

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXI CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

SUBESTIMACIÓN DE LOS VALORES IDF EN CONCEPCIÓN. 2: POSIBLES CAUSAS DEL SESGO

CLAUDIO MEIER V.¹
XIMENA SOTO C.²
MARCELO CID C.³
CRISTIAN GONZÁLEZ G.³
ANDRÉS BURBOA L.³

RESUMEN

En un trabajo anterior, Soto y Meier (2013) encontraron que los valores IDF de diseño propuestos para Concepción por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) tienen un fuerte sesgo negativo para las duraciones más cortas. De ese estudio surge una pregunta crucial: ¿la subestimación se debe a razones netamente locales, o bien queda explicada por argumentos metodológicos, implicando entonces que podríamos tener un problema a escala nacional?

Tras revisar las posibles fuentes de error sistemático para duraciones cortas, se analiza aquellas dos que se consideran las candidatas más serias para explicar la subestimación: (i) el hecho de haber discretizado los pluviogramas en horas “reloj”, en vez de usar tiempo continuo al buscar las lluvias máximas, y (ii) el haber considerado sólo pocas tormentas por año, las 4 o 5 con mayor altura caída, siendo que las intensidades extremas para duraciones cortas tienden a ocurrir durante frentes fríos, que son más intensos aunque tengan menor precipitación total.

En tres localidades suizas, se encontró que para la duración de 1 h, la discretización en horas reloj causa una subestimación entre 20 y 25%, para $T \geq 10$ años. A su vez, el considerar sólo cuatro tormentas al muestrear, en Concepción, resulta en un sesgo entre -18 y -27%, para todas las duraciones menores a 2 h y $T \geq 5$ años. Sumados, estos dos efectos metodológicos explicarían la totalidad de la subestimación notada en Concepción. Se concluye que los valores IDF usados en Chile para diseñar podrían tener serios problemas metodológicos, que debieran causar una subestimación generalizada en todo el país, un problema que es necesario abordar a la brevedad.

¹ Profesor Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - cmeier@udec.cl

² Ingeniero Civil, Universidad de Concepción – xsotocaceres@gmail.com

³ Estudiantes 6° año Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

1. INTRODUCCIÓN

En un trabajo acompañante, Soto y Meier (2013) derivaron valores IDF para Concepción con 24 años de registros pluviográficos disponibles en la Estación Bellavista, de los cuales 19 correspondían a pluviogramas diarios. 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, usaron el enfoque de duración parcial, a la par con el muestreo de máximos anuales.

No observaron grandes diferencias al comparar los valores obtenidos a partir de una serie de duración parcial con aquellos obtenidos del análisis de máximos anuales, aplicando una equivalencia basada en asumir que las llegadas de tormentas se distribuyen Poisson. Los valores IDF obtenidos por Meier y Soto (2013) fueron similares o levemente menores a los propuestos por Celis (1984) y Ruiz (2000), quienes trabajaron con metodologías distintas (máximos anuales en vez de duración parcial y distribuciones diferentes), pero con los datos de la misma estación, Bellavista (aunque para períodos distintos, pero con traslape). Pizarro *et al.* (2013) también publican valores IDF para la Estación Bellavista, pero sin indicar el período de registro utilizado, ni dar detalles de la metodología utilizada. Sus valores son similares a los de Soto y Meier (2013), exceptuando para la duración de 1 h, en que obtienen intensidades bastante menores.

Sin embargo, los valores IDF de Soto y Meier (2013) resultaron ser vastamente mayores que los de Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002), usados típicamente para diseño por la comunidad ingenieril, que usan igual metodología. El último caso podría ser más crítico, ya que LEN (2002) corresponde a un manual de referencia, ampliamente usado en Chile para diseño hidrológico e hidráulico. La subestimación alcanza a un 44% en el peor de los casos, pero queda más clara si se expresa como un aumento en la frecuencia real de falla, con respecto a la de diseño: En Concepción, si se diseñara una obra para la lluvia sobre 1 h con período de retorno 100 años usando LEN (2002), fallaría en promedio una vez cada 3.8 años según Soto y Meier (2013), es decir, sufriría una frecuencia de falla 26.3 veces mayor a la de diseño.

Por otra parte, Pizarro *et al.* (2013) ofrecen también valores IDF para la Estación Carriel Sur, los cuales están entre los propuestos por LEN (2002) y los de Varas y Sánchez (1984), con excepción de la duración 1 hora, en que son mayores, aunque de todas maneras notoriamente inferiores a los de Soto y Meier (2013).

Al usar los valores IDF de Varas y Sánchez (1984), LEN (2002), y Pizarro *et al.* (2013) para Carriel Sur, el sesgo negativo se transferiría a todas las duraciones menores a 1 hora, ya que en la práctica nacional se usa la intensidad sobre 1 hora para normalizar, aplicando luego coeficientes de duración tipo Bell-Espíldora (Bell, 1969; Espíldora, 1971). Además, en la mayoría de los casos en Chile, el caudal de diseño se obtendría con la Fórmula Racional de Mulvaney, que tiene la intensidad con exponente unitario, por lo que cualquier error en la intensidad se traspasaría íntegramente a la estimación de los caudales, resultando en diseños subdimensionados.

Un aspecto fundamental a dilucidar, es comprender si la fuerte subestimación observada en Concepción se debe a condiciones netamente locales, que no ocurrirían en otros lugares del país, o bien es causada por problemas metodológicos. En efecto, si se tratase de lo segundo, entonces los valores IDF estarían probablemente subestimados en forma sistemática, a lo largo de todo

Chile. Ésta podría ser la causa subyacente de que tantos sistemas de evacuación de aguas lluvia colapsen cada vez que tenemos precipitaciones apreciables, como podemos apreciar año tras año.

El objetivo del presente trabajo es investigar en detalle, si posible cuantitativamente, las distintas causas que podrían explicar la fuerte subestimación de las lluvias de diseño propuestas por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) en Concepción, según detectaron Soto y Meier (2013) en su detallada descripción de los valores IDF.

2. POSIBLES EXPLICACIONES

Las razones por las cuales los valores IDF de Varas y Sánchez (1984), LEN (2002) y Pizarro *et al.* (2013) - para Carriel Sur - son mucho menores que los de Soto y Meier (2013), y también que los de Celis (1984) y Ruiz (2000), pueden ser múltiples. A continuación, comentamos cada una de las posibilidades.

