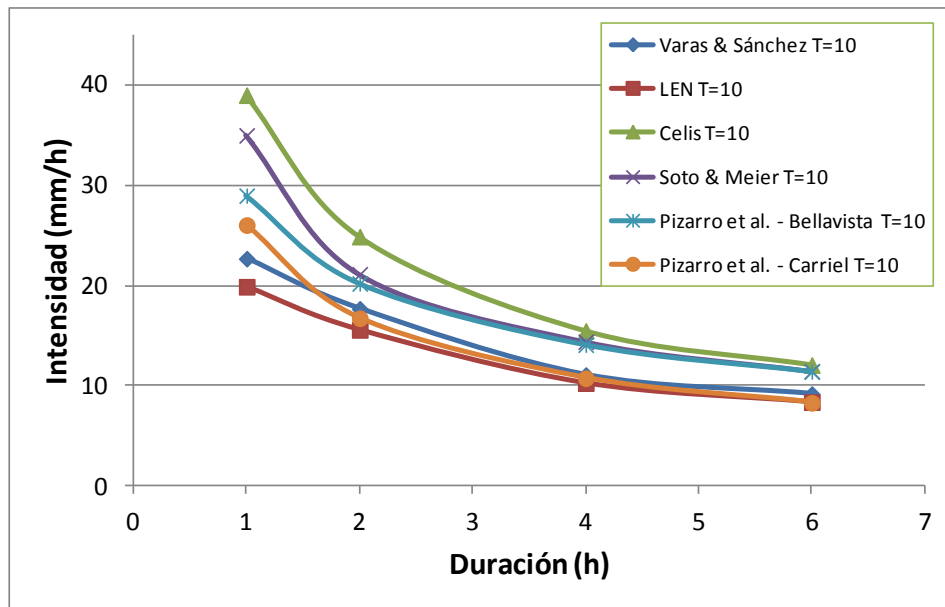
**Figura 8.** Comparación de los valores IDF de Celis (1984), Ruiz (2000), Pizarro *et al.* (2013) y el presente trabajo, para  $T_a = 10$  años.



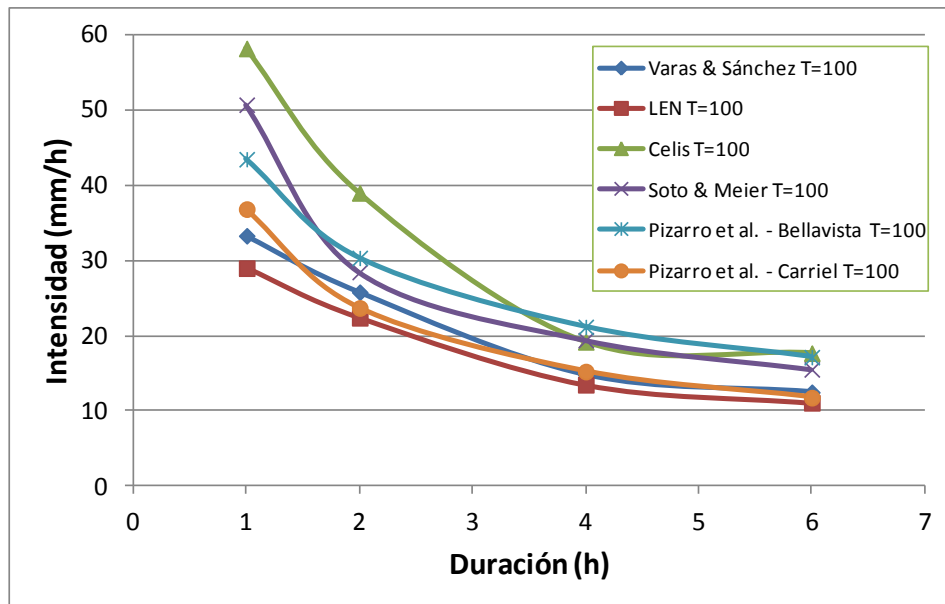
**Figura 9.** Comparación con Celis (1984), Ruiz (2000), y Pizarro *et al.* (2013) para  $T_a = 50$  años.

Para la duración más corta ( $d = 10$  min), Celis (1984) y Ruiz (2000) presentan valores IDF bastante mayores que los propuestos en este trabajo, mientras que Pizarro *et al.* (2013) tiene un valor levemente superior. Para  $20 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min}$ , los valores de Celis (1984) y Ruiz (2000) son muy similares a los nuestros, mientras que los de Pizarro *et al.* (2013) son mucho menores.

