

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL EN CONCEPCIÓN DERIVADA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA SECUENCIA DE TORMENTAS

GERI PRANZINI C.<sup>1</sup>  
CLAUDIO MEIER V.<sup>2</sup>

RESUMEN

La variabilidad de la precipitación anual queda determinada por su distribución estadística, la que suele estimarse ajustando un modelo conocido, por ejemplo, una normal, a datos totales anuales. Esto requiere disponer de una serie de tiempo relativamente larga y completa, una ocurrencia poco usual. Eagleson (1978) derivó la distribución de la precipitación anual en Boston, basándose en dos características de la secuencia de tormentas, obtenidas de registros pluviográficos: las alturas de agua caídas en cada evento, y los tiempos entre llegadas de tormentas sucesivas.

Siguiendo su metodología, se deriva la función de densidad de probabilidades de la precipitación anual para la ciudad de Concepción, sobre la base de analizar las cerca de 1350 tormentas que ocurrieron en el período 1975-1999, en que se dispone de registro pluviográfico, y se compara los resultados con el método tradicional de ajuste de una normal.

Como muchas estaciones sólo disponen de datos pluviométricos, o totalizados, y los registros no suelen ser tan largos, también se obtiene la distribución de la precipitación anual para distintos casos con información menos detallada y se comparan los resultados con el mejor caso.

El método propuesto permite estimar mejor la distribución de probabilidades de la precipitación anual que el ajuste de un modelo probabilístico a los valores totales anuales, sobre todo si se dispone sólo de registros relativamente cortos, siempre que éstos sean de tipo pluviográfico o totalizados cada 12 horas.

<sup>1</sup> Alumno memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

El coeficiente de determinación R<sup>2</sup> y los resultados de la prueba U de Mann Whitney, se muestran diferentes entre los modelos ajustados de las estaciones del Valle y las estaciones pluviográficas de la Cordillera de los Andes.

Los modelos utilizados para explicar la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones, se ajustaron a los datos de las estaciones pluviográficas y pluviométricas, considerando la duración y la frecuencia de las precipitaciones, pero no se pudo obtener un valor único para cada caso.

La relación a la construcción de las curvas IDF, se puede concluir que en general no se presentaron grandes problemas en el diseño y construcción de las curvas para las distintas estaciones, salvo en la estación de Colón, en la cual fue necesario realizar ajustes e introducir modificaciones con el objeto de obtener una gráfica lo más cercana al modelo teórico.

Es importante destacar que los modelos ajustados para las estaciones cumplieron con los requisitos de regresión de homocedasticidad, normalidad y no autocorrelación.

Se recomienda el uso de los modelos ajustados, para cada estación estudiada.

En la zona en estudio sólo existe información pluviométrica, es decir, duración de las precipitaciones, por lo que se recomienda utilizar los modelos de ajuste de la precipitación anual, basándose en los datos de las estaciones pluviométricas y pluviográficas, para obtener los valores de la precipitación anual, en un período de tiempo determinado.

Las curvas IDF, se pueden utilizar directamente para la estimación de las precipitaciones anuales, basándose en los datos de las estaciones pluviométricas y pluviográficas, para obtener los valores de la precipitación anual, en un período de tiempo determinado.

Se recomienda utilizar los modelos de ajuste de la precipitación anual, basándose en los datos de las estaciones pluviométricas y pluviográficas, para obtener los valores de la precipitación anual, en un período de tiempo determinado.

$$I = (163,694 * T^{0,469797}) / D^{0,426971}$$

$$I = (162,461 * T^{0,469797}) / D^{0,426971}$$

Tabla 1. Valores de los parámetros de ajuste de los modelos de precipitación anual, basándose en los datos de las estaciones pluviométricas y pluviográficas, para obtener los valores de la precipitación anual, en un período de tiempo determinado.

Estación	Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	Resultado de la prueba U de Mann Whitney
Valle	0,469797	0,426971
Cordillera de los Andes	0,469797	0,426971

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación anual en un lugar, así como su variabilidad interanual, son importantes variables climáticas que se necesitan para estudios de balance hidrológico, en agricultura, para planificar recursos hídricos, etc.