Uso de Duración Parcial en Vez de Máximos Anuales

Soto y Meier (2013) han sido los únicos autores que han usado el enfoque de duración parcial para estimar los valores IDF en Concepción, por lo que se podría plantear que ésta es la razón metodológica por la cual ellos obtienen mayores valores. Sin embargo, dos líneas de evidencia independientes muestran que esto no tiene un efecto apreciable:

- (i) Celis (1984) y Ruiz (2000), usando los mismos datos que Soto y Meier (2013) usaron máximos anuales y metodologías de análisis de frecuencia que son mucho más parecidas a las de Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002), sin embargo obtuvieron valores IDF que son aún mayores que los de Soto y Meier (2013); podría argumentarse que Celis (1984) trabajó en base a un registro mucho más corto, pero tal noción no aplica en el caso de Ruiz (2000). Por otra parte, Pizarro *et al.* (2013), usando también los datos de Bellavista con un enfoque de máximos anuales y la distribución Gumbel, obtuvo valores IDF similares a los de Soto y Meier (2013), exceptuando para la duración de 1 hora.
- (ii) En su Tabla 4, Soto y Meier (2013) comparan valores IDF obtenidos independientemente con series de duración parcial y con máximos anuales; para lograrlo, aumentan los períodos de retorno de los valores obtenidos por máximos anuales, de modo de hacerlos equivalentes con los obtenidos por duración parcial, según su Ecuación (1). En esta comparación, los valores obtenidos con máximos anuales fueron muy similares, o incluso levemente mayores que aquellos obtenidos con duración parcial, para todos los períodos de retorno.

En los hechos, ambas líneas de evidencia indican que el usar duración parcial redundaría en menores valores IDF, un efecto que es contrario al que estamos tratando de explicar.

Distinta Definición de “Período de Retorno”

Al utilizar un enfoque de duración parcial cuando se selecciona la muestra de eventos a analizar probabilísticamente, se obtienen las intensidades asociadas a un período de retorno T_p , el cual tiene una definición distinta que la del período de retorno T_a , asociado a análisis basados en series de máximos anuales. Como la definición de T_p es en realidad la que corresponde al espíritu del concepto de período de retorno (“tiempo promedio que transcurre entre ocurrencias

sucesivas de un evento”), y además las series de duración parcial tienen ventajas desde el punto de vista de su análisis probabilístico, Soto y Meier (2013) prefirieron trabajar con este concepto. Por ello, los valores IDF obtenidos por duración parcial asociados a un cierto período de retorno T, digamos 2 años, tienen que ser teóricamente mayores, a demás condiciones iguales, que aquellos obtenidos por máximos anuales.

Esto no es siempre el caso en la práctica, sin embargo, debido a las diferencias introducidas al ajustar la distribución de probabilidades: En efecto, las series de máximos anuales siempre contienen el mayor valor de un listado de duración parcial *rankeado* de mayor a menor, así como varios de los que vienen a continuación. Por otra parte, la serie de máximos anuales, al obligarse a muestrear un evento por año, aunque se trate de años en que no haya habido eventos realmente extremos, también contendrá al menos algunos valores realmente bajos. Así, aunque se tenga que cada valor de una serie de duración parcial sea igual o mayor que el correspondiente valor en la serie de máximos anuales (lo que es clarísimo al comparar una serie de excedencias anuales con la correspondiente serie de máximos anuales), esta última típicamente tendrá una mayor desviación estándar, lo que puede resultar en cuantiles mayores para períodos de retorno apreciables, si el efecto de la mayor desviación supera al de una media levemente menor.

Para obviar esta diferencia, Soto y Meier (2013) mostraron que es posible efectuar una equivalencia entre ambos tipos de período de retorno, bajo el supuesto de eventos tipo Poisson. Además, el efecto de usar duración parcial es más fuerte para períodos de retorno bajo: ambas definiciones convergen al aumentar T (o sea, al tener eventos más extremos), ya que disminuye la probabilidad de tener múltiples eventos en un mismo año. Esto queda graficado en la siguiente tabla, que entrega los valores para la Ecuación (1) dada en Soto y Meier (2013):

Tabla 1. Equivalencia entre períodos de retorno para series de duración parcial (T_p) y series de máximos anuales (T_a), al asumir un proceso Poisson.

T_a (años)	T_p (años)
1.5	0.9
2	1.4
3	2.5
5	4.5
10	9.5
25	24.5
50	49.5
100	99.5

Según lo anterior, el trabajar con definiciones distintas de período de retorno no explica las fuertes diferencias entre Meier y Soto (2013) y LEN (2002), sobre todo considerando que éstas son mayores a mayor período de retorno, un comportamiento inverso al esperado.

Diferencias entre Estaciones o Problemas con los Pluviógrafos

Una tercera alternativa plausible guarda relación con las ubicaciones de las estaciones y los instrumentos. En efecto, podría tenerse que Carriel Sur subestima, o bien Bellavista sobreestima, o bien que ocurre una combinación de ambas cosas, ya sea por su ubicación o por razones instrumentales. Si ello fuera el caso, entonces quedaría explicado por qué Celis (1984), Ruiz

(2000) y Soto y Meier (2013), quienes usaron Bellavista, tienen valores mucho más altos, como grupo, que Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002), que trabajaron con Carriel Sur.

Apoyan esta tesis dos conclusiones del trabajo de Pizarro *et al.* (2013): (i) sus valores IDF para Carriel Sur son muy similares a los de Varas y Sánchez (1984) y de LEN (2002), exceptuando para $d = 1$ h; y (ii) obtienen valores IDF bastante mayores para Bellavista que para Carriel Sur. Sin embargo, no se sabe si sus curvas para Bellavista se basan en los pluviogramas crudos, o en datos ya procesados; la duda surge porque los rollos originales se perdieron (ver Capítulo 3).

La única evidencia disponible para dilucidar este posible efecto dista mucho de ser la mejor, pero sugiere que no hay diferencias apreciables entre las estaciones, que distan sólo 2.8 km la una de la otra. En efecto, se dispone de las lluvias diarias máximas anuales para ambos lugares, para un período coincidente de 24 años, desde 1975 a 1998. Los valores se entregan en la Tabla 2, junto con su media, desviación estándar, y la precipitación diaria máxima con período de retorno 10 años, P_D^{10} , obtenida de un análisis de frecuencia ocupando la distribución Gumbel.

Tabla 2. Precipitaciones diarias máximas anuales para las estaciones Bellavista y Carriel Sur, Concepción, 1975-1998 (en mm).

	Bellavista	Carriel Sur
1975	78,2	65,7
1976	43,6	42,8
1977	66,5	61,6
1978	115,7	101,2
1979	82,1	64,1
1980	75,3	58,5
1981	115,2	92,8
1982	60	63
1983	82,4	66,8
1984	94,9	91
1985	58,4	45,7
1986	148,9	161
1987	77	85,7
1988	109,8	124,4
1989	97,7	89,6
1990	74	94,6
1991	76,4	77,8
1992	100,1	104,4
1993	66,6	57,6
1994	66,4	62,8
1995	62,2	64,7
1996	61	64,6
1997	171,7	148,7
1998	44,1	32,8
media	84,5	80,1
desviación	30,8	31,4
P_D^{10}	124,7	121,7

Si bien la media es mayor para Bellavista, estadísticamente, considerando el tamaño de la muestra, ni la media, ni la desviación, ni P_D^{10} tienen diferencias significativas entre sí.