Para  $d \geq 1$  h, se puede comparar nuestros valores con los propuestos por Varas y Sánchez (1984), Celis (1984), LEN (2002), y Pizarro *et al.* (2013), tal como se muestra en las Figuras 10 y 11, para  $T_a = 10$  y 100 años, respectivamente. Nuevamente, nuestros valores fueron aminorados, reflejando un  $T_p$  equivalente a los  $T_a$  indicados. Sólo se presentan los resultados para duraciones menores a 6 horas, ya que para  $d \geq 8$  h los valores tienden a converger, aunque no del todo.



**Figura 10.** Valores IDF en Concepción, para  $T_a = 10$  años y duraciones entre 1 y 6 horas.



**Figura 11.** Valores IDF en Concepción, para  $T_a = 100$  años y duraciones entre 1 y 6 horas.

Las Figuras 10 y 11 muestran que los valores IDF de Celis (1984) superan los de la presente investigación para todas las duraciones y períodos de retorno, excepto para la duración de 4 horas y  $T_a = 100$  años. Por otra parte, es interesante notar que Pizarro *et al.* (2013) ofrecen curvas IDF tanto para Carriel Sur como para Bellavista. Sin embargo, no informan los períodos de registros utilizados en cada caso, por lo que es difícil comparar con los demás autores, desde esa perspectiva.

En Bellavista, para  $T_a = 10$  años, Pizarro *et al.* (2013) tienen valores muy similares a los nuestros, con excepción de  $d = 1$  h, donde ellos obtienen 29.0 mm/h contra nuestros 35.0 mm/h. Según nuestros análisis, 29.0 mm/h tienen un  $T_a$  de 4.3 años. Por otra parte, para  $T_a = 100$  años, Pizarro *et al.* (2013) tienen lluvias superiores a las nuestras para  $d \geq 2$  h, pero una intensidad bastante menor para  $d = 1$  h: 43.5 mm/h versus nuestros 50.7 mm/h. Según nuestros datos, 43.5 mm/h corresponde a un período de retorno  $T_a = 36$  años.

Por otra parte, los valores IDF desarrollados para Carriel Sur por Pizarro *et al.* (2013) tienen el mismo comportamiento para ambos períodos de retorno mostrados en las Figuras 10 y 11: para la duración de 1 h, son un poco mayores a los de Varas y Sánchez (1984), estando aún muy por debajo de los nuestros (que por cierto son para Bellavista); para las duraciones mayores a 2 horas, se ubican entre los valores propuestos por LEN (2002) y Varas y Sánchez (1984). Desde este punto de vista, por lo menos se tiene bastante consistencia entre las distintas curvas IDF elaboradas con los datos de Carriel Sur, aunque sea sobre datos que cubren períodos distintos.

Este análisis revela una situación más preocupante, sin embargo: Las cifras de Varas y Sánchez (1984), y sobre todo las de LEN (2002), son vastamente inferiores a las que se propone en el presente trabajo. Ello ocurre a pesar que nuestros valores IDF fueron aminorados para efectuar estas comparaciones, utilizándose períodos de retorno  $T_p$  menores a los informados (9.5 en vez de 10 años, y 99.5 en vez de 100 años), de modo de que fuesen “equivalentes” a los  $T_a$  de los demás autores.

En los hechos, los valores IDF reportados en este trabajo tienen los períodos de retorno reales que se indican, puesto que el enfoque de duración parcial refleja directamente los tiempos medios de recurrencia. Por decirlo de otra manera, cuando se indica en Tabla 2 que  $i_{1h}^{10 \text{ años}} = 35.4$  mm/h, ello quiere decir que el valor esperado del período de recurrencia de una lluvia de 35.4 mm o más sobre 1 h es de 10 años. En palabras aún más claras: en Concepción, sobre la base de toda la evidencia disponible (los 565 eventos acaecidos en 19 años de registro), se tiene que en promedio una vez cada 10 años ocurre un evento en que caen 35.4 mm o más, en la hora en que más llueve.

La subestimación entre lo propuesto por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) y lo que se informa en este trabajo es máxima para  $d = 1$  h. Aunque disminuye para duraciones mayores, de todas maneras sigue siendo apreciable. Estas diferencias se cuantifican en la Tabla 5, que compara los valores IDF propuestos en Concepción por LEN (2002), la referencia para muchos diseños, con los que aquí se entregan, para  $T = 10$  y  $T = 100$  años, para todas las duraciones entre 1 y 12 horas. En cada caso se muestra el porcentaje de subestimación y el período de retorno real del valor IDF informado por LEN (2002), según interpolación lineal entre valores de la Tabla 2, y finalmente cuántas veces ha aumentado la frecuencia de falla con respecto a lo informado.