El comportamiento probabilístico de la precipitación anual queda determinado por su distribución estadística o función de densidad de probabilidades, la que suele estimarse ajustando un modelo conocido (por ejemplo, una normal) a una serie de datos totales anuales. Lo ideal para tales fines es contar con un registro relativamente largo, de al menos unos 30 años de duración, pero en muchos casos sólo se tiene información sobre las lluvias para unos pocos años, lo que no alcanza para estimar adecuadamente los parámetros del modelo estadístico, ni tampoco para verificar su validez. Además, el ajustar una distribución a los datos anuales pasa por alto una gran cantidad de información que está implícitamente contenida en el registro. Nos referimos a las características de las tormentas, o eventos de precipitación, que componen la lluvia caída en un año.

Siguiendo las ideas de Eagleson (1978), proponemos entonces derivar la distribución de la precipitación anual, en la ciudad de Concepción, basándonos en las características de la secuencia de tormentas, obtenidas de los 25 años con registros pluviográficos disponibles en la estación meteorológica Fundo Bellavista, de la Universidad de Concepción.

Un modelo físicamente basado de la precipitación en Concepción debería incorporar la dinámica geofísica que genera las perturbaciones que dan lugar a eventos de lluvia, o tormentas, en esta parte del mundo. Sin embargo, como no existe el conocimiento científico que permita incorporar tal dinámica en un modelo ingenieril, se adopta un enfoque fenomenológico, es decir, basado en las características observadas de las tormentas, sin explicar porqué éstas ocurren.

Si podemos describir probabilísticamente el tiempo transcurrido entre llegadas de tormentas sucesivas, así como la altura de agua caída en cada tormenta, podremos generar un modelo estocástico de la precipitación anual, puesto que ésta última no es más que la suma de las alturas individuales aportadas por las distintas tormentas que ocurren cada año.

El principal objetivo de este trabajo es entonces derivar la función de distribución de probabilidades de la precipitación anual en Concepción, sobre la base de las características de las aproximadamente 1350 tormentas que ocurrieron en el período 1975-1999, y compararla con el método tradicional de ajuste de una distribución a una serie de datos anuales. Sin embargo, pocos lugares poseen registros pluviográficos con tal duración. La información comúnmente disponible es del tipo pluviométrico, o totalizado, e independientemente del tipo de datos que se tenga, los registros no suelen ser tan largos. Un segundo objetivo se refiere entonces a derivar la distribución de la precipitación anual cuando se tiene información menos detallada. En particular, haremos esto usando datos pluviométricos registrados cada 12 y 24 horas, así como registros de cualquier tipo pero de menor duración, y compararemos estos resultados con el caso derivado a partir de la información completa, es decir, con los 25 años de registro pluviográfico.

Finalmente, debe mencionarse que, como resultado intermedio, se obtiene la descripción probabilística de las principales propiedades de las tormentas en Concepción: altura de agua caída, duración, tiempo entre tormentas, tiempo entre llegadas de tormentas, e intensidad media.

## 2. DISTRIBUCIÓN DERIVADA DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL

Asumamos que la precipitación total anual queda representada por la variable aleatoria  $P_a$ . Para que la precipitación total en un año dado tenga exactamente el valor  $P_a = y$ , puede tenerse que ocurra una sola tormenta en ese año, con altura caída  $h_1$  igual a  $y$ , o bien pueden ocurrir dos eventos, de manera que la suma de sus alturas ( $h_1 + h_2$ ) sea igual a  $y$ , o también puede tenerse tres tormentas, de modo que  $(h_1 + h_2 + h_3) = y$ , etc.

La precipitación anual es entonces una variable compuesta, que depende del número  $v$  de eventos de precipitación que se tenga en un año dado (lo cual a su vez queda determinado por los tiempos que transcurran entre tormentas), así como de las magnitudes  $h_j$  de las alturas de agua caídas en cada una de esas tormentas. En términos matemáticos:

$$P_a(v) = \sum_{j=1}^v h_j \quad (1)$$

En esta expresión, tanto la cantidad  $v$  de tormentas que ocurren en un año dado, como las alturas  $h_j$  de agua caída en cada tormenta son variables aleatorias, con distribuciones probabilísticas que pueden estimarse si se dispone de información sobre los eventos de precipitación. Nos interesa entonces obtener el comportamiento estadístico de la variable compuesta  $P_a$ , conocidas las distribuciones de las propiedades de las tormentas. Esto podemos hacerlo utilizando la teoría de las distribuciones derivadas (Benjamin y Cornell, 1970), que en general permite obtener la distribución de una función de dos o más variables aleatorias independientes, conocidas sus funciones marginales de densidad de probabilidades.