Efectos de Usar una Serie de Tiempo Distinta

Una cuarta explicación razonable radica en el hecho que distintos autores usaron períodos diferentes, tal como se mostró en la Tabla 5 de Soto y Meier (2013). En particular, Varas y Sánchez usaron 17 años de datos de Carriel Sur, obtenidos del período 1961 - 1981, mientras que LEN (2002), con una metodología idéntica, ocupó 33 años de datos de la misma estación, casi el doble, que inician también en 1961 pero llegan hasta 1999. Puesto que LEN (2002) encuentra valores consistentemente menores que Varas y Sánchez (1984), para todas las duraciones menores a 4 h y para todos los períodos de retorno, se deduce que el período 1982 a 1999 tendría que haber sido más “seco”, esto es, debió tener eventos que fueron en general menores, para las duraciones cortas, que los del período 1961-1981, que debió haber sido “húmedo”.

Por otra parte, Soto y Meier (2013) trabajaron con 24 años de datos entre 1974 y 1998, período que se traslapa mucho más con el supuesto período “seco” de 1982 a 1999 que con el “húmedo” de 1961 a 1981. A pesar de ello, obtuvieron valores IDF muy superiores a los de LEN (2002), por lo que se plantea que ésta no es una explicación para las diferencias.

Discretización Temporal de Pluviogramas

Como se graficó en la Figura 1. de Soto y Meier (2013), es muy difícil sino imposible extraer información pluviográfica desde los pluviogramas semanales, para las duraciones más cortas, aunque recientemente, el grupo de la Universidad de Talca liderado por el Prof. Roberto Pizarro ha logrado grandes avances en este sentido, utilizando un lector o *scanner* para leer los pluviogramas (Pizarro *et al.*, 2013). Enfrentados a la sola disponibilidad de rollos semanales, Varas y Sánchez (1984) decidieron discretizar (totalizar) los pluviogramas de las tormentas analizadas, anotando la lluvia acumulada en cada hora “reloj”. Luego, en vez de encontrar “la hora en que más llovió”, con su correspondiente altura caída, determinaron la “hora reloj en que más llovió”, con su intensidad asociada, y así sucesivamente para otras duraciones.

Este procedimiento sólo puede introducir sesgo negativo en los valores de precipitación máxima. Por ejemplo, supongamos que durante una cierta tormenta se tiene que la hora con mayor altura caída fuese desde las 9:23:35 a las 10:23:35. Al discretizar en horas reloj, sólo conoceremos las intensidades medias entre las 9:00:00 y las 10:00:00, y entre las 10:00:00 y las 11:00:00; las compararemos quedándonos con la mayor de las dos, la que será de todas formas menor que la intensidad máxima real, obtenida en tiempo continuo.

Además, la subestimación introducida por esta discretización debiera ser mayor para la duración más corta (1 h), disminuyendo para duraciones mayores, a medida que el traslape entre el “período real en que más llueve” y el “período reloj en que más llueve” se hace cada vez mayor, estadísticamente hablando. Como este efecto sólo puede resultar en subestimación, y es consistente con el hallazgo de Soto y Meier (2013) que el sesgo disminuye con la duración, fue analizado detalladamente, como se describe en el siguiente capítulo.

Efecto de Considerar Pocas Tormentas

Para no analizar cientos de tormentas en cada una de las ubicaciones estudiadas, Varas y Sánchez (1984) se enfocaron sólo en “las 4 o 5 más intensas de cada año”, lo que parece indicar que trabajaron con los 4 o 5 eventos con mayor altura acumulada, en cada año. Este procedimiento

también debiera introducir un sesgo negativo al estimar lluvias máximas para las duraciones más cortas, ya que se puede perfectamente tener que las intensidades máximas ocurran en eventos de menor duración pero a la vez más intensos, que no acumulen tanta precipitación total.

En los hechos, en Chile central, las tormentas más largas con mayor precipitación total corresponden normalmente a frentes cálidos, en los que pueden precipitar varios cientos de milímetros sobre decenas de horas o incluso días, pero con intensidades relativamente débiles, que cubren amplias áreas. Por otra parte, las intensidades mayores para las duraciones intermedias, de pocas horas, están asociadas a frentes fríos, con tasas más rápidas de ascenso del aire húmedo. Estos eventos duran menos, cubren un área geográfica más pequeña y tienen menores alturas totales que los frentes cálidos. Finalmente, las precipitaciones extremas sobre las duraciones más cortas son típicamente causadas por eventos convectivos o por frentes fríos intensos. Tales eventos no tienen por qué tener una precipitación total alta, aunque pueden ser muy intensos a ratos. Por ende, hay incluso razones geofísicas para explicar por qué el no considerar todas las tormentas debiera subestimar las precipitaciones máximas sobre las duraciones intermedias y más cortas.

Al igual que en el caso anterior, este efecto sólo puede redundar en sesgo negativo, el cual debiera disminuir con la duración, tal como observaron Soto y Meier (2013). Por ello, también fue considerado como un candidato serio para explicar la subestimación observada, analizándose en mayor profundidad.

3. METODOLOGÍA

La forma más simple y elegante de comprobar si las fuertes diferencias entre Soto y Meier (2013) y LEN (2002) se deben a razones metodológicas, sería aplicando exactamente la misma metodología utilizada por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) a los datos usados en los análisis de Soto y Meier (2013), y luego comparar resultados. Lamentablemente, según se nos manifestó en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, la totalidad de los pluviogramas para la Estación Bellavista se perdieron hace varios años, y tampoco están disponibles los *scans* que se hicieron de ellos, por lo que no es posible efectuar tal comparación *ceteris paribus* de las metodologías. Es triste pensar que se perdieron los registros de la única estación en Chile que midió con pluviogramas diarios, pero es un fiel reflejo de la poca importancia que le damos, como país, a disponer de información hidrometeorológica de calidad.

A continuación se explica los procedimientos utilizados para comprobar los efectos que tienen la discretización temporal de los pluviogramas y el considerar pocas tormentas, sobre los valores IDF. De entre todas las posibilidades mencionadas anteriormente, éstas son las dos candidatas más serias para explicar la subestimación de las lluvias extremas, ya que teóricamente ambas debieran causar los mismos dos efectos observados en Concepción: Un sesgo negativo que aumenta para las duraciones más cortas.

Discretización en Horas Reloj

Como no existe otra ubicación conocida en Chile que disponga de una buena serie con datos pluviográficos diarios, que permitan realmente discriminar las lluvias extremas sobre duraciones cortas, se trabajó con datos proporcionadas por el Servicio Meteorológico Suizo (Meteoswiss),

correspondientes a tres estaciones de la mejor calidad (Ginebra, Lugano y Napf), cada una con 32 años de datos de precipitación, con paso de muestreo 10 minutos.