**Tabla 5.** Cuantificación del sesgo negativo en los valores IDF de LEN (2002), con respecto a los del presente estudio, para períodos de retorno de 10 y 100 años, y para duraciones entre 1 y 12 h.

<b>Duración en horas:</b>	<b>1 h</b>	<b>2 h</b>	<b>4 h</b>	<b>6 h</b>	<b>8 h</b>	<b>10 h</b>	<b>12 h</b>
<b>Período de retorno T = 10 años</b>							
Intensidad (mm/h) Soto y Meier	35.4	21.4	14.6	11.6	10.7	9.2	8.1
Intensidad (mm/h) LEN (2002)	19.9	15.6	10.3	8.4	7.4	6.7	6.1
Subestimación LEN (2002)	44 %	27 %	29 %	28 %	31 %	27 %	25 %
T real, en años, según Soto y Meier	0.88	1.6	1.4	1.5	1.5	1.8	2.2
Aumento en la frecuencia de falla	11.4 x	6.3 x	7.1 x	6.7 x	6.7 x	5.6 x	4.5 x
<b>Período de retorno T = 100 años</b>							
Intensidad (mm/h) Soto y Meier	50.8	28.5	19.5	15.6	14.6	12.6	11.1
Intensidad (mm/h) LEN (2002)	29.0	22.4	13.5	11.1	9.9	9.0	8.4
Subestimación LEN (2002)	43 %	21 %	31 %	29 %	32 %	29 %	24 %
T real, en años, según Soto y Meier	3.8	14	6.4	7.9	6.6	9.1	13
Aumento en la frecuencia de falla	26.3 x	7.1 x	15.6 x	12.7 x	15.2 x	11 x	7.7 x

Según lo indicado en Tabla 5, la frecuencia de falla de diseño se verá aumentada en un rango entre 4.5 y 26.3 veces, lo cual es inaceptable ingenierilmente. En otras palabras, obras diseñadas con los valores actualmente aceptados fallarán entre 4.5 y 26.3 veces más que lo proyectado. Por lo anterior, es necesario investigar en mayor profundidad las razones que llevan a semejante subestimación en el caso de Concepción, y sobre todo, averiguar si está ocurriendo lo mismo en el resto del país. Esto es lo que intentamos hacer en un trabajo acompañante (Meier *et al.*, 2013).

#### 4. CONCLUSIONES

Utilizando todas las tormentas en los 24 años de registros pluviográficos de la Estación Bellavista, de los cuales 19 corresponden a pluviogramas diarios, se obtuvieron los valores IDF para Concepción. Con el objetivo de estimar mejor para períodos de retorno bajos y series cortas, y para conocer las intensidades asociadas a los tiempos reales de recurrencia, se utilizó el enfoque de duración parcial, a la par con el tradicional muestreo de máximos anuales. No se observaron grandes diferencias al comparar los valores obtenidos mediante ambos métodos.

Los supuestos de la metodología generalizada de Varas y Sánchez (1984) se cumplen bien: los coeficientes de duración son independientes del período de retorno, mientras que los coeficientes de frecuencia son independientes de la duración. El valor de K, razón entre la lluvia máxima en 24 horas y aquella sobre un día meteorológico, fluctúa entre 1.14 y 1.19, siendo mayor que el valor de 1.1 recomendado por Varas y Sánchez (1984), o de 1.03 preconizado en LEN (2002).

Nuestras estimaciones son similares a las de Celis (1984), Ruiz (2000), y Pizarro *et al.* (2013) para Bellavista (exceptuando  $d = 1$  h), pero ampliamente mayores que las de Varas y Sánchez (1984), LEN (2002), y Pizarro *et al.* (2013) para Carriel Sur. El caso de LEN (2002) podría ser crítico, ya que es la referencia más usada en Chile para diseño hidrológico e hidráulico. El sesgo alcanza hasta un 44%, lo que equivale a decir que en Concepción, si se calcula una obra con los valores de LEN (2002) para  $d = 1$  h y  $T = 100$  años, en los hechos fallará en promedio una vez cada 3.8 años, es decir, sufrirá una frecuencia de falla 26.3 veces mayor a la de diseño.