Asumiremos que tanto el tiempo entre llegadas de tormentas,  $T_a$ , como las alturas  $h_j$  caídas en cada evento individual son idéntica e independientemente distribuidas (i.i.d.). Lo primero significa que no hay diferencias en el comportamiento estadístico de estas variables en el tiempo, lo que se conoce como estacionariedad. En otras palabras, no importando en qué año o en qué momento del año nos encontremos, las tormentas ocurrirán con la misma frecuencia, y la lluvia caída tendrá igual distribución. Sabemos que esto no es realmente el caso en Chile Central, ya que las tormentas son más frecuentes e intensas en invierno. Sin embargo, el incluir esta variabilidad estacional complicaría notablemente el análisis matemático. De todas formas,  $P_a$  representa una integración a escala anual del proceso de precipitación, por lo que no se hace necesario representar el comportamiento dentro de un año. De haber una estación seca claramente marcada, sin ocurrencia de tormentas, podría también aplicarse el análisis descrito sólo al período de lluvias, en cuyo caso  $v$  pasaría a representar la cantidad de tormentas en la época de aguas, cuya duración pasaría a ser también una variable aleatoria. Los datos para Concepción muestran la ocurrencia de eventos durante todo el año, por lo que no se consideró una estación seca.

A su vez, el supuesto de independencia implica que las características de una tormenta no se ven influidas por los eventos de lluvia anteriores. Esto podría justificarse en términos físicos, dado que los eventos considerados son todos de tipo ciclónico, es decir, corresponden al paso de frentes. Sin embargo, en términos prácticos, es difícil asignar cada tormenta al paso de una depresión individual. Con fines ingenieriles, se decidió entonces asumir un período de separación mínimo entre pulsos de lluvia, para discriminar tormentas independientes.

Según lo anterior, la distribución de la precipitación anual queda dada por la siguiente expresión:

$$f_{Pa}(y) = \sum_{v=1}^{\infty} f_{Pa(v)}(y) \cdot P_{\theta}(v) \quad y > 0 \quad (2)$$

donde:  $f_{Pa}(y)$  es la densidad de probabilidad asociada a una precipitación anual de  $y$  mm  
 $f_{Pa(v)}(y)$  es la densidad asociada a una precipitación de  $y$  mm, caída justo en  $v$  eventos  
 $P_{\theta}(v)$  es la probabilidad discreta de que ocurran exactamente  $v$  eventos en un año

Cada sumando en la ecuación (2) representa la densidad de probabilidad de que la suma de las alturas caídas en  $v$  tormentas alcance exactamente a  $y$  mm, ponderada por la probabilidad discreta de tener  $v$  eventos en un año. Como ya se dijo, una precipitación anual de  $y$  mm puede obtenerse con diferentes números de eventos de lluvia, por lo que debemos efectuar la sumatoria sobre  $v$  variando desde uno hasta infinito. En otras palabras, la densidad de una precipitación anual de  $y$  mm está dada por la probabilidad de tener una sola tormenta en el año, y que tal tormenta tenga  $y$  mm de precipitación, más la probabilidad de tener dos tormentas en el año, y que la suma de las alturas caídas en esas dos tormentas sea igual a  $y$  mm, más la probabilidad de tener tres tormentas en el año...

Para completar la descripción probabilística de  $P_a$ , falta considerar explícitamente la probabilidad discreta de que no ocurra ninguna tormenta en un año, que queda representada por  $P_{\theta}(v=0)$ , y que equivale evidentemente a la probabilidad de que  $y=0$ .

La ocurrencia de eventos de precipitación se describirá mediante un proceso de conteo de Poisson. Esto determina cuántas tormentas ocurren en un año, es decir, el comportamiento de la variable aleatoria  $v$ . Según esto, se tendrá que:

$$P_{\theta}(v) = \frac{(\omega t)^v \cdot e^{-\omega t}}{v!} \quad v = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

representa la probabilidad discreta de tener exactamente  $v$  eventos de precipitación en un período  $t$ , que en nuestro caso corresponde a un año entero.