Se determinó las precipitaciones máximas sobre duraciones de 1, 2, 3 y 4 horas, y períodos de retorno entre 5 y 100 años, para cada una de estas tres ubicaciones, utilizando la metodología de Soto y Meier (2013): obtención de series de duración parcial muestreando un promedio de 4 valores por año (en series de 32 años se muestrearon en cada caso las 128 precipitaciones máximas), y análisis de frecuencia con la distribución Gamma de tres parámetros. Los valores obtenidos de este análisis se consideraron como los correctos, si bien esto no es del todo cierto: Al tratarse de datos totalizados cada 10 minutos “reloj”, ya se introduce un sesgo negativo que no es posible cuantificar exactamente, mientras no se disponga de datos realmente continuos.

Para determinar el efecto de la discretización, los datos originales fueron integrados sobre tres ventanas de tiempo distintas, repitiéndose luego todos los análisis con la misma metodología. Como se trataba originalmente de datos cada 10 minutos reloj (o sea, precipitación entre las 13:20 y las 13:30, y entre las 13:30 y las 13:40, y entre las 13:40 y las 13:50, etc.), se generaron nuevas series de datos totalizados cada 20 minutos reloj (lluvia entre las 13:20 y las 13:40, y entre las 13:40 y las 14:00, etc.), cada 30 minutos reloj (lluvia entre las 13:30 y las 14:00, y entre las 14: y las 14:30), y finalmente cada 60 minutos o una hora reloj (cuánto llovió entre las 13:00 y las 14:00, y entre las 14:00 y las 15:00, etc.). Es importante notar dos cosas: (i) al totalizar sobre 20, 30 y 60 minutos, no se desplazó la ventana de tiempo cada 10 minutos, según el paso temporal original de los datos, sino que se fue integrando sobre ventanas de “tiempo reloj”, sin traslape, tal como se indica en los ejemplos entre paréntesis; (ii) el último caso, la ventana de 1 hora en “tiempo reloj” corresponde exactamente a la metodología aplicada por Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002) a los rollos semanales de las estaciones con las que trabajaron.

Para tener algún tipo de comparación con Concepción, se hizo un análisis paralelo en el que se analizó evento por evento la subestimación de las precipitaciones extremas al totalizar sobre ventanas de “tiempo reloj”. En este caso, para Concepción se contó con un grupo de 18 tormentas acaecidas en el año 2000 y entre el 2009 y el 2012, medidas en tres pluviógrafos distintos. Para cada tormenta se extrajo la altura máxima para duraciones de 1, 2, 3 y 4 horas, obtenida en tiempo “continuo” (según fuese el instrumento, los plazos de totalización eran de 1 o bien de 5 minutos), y se comparó con aquella extraída de la serie integrada cada 20, 30 y 60 minutos, en “tiempo reloj”. Luego se aplicó el mismo procedimiento a cada una de las tres ubicaciones en Suiza y se compararon los resultados.

Efecto de Considerar Menos Tormentas

En este caso se dispuso de las planillas originales del trabajo de Soto (2004), en que se extrajo las alturas máximas, en tiempo continuo, para cada una de las tormentas ocurridas en Concepción sobre un período de 24 años (ver detalles en Soto y Meier, 2013, y en Soto, 2004). Para cada uno de los años, se ordenaron los eventos de precipitación por su altura total, de mayor a menor, y luego se hicieron cinco series distintas: la primera considerando todas las tormentas (como Soto y Meier, 2013), la segunda incluyendo las 10 tormentas con mayor altura caída, la tercera con las 8 tormentas con mayor lámina total, la cuarta con los 6 eventos con mayor precipitación, y la quinta sólo con las 4 tormentas con mayor altura total. Notar que Varas y Sánchez (1984) mencionan haber analizado sólo las 4 o 5 tormentas “más intensas” de cada año;

interpretamos esto como los 4 o 5 eventos con mayor altura caída total, puesto que no podían saber a priori las intensidades máximas para duraciones menores, sin analizar primero todas y cada una de las tormentas.

Así, se conformó cinco series de eventos: la primera con la totalidad de las tormentas (más de 550 en el caso de las duraciones menores o iguales a 1 h, y más de 750 para las duraciones mayores o iguales a 2 h), la segunda con 240 tormentas (las 10 más grandes de cada año, según la altura total, por 24 años), la tercera con 192 tormentas, la cuarta con 144 tormentas, y la última con 96 tormentas. Desde las planillas de Soto (2004), que contenían las precipitaciones máximas para cada duración entre 10 minutos y 24 horas, para cada tormenta ocurrida en Concepción, se extrajo luego las precipitaciones máximas para cada una de las cinco series de tormentas.

Las series resultantes de precipitaciones máximas, cinco de ellas para cada duración entre 10 min y 4 h, fueron submuestreadas con el enfoque de duración parcial, extrayéndose los 96 máximos valores. Luego se efectuó el análisis de frecuencia, usando siempre la distribución Gamma de 3 parámetros (que corresponde a una Gamma normal, de 2 parámetros, pero con su origen desfasado). Comparando las precipitaciones para las cuatro series con menos tormentas con la serie completa, para cada duración de interés, pudo cuantificarse el efecto de sólo considerar los N eventos ($N = 4, 6, 8, 10$) anuales con mayor altura caída, en vez de tomarlos todos en cuenta, como correspondería realmente hacer.

4. RESULTADOS

Discretización en “tiempo reloj”

La Tabla 3 entrega las alturas de lluvia máxima para duraciones de 1, 2, 3 y 4 horas, para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, en tres estaciones meteorológicas suizas, en Ginebra, Lugano, y Napf. Para cada combinación de duración, frecuencia y lugar, se entregan cuatro valores distintos: El primero corresponde a la precipitación máxima obtenida en “tiempo continuo”, que en este caso consiste en datos totalizados cada 10 min. Luego, se compara con los valores de lluvia obtenidos con datos totalizados cada 20 min, 30 min, y 60 min de “tiempo reloj”, indicándose al lado, entre paréntesis, el porcentaje de subestimación. En unos pocos casos se tiene sobrestimación al totalizar sobre períodos reloj más largos, por ejemplo, en Napf para las duraciones de 2 y 4 h, cuando se totaliza sobre 20 min en vez de hacerlo sobre datos “continuos”, esto es, totalizados sobre períodos reloj de 10 min.

A pesar de lo anterior, la tendencia es muy clara: se subestima notoriamente al obtener los valores IDF a partir de datos totalizados sobre períodos reloj crecientes, y en general el sesgo negativo aumenta al usar una ventana de integración cada vez mayor (Figura 1). También queda claro que hay un efecto del período de retorno; como muestra la Figura 2, para el caso de Ginebra, aumenta el porcentaje de subestimación a mayor T. Como era de esperarse teóricamente, la subestimación aumenta para las duraciones menores, como se muestra en la Figura 3. En las Figuras 1 a la 3, en los ejes de las ordenadas se grafican las razones entre valores IDF aproximados, obtenidos con datos totalizados, y los respectivos valores IDF “correctos”, obtenidos sobre tiempo “continuo” (esto es, totalizado cada 10 min).