El sesgo negativo se transfiere a las duraciones menores a 1 h, ya que en la práctica nacional se usa la intensidad sobre 1 h para normalizar, aplicando luego coeficientes de duración tipo Bell-Espíldora (Bell, 1969; Espíldora, 1971). Como el caudal de diseño se suele obtener con la Fórmula Racional, que tiene la intensidad con exponente unitario, los errores se traspasarán íntegros a la estimación de los caudales de diseño, resultando en diseños subdimensionados.

Basado en las discrepancias observadas en Concepción, se propone que la metodología usada en LEN (2002) para estimar valores IDF tendría un sesgo importante, que resulta en una subestimación de los diseños, y podría ser la causa de que tantos sistemas de evacuación de aguas lluvia colapsen cada vez que tenemos precipitaciones apreciables. En un trabajo acompañante (Meier *et al.*, 2013), se investiga en detalle las posibles causas que explicarían esta fuerte subestimación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Freddy Echeverría, Dante Figueroa, y Alberto Foppiano, del Depto. de Física de la Atmósfera y del Océano de la Universidad de Concepción, por haber facilitado los pluviogramas que permitieron elaborar este trabajo. Francisco Romero ayudó en algunos de los análisis.

## REFERENCIAS

ASCE, 1996. *Hydrology Handbook*, 2nd Edition. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 28. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Bell, F.C. 1969. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 95(HY1): 311-327.

Buishand, T.A., 1990. Bias and variance of quantile estimates from a partial duration series. *Journal of Hydrology*, 120(1/4): 35-49.

Celis, L., 1984. *Determinación de las curvas intensidad-duración-frecuencia de las precipitaciones en la intercomuna Concepción-Talcahuano*. Memoria de Título, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Eagleson, P.S. 1970. *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New York.

Espíldora, B. 1971. *Estimación de curvas intensidad-duración-frecuencia mediante coeficientes generalizados*. 1er Coloquio Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago.

Félix, C., 2010. How precisely can precipitation be measured with raingauges? FOKO 2010 [http://www.meteosuisse.admin.ch/web/en/research/events/archive/foko\\_2010\\_2.Par.0005.DownloadFile.tmp/1felix.pdf](http://www.meteosuisse.admin.ch/web/en/research/events/archive/foko_2010_2.Par.0005.DownloadFile.tmp/1felix.pdf)

Klemeš, V. 1987. Hydrological and engineering relevance of flood frequency analysis. In: V.P. Singh (ed.), *Hydrologic Frequency Modeling*, pp. 1-18. D. Reidel, Dordrecht.

LEN asociados. 2002. *Manual de Carreteras*, Vol. 2 y 3. Ministerio de Obras Públicas, Santiago.

- Leroy, M. 1999. *Classification d'un site*. Note Technique No 35. Météo France.
- Molini, A., L.G. Lanza, and P. La Barbera, 2005. The impact of tipping-bucket raingauge measurement errors on design rainfall for urban-scale applications. *Hydrological Processes* 19(5), 1073-1088.
- Meier, C., X. Soto, M. Cid, C. González, y A. Burboa, 2013. *Subestimación de los valores IDF en Concepción. 2: Posibles causas del sesgo*. Memorias del XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Concepción (este volumen).
- Pizarro, R., C. Sangüesa, P. Bjarne, B. Ingram, M. Vera, C. Vallejos, C. Morales, C. Olivares, F. Balocchi, R. Fuentes, R. Mendoza, A. Abarza, y R. Valdés. 2013. *Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las Regiones Metropolitana, del Maule y del Biobío: Intensidades desde 15 Minutos a 24 Horas*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°29, UNESCO.
- Pranzini, G., y C. Meier, 2001. *Distribución de la precipitación anual en Concepción derivada de las características de la secuencia de tormentas*. Memorias del XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Concepción.
- Ruiz, R., 2000. *Análisis crítico del empleo de la fórmula racional en el cálculo de sistemas de evacuación de aguas lluvias en proyectos urbanos y su efecto sobre la capacidad vial*. Memoria de Título, Depto. Ingeniería Civil, Universidad del Biobío, Concepción.
- Slack, J.R., J.R. Wallis, and N.C. Matalas. 1975. On the value of information to flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 11(5): 629-647.
- Soto, X. 2004. *Comparación de metodologías para estimar las curvas IDF en Concepción*. Memoria de Título, Memoria de Título, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.
- Varas, E., y S. Sánchez. 1984. Curvas generalizadas de intensidad-duración-frecuencia de lluvias. *Apuntes de Ingeniería*, 14:73-90. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- WMO-CIMO, 1998. *WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization Publication No. 8 (2008 edition), Genève, Switzerland.