Tabla 3. Precipitaciones máximas (en mm) en tres ciudades suizas, para duraciones de 1, 2, 3 y 4 h, y para períodos de retorno entre 5 y 100 años. Para cada combinación de lugar, duración y frecuencia, se entrega el valor para tiempo “continuo” (totalizado cada 10 minutos), así como los valores obtenidos para ventanas de tiempo “reloj” de 20, 30 y 60 minutos. En cada caso, entre paréntesis, se indica el porcentaje de subestimación con respecto a tiempo “continuo”. Porcentajes negativos indican sobrestimación de la precipitación máxima.

		Duración 1 h				Duración 2 h				Duración 3 h				Duración 4 h			
		10 min	20 min	30 min	60 min	10 min	20 min	30 min	60 min	10 min	20 min	30 min	60 min	10 min	20 min	30 min	60 min
Ginebra	T = 5	23.7	22.8 (3.6)	21.7 (8.2)	20.6 (13.1)	27.4	26.8 (2.0)	25.9 (5.5)	25.2 (7.7)	31.2	30.8 (1.3)	30.0 (3.6)	29.1 (6.5)	34.7	34.4 (0.7)	33.3 (4.0)	32.8 (5.3)
	T = 10	27.2	26.1 (4.3)	24.4 (10.4)	22.9 (15.9)	30.6	29.9 (2.5)	28.3 (7.5)	27.6 (10.1)	34.7	34.1 (1.6)	33.1 (4.6)	31.7 (8.6)	38.4	38.2 (0.7)	36.3 (5.5)	35.9 (6.7)
	T = 25	32.0	30.4 (5.1)	27.9 (12.9)	25.9 (19.1)	34.9	33.8 (3.1)	31.5 (9.9)	30.5 (12.7)	39.3	38.5 (2.0)	37.0 (5.8)	34.9 (11.2)	43.4	43.1 (0.7)	40.2 (7.3)	39.8 (8.4)
	T = 50	35.6	33.6 (5.6)	30.5 (14.4)	28.1 (21.2)	38.2	36.8 (3.5)	33.8 (11.4)	32.6 (14.5)	42.8	41.8 (2.3)	40.0 (6.6)	37.3 (12.9)	47.1	46.8 (0.7)	43.1 (8.6)	42.7 (9.5)
	T = 100	39.3	36.9 (6.0)	33.1 (15.8)	30.2 (23.0)	41.4	39.8 (3.8)	36.1 (12.8)	34.7 (16.1)	46.2	45.1 (2.5)	42.9 (7.3)	39.6 (14.4)	50.8	50.5 (0.7)	45.9 (9.7)	45.5 (10.4)
Lugano	T = 5	47.3	45.1 (4.6)	43.5 (7.9)	40.7 (14.0)	63.1	58.5 (7.3)	56.9 (9.9)	54.7 (13.3)	68.8	67.3 (2.2)	65.4 (5.0)	64.6 (6.1)	74.8	74.6 (0.3)	70.1 (6.3)	69.5 (7.1)
	T = 10	53.3	50.2 (5.8)	47.8 (10.3)	44.7 (16.2)	72.2	65.3 (9.5)	63.2 (12.5)	60.5 (16.2)	78.4	76.5 (2.3)	73.2 (6.6)	72.4 (7.6)	85.0	84.7 (0.4)	79.1 (7.0)	76.8 (9.6)
	T = 25	61.2	56.8 (7.2)	53.2 (13.1)	49.7 (18.8)	84.3	75.3 (10.7)	71.3 (15.4)	68.0 (19.3)	91.3	88.7 (2.9)	83.4 (8.7)	82.7 (9.4)	98.5	98.0 (0.5)	91.0 (7.7)	86.3 (12.4)
	T = 50	67.2	61.7 (8.1)	57.2 (14.8)	53.3 (20.6)	93.5	82.5 (11.8)	77.3 (17.3)	73.5 (21.3)	101.2	97.9 (3.3)	91.1 (10.0)	90.5 (10.6)	108.8	108.1 (0.6)	100.0 (8.1)	93.3 (14.2)
	T = 100	73.1	66.6 (8.9)	61.1 (16.4)	56.9 (22.2)	102.7	89.6 (12.7)	83.3 (18.9)	79.0 (23.0)	111.2	107.2 (3.6)	98.7 (11.2)	98.2 (11.7)	119.1	118.3 (0.7)	109.0 (8.5)	100.2 (15.8)
Napf	T = 5	31.6	34.9 (-10.6)	32.1 (-1.8)	28.1 (11.1)	36.8	35.9 (2.4)	35.8 (2.7)	35.2 (4.3)	42.3	37.0 (12.7)	38.0 (10.4)	38.5 (9.1)	44.7	44.8 (-0.2)	44.2 (1.2)	41.2 (7.9)
	T = 10	36.6	41.4 (-12.9)	36.9 (-0.7)	31.7 (13.5)	42.3	41.3 (2.3)	40.3 (4.8)	39.4 (6.8)	48.4	41.6 (14.0)	42.9 (11.4)	42.9 (11.3)	50.6	50.8 (-0.4)	50.1 (1.2)	45.3 (10.6)
	T = 25	43.4	50.0 (-15.3)	43.1 (0.6)	36.6 (16.2)	49.6	48.5 (2.2)	46.1 (7.1)	44.8 (9.6)	56.4	47.8 (15.4)	49.5 (12.3)	48.6 (13.9)	58.5	58.9 (-0.5)	57.9 (1.1)	50.5 (13.8)
	T = 50	48.5	56.6 (-16.8)	47.8 (1.4)	39.8 (17.9)	55.2	54.1 (2.0)	50.4 (8.6)	48.9 (11.5)	62.5	52.4 (16.1)	54.4 (12.9)	52.8 (15.5)	64.5	64.9 (-0.6)	63.8 (1.1)	54.3 (15.8)
	T = 100	53.6	63.3 (-18.1)	52.5 (2.1)	43.2 (19.4)	60.8	59.6 (1.9)	54.8 (9.9)	52.8 (13.0)	68.6	57.1 (16.8)	59.4 (13.4)	57.1 (16.8)	70.5	71.0 (-0.7)	69.7 (1.1)	58.1 (17.6)

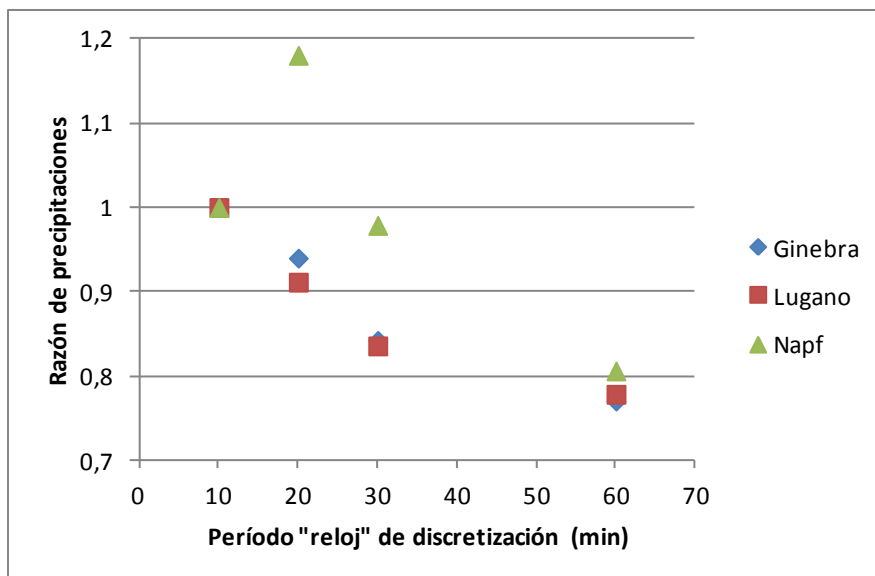


Figura 1. Efecto de considerar ventanas crecientes de totalización para los datos de lluvia, al calcular valores IDF para $d = 1$ h y $T = 100$ años en tres ciudades suizas. La razón de precipitaciones en ordenadas corresponde a la razón entre los valores IDF calculados con datos totalizados y aquellos “correctos”, obtenidos con datos integrados cada 10 minutos.

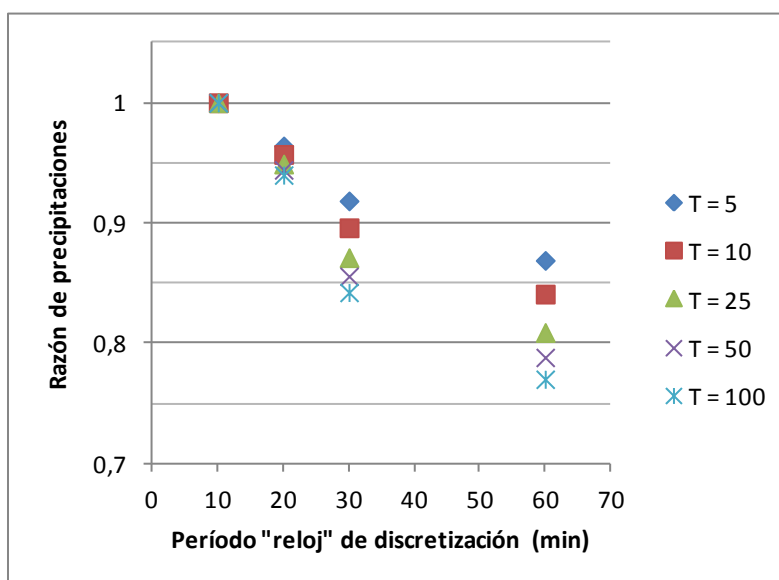


Figura 2. Efectos de considerar ventanas crecientes de totalización para los datos de lluvia, al calcular valores IDF para un rango de períodos de retorno, en Ginebra, para $d = 1$ h.

En la Tabla 3 y en la Figura 1 se observa que la subestimación al totalizar sobre un período de 1 h tiempo reloj, tal como hicieron Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002), fluctúa entre un 19.4 y un 23.0 %, según sea la ubicación en Suiza, para $T = 100$ años. Para períodos de retorno menores, pero típicamente usados en diseño, $10 \leq T \leq 50$ años, la subestimación por esta causa aún fluctúa entre 13.5 y 21.2 %, según sea la ubicación, como se muestra en la Figura 2. Aún para duraciones más largas, de hasta 4 h, el efecto de usar datos totalizados por hora reloj sigue siendo apreciable, con una subestimación que supera el 5% para todos los períodos de retorno.

Es importante destacar que la subestimación al usar datos totalizados es aún mayor que la que se indica acá, puesto que hemos normalizado todos los valores IDF con respecto a valores “correctos”, los cuales en los hechos fueron obtenidos a partir de datos que ya estaban totalizados cada 10 minutos. Es difícil estimar qué tan subestimados están tales valores IDF “correctos”, con respecto a los que se obtendría si se dispusiera de datos realmente continuos en el tiempo. Sin embargo, si uno extrapolara curvas imaginarias hacia $t \rightarrow 0$ en las gráficas de las Figuras 1 y 2, es fácil notar que su intercepto se ubicaría muy probablemente entre 1.05 y 1.10, para la mayoría de los casos. Ello sugiere que los valores IDF “correctos”, ya están subestimados aproximadamente entre un 5 y un 10%, como primera aproximación.

En resumen, según este análisis en tres localidades suizas distintas, el efecto de utilizar datos pluviográficos totalizados sobre horas reloj es similar y apreciable, para cualquier período de retorno y duración, pero se hace significativo para duraciones menores y períodos de retorno mayores. Para $d = 1$ h y $T = 100$ años, la subestimación con respecto a usar datos de lluvia realmente continuos está entre un 25 y un 30%, como mínimo.

Se podría objetar el presente análisis, sobre la base de que el clima en Concepción, y en los demás lugares de Chile, es muy distinto al de Suiza. Para obtener conclusiones intentando controlar este factor, se hizo una aproximación paralela, en la cual se determinó la razón de precipitaciones, esto es, entre lluvia máxima “correcta” y lluvia máxima aproximada según tiempo reloj, para una serie de tormentas, analizando luego su comportamiento estadístico. La razón se calculó nuevamente para ventanas de tiempo de totalización de 20, 30 y 60 minutos, disponiendo de series de datos totalizados cada 10 minutos.

En el caso de cada una de las localidades suizas, con 32 años de datos, se obtuvo la razón de precipitaciones para las 128 tormentas mayores, mientras que en Concepción, en que sólo se disponía de datos pluviográficos para el año 2000 y el período 2009-2012, se calculó para un total de 18 tormentas.

La Figura 3 muestra los resultados de este análisis, para las cuatro ubicaciones, para la duración de 1 h. Debe notarse que en este caso el período de retorno T no participa como variable, ya que la razón se calculó individualmente para cada tormenta, independientemente de su T . Luego, los valores de la razón de precipitaciones graficados son promedios sobre tormentas con diferente T . Lo interesante de este análisis, es que el comportamiento de la subestimación es similar en Concepción con respecto a las tres estaciones suizas: Tanto los rangos de subestimación como la forma de las curvas son muy similares, lo que sugiere que los valores obtenidos anteriormente para Suiza, en función del período de retorno de cada lluvia, deben a grandes rasgos ser aplicables al caso chileno, o al menos, al caso de Concepción.

También es interesante notar que la subestimación media, según este análisis alternativo, parece ser menor que la encontrada anteriormente al comparar valores IDF obtenidos probabilísticamente. Ello se debe simplemente al hecho que en las muestras (de 32 años para Suiza y 4½ años para Concepción), la enorme mayoría de las tormentas tiene períodos de retorno bajos, por lo que éstos están sobre-representados en el promedio. Lo que interesa de este análisis, por ende, no son los porcentajes de subestimación, que están sesgados hacia períodos de retorno bajos, sino el hecho que el comportamiento es muy parecido en las cuatro localidades estudiadas.

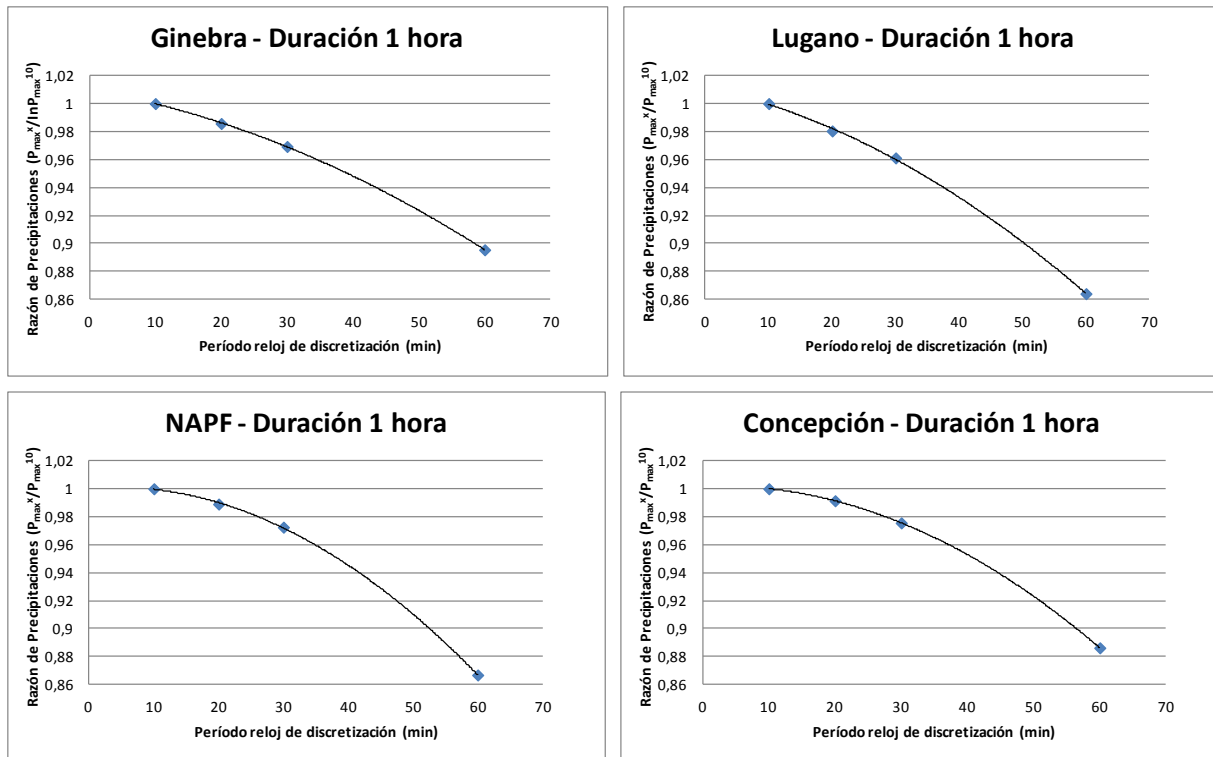


Figura 3. Razón de precipitaciones (razón entre las lluvias máximas extraídas de las tormentas con datos totalizados y aquellas “correctas”, obtenidas a partir de datos integrados cada 10 minutos) promedio, sobre todas las tormentas, como función de la ventana reloj de discretización, para las cuatro ubicaciones en estudio.

Cantidad de Tormentas Consideradas

La Tabla 4 entrega las razones de precipitación para Concepción, esto es, los cuocientes entre los valores IDF aproximados, obtenidos considerando sólo las 6 o las 4 tormentas principales de cada año (según altura total caída), y los valores IDF correctos, de Soto y Meier (2013), haciendo uso de toda la información disponible. Tal como se esperaba, el considerar sólo las 4 tormentas máximas anuales, simulando la metodología de Varas y Sánchez (1984) y de LEN (2002), resulta siempre en una subestimación significativa, que puede alcanzar hasta un 27 % para los períodos de interés típicamente de interés ($T \geq 5$ años). Sin embargo, no hay un comportamiento claro de este sesgo negativo en función de la duración considerada, ni tampoco del período de retorno.

Lo anterior se muestra claramente en la Figura 4, en la que se grafica la razón de precipitaciones al considerar sólo cuatro tormentas anuales en vez de todos los eventos, para el rango de duraciones entre 10 min y 4 h, para $T = 5, 25, y 100$ años. No se dispone de una explicación para el comportamiento fluctuante, pero es muy probable que se deba simplemente al análisis probabilístico. En efecto, puede observarse en la Tabla 4 que, para los períodos de retorno bajos (6 y 9 meses), que se ubican en el cuerpo de la distribución, la subestimación fluctúa de forma regular, disminuyendo con la duración tal como se esperaría teóricamente. Sin embargo, para los períodos de retorno de interés en diseño, que son los graficados en la Figura 4, se tiene un fuerte aumento de la subestimación al pasar de 10 a 20 min, luego una disminución entre 20 min y 2 h, y nuevamente un aumento al pasar a 4 h.

Tabla 4. Razones de precipitación cuando se estiman los valores IDF en Concepción considerando sólo las 6 o las 4 tormentas con mayor altura caída, por cada año de análisis (valores son las razones entre los valores IDF obtenidos muestreando desde menos tormentas, y los correspondientes estimados a partir de toda la información disponible).

	10 min		20 min		30 min		45 min		1 h		2 h		4 h	
	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.	6 ttas.	4 ttas.
T = 6 meses	0,683	0,630	0,708	0,653	0,692	0,656	0,775	0,677	0,827	0,723	0,830	0,734	0,879	0,785
T = 9 meses	0,748	0,708	0,775	0,706	0,739	0,706	0,810	0,727	0,868	0,782	0,856	0,789	0,912	0,852
T = 1 año	0,787	0,745	0,818	0,726	0,769	0,726	0,829	0,749	0,889	0,807	0,868	0,810	0,929	0,880
T = 5 años	0,933	0,838	0,985	0,754	0,880	0,759	0,884	0,790	0,941	0,846	0,897	0,824	0,986	0,929
T = 10 años	0,973	0,852	1,032	0,752	0,912	0,759	0,895	0,792	0,950	0,844	0,902	0,815	0,999	0,930
T = 25 años	1,014	0,861	1,082	0,744	0,943	0,755	0,907	0,791	0,956	0,837	0,905	0,799	1,012	0,924
T = 50 años	1,039	0,864	1,112	0,738	0,963	0,751	0,913	0,789	0,959	0,830	0,906	0,787	1,020	0,918
T = 100 años	1,059	0,865	1,138	0,732	0,979	0,747	0,913	0,782	0,960	0,823	0,907	0,775	1,026	0,910

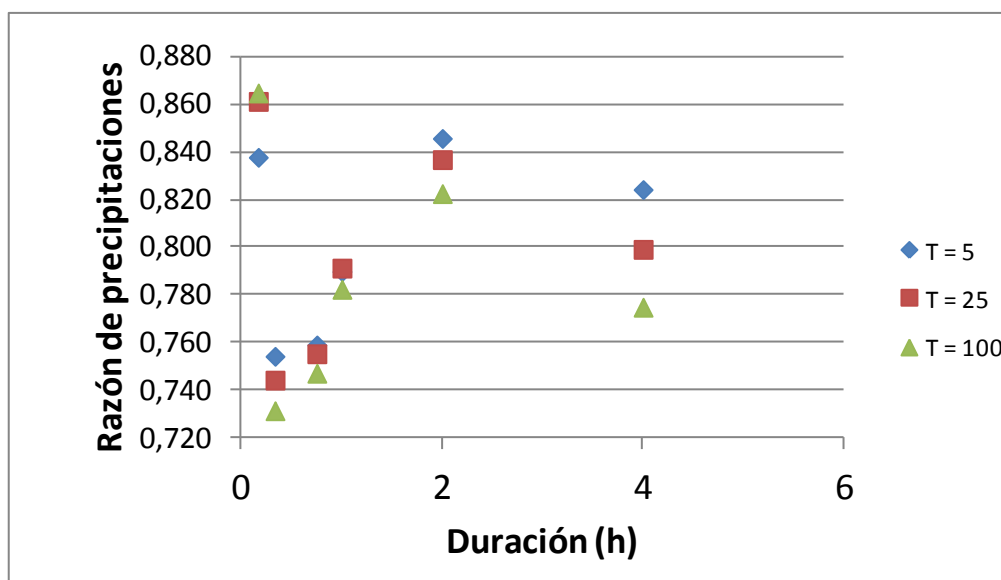


Figura 4. Razones de precipitación al considerar sólo las 4 tormentas principales de cada año, en vez de la totalidad de éstas, cuando se estiman los valores IDF en Concepción.

Lo importante de los datos mostrados en la Tabla 4 y Figura 4, es que muestran todos un sesgo significativo, a pesar del comportamiento un tanto errático que éste pueda tener.

5. CONCLUSIONES

Se analizaron todas las posibles causas que podrían explicar la fuerte subestimación de los valores IDF oficiales para Concepción, en comparación con aquellos derivados por Soto y Meier (2013). En particular, se cuantificaron los efectos de dos decisiones metodológicas en los trabajos de Varas y Sánchez (1984) y LEN (2002), las cuales teóricamente debieran resultar en subestimación que aumentase a menor duración, tal como se observó: el utilizar datos totalizados

en tiempo “reloj” cada una hora, y el haber considerado sólo las cuatro tormentas con mayor altura caída en cada año.

En tres estaciones suizas, el hecho de totalizar los pluviogramas en horas reloj introduce una subestimación entre un 15 y un 30% para las duraciones y períodos de retorno de interés, y hay evidencia indirecta de que este efecto debiera darse también en Concepción. Por otra parte, con los datos de Bellavista, el haber considerado sólo las cuatro tormentas principales dentro de cada año, en vez de muestrear todos los eventos, agrega un sesgo negativo que fluctúa entre un 10 y un 27%, para las duraciones y períodos de retorno de interés. Para $d = 1$ h y $T \geq 10$ años, ambos efectos compuestos causarían una subestimación entre un 35 y un 45%, explicando holgadamente por sí solos el sesgo negativo documentado por Soto y Meier (2013).

Según lo anterior, la fuerte subestimación mostrada en Concepción podría deberse en gran medida a motivos metodológicos, y no a particularidades locales. Por otra parte, Pizarro *et al.* (2013) encuentran resultados muy distintos a los nuestros, que sugieren que la subestimación documentada por Soto y Meier (2013) se debería a diferencias entre Bellavista y Carriel Sur, y no a problemas metodológicos. Al haberse lamentablemente perdido los pluviogramas originales de la Estación Bellavista, no podemos corroborar los resultados de Pizarro *et al.* (2013).

Es necesario investigar en mayor profundidad estos hallazgos. En efecto, si los sesgos cuantificados en este trabajo tienen universalmente el mismo orden de magnitud que hemos encontrado para Concepción y varias ciudades suizas, ello implicaría que la totalidad de los valores IDF propuestos para Chile en LEN (2002) deben tener un sesgo negativo, que potencialmente podría ser similar al mostrado para el caso de Concepción. A nuestro entender, esto explicaría convincentemente por qué tantos diseños viales y urbanos, que aparentemente fueron dimensionados adecuadamente, en fin de cuentas fallan con una frecuencia mucho mayor que la de diseño.

Como primera aproximación para resolver este problema, de corte netamente transitorio, se propone corregir los valores IDF para todas las ubicaciones, asumiendo que la subestimación es igual a la observada en Concepción:

$$i_{d \text{ Ubicación } X}^T = i_{d \text{ Ubicación } X \text{ LEN}}^T \cdot \frac{i_{d \text{ Concepción Soto-Meier}}^T}{i_{d \text{ Concepción LEN}}^T}$$

Así, para cualquier ubicación en Chile, el valor IDF estimado según LEN (2002) se multiplicaría por un factor de corrección, igual a la razón entre el valor equivalente en Concepción según Soto y Meier (2013) y el valor en Concepción según LEN (2002). Esto podría resultar sin embargo en valores demasiado conservadores. Una alternativa para aquellas ubicaciones donde estén disponibles, sería consultar los valores IDF recientemente derivados por el grupo de la Universidad de Talca, en el marco de un proyecto Fondef (Pizarro *et al.*, 2013).

Como medida de fondo, se recomienda instalar pluviógrafos de precisión a lo largo de todo Chile, capaces de medir lluvia en forma continua sobre lapsos de 1 min, de modo de comenzar a comprender las intensidades reales de precipitación sobre las duraciones más cortas.

Simplemente, no es posible sustentar los diseños de aquellas obras que requieren conocer la lluvia máxima sobre duraciones cortas en valores IDF derivados a partir de pluviogramas semanales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Prof. Peter Molnár, ETH-Zürich, por facilitar los datos de precipitación para las localidades suizas, y a la Dra. Alejandra Stehr y el Sr. Héctor Alonso, Centro EULA-Chile de la Universidad de Concepción, por hacer lo mismo con los datos de precipitación colectados en sus pluviógrafos.

REFERENCIAS

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

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.

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

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

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.

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.

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.