En teoría, se requeriría asumir eventos instantáneos para evitar que puedan traslaparse dos tormentas sucesivas, es decir, que la duración de un cierto evento supere el tiempo entre el inicio de tal evento y el inicio del que le sigue. En términos prácticos, basta que la duración media de los eventos sea bastante menor que el valor esperado del tiempo entre tormentas. El asumir un proceso Poisson implica a su vez que los tiempos entre llegadas de tormentas,  $T_p$ , han de distribuirse según una exponencial:

$$f_{Ta}(u) = \omega \cdot e^{-\omega u} \quad u > 0 \quad (4)$$

El único parámetro de esta distribución,  $\omega$ , tiene unidades de frecuencia, y representa la tasa promedio de llegada u ocurrencia de eventos, mientras que su inverso  $\omega^{-1}$ , con unidades de tiempo, corresponde al tiempo promedio transcurrido entre inicios de dos eventos consecutivos.

Se hace notar que usando un enfoque netamente empírico, podría usarse cualquier otra distribución para los tiempos entre llegadas, con un ajuste tal vez mejor. Sin embargo, debido a complicaciones matemáticas, esto podría imposibilitar la derivación analítica de la distribución de  $P_a$ , por lo que nos ceñiremos aquí al modelo exponencial.

Necesitamos ahora disponer de un modelo probabilístico para las alturas de agua  $h_j$  caídas en cada evento, de manera de obtener  $f_{Pa(v)}(y)$ , la densidad asociada a una precipitación total de  $y$  mm en un año, caída en exactamente  $v$  eventos de precipitación. Como se planteó anteriormente, se asumirá que las alturas caídas son idéntica e independientemente distribuidas (es decir, son variables aleatorias i.i.d.), y tal como lo hiciera Eagleson (1978), se usará la distribución Gamma de dos parámetros,  $\lambda$  y  $\kappa$ , debido a su versatilidad y a su propiedad autoregenerativa. Lo último significa que una suma de  $n$  variables aleatorias i.i.d. Gamma( $\lambda, \kappa$ ), resulta tener también una distribución Gamma, aunque con uno de los parámetros diferente, ya que la sumatoria se distribuye Gamma( $\lambda, n\kappa$ ). Así, cada una de las alturas caídas  $h_j$  tiene una distribución dada por:

$$f_H(u) = \frac{\lambda \cdot (\lambda u)^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda u}}{\Gamma(\kappa)} \quad u > 0 \quad (5)$$

mientras que la distribución de  $P_a(v)$ , una suma de  $v$  alturas de precipitación (caídas en igual número de tormentas) dada por la ecuación (1), queda representada por:

$$f_{Pa(v)}(y) = \frac{\lambda \cdot (\lambda y)^{v\kappa-1} \cdot e^{-\lambda y}}{\Gamma(v\kappa)} \quad y > 0 \quad (6)$$

Podemos ahora reemplazar las expresiones que hemos derivado para  $P_{\theta}(v)$  y  $f_{Pa(v)}(y)$  en la ecuación (2), obteniendo la función de densidad de probabilidades de la precipitación anual, cuya parte continua queda dada por:

$$f_{Pa}(y) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\lambda (\lambda y)^{v\kappa-1} \cdot e^{-\lambda y}}{\Gamma(v\kappa)} \cdot \frac{(\omega t)^v \cdot e^{-\omega t}}{v!} \quad y > 0 \quad (7)$$

También existe una probabilidad discreta de que no ocurra precipitación alguna en un año dado. La masa de probabilidad correspondiente a  $P_a=0$  es igual a la probabilidad de que no ocurra ningún evento, es decir, que  $v$  sea igual a cero:

$$P_{\theta}(v=0) = e^{-\omega t} \quad y=0 \quad (8)$$

Integrando (7) más el pulso (8) entre 0 e  $y$ , obtenemos la función de distribución acumulada:

$$F_{Pa}(y) = e^{-\omega t} + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(\omega t)^v e^{-\omega t}}{v!} P[v\kappa, \lambda y] \quad y \geq 0 \quad (9)$$

donde  $P[v\kappa, \lambda y]$  es la función Gamma incompleta de Pearson.

### 3. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TORMENTAS

#### Con información completa (registro pluviográfico para todo el período disponible)

Se analizó los 25 años de registro pluviográfico disponibles para Concepción, identificándose las tormentas ocurridas en tal período. Considerando un lapso seco de 12 horas para discriminar entre eventos independientes, y despreciando tormentas con alturas de precipitación menores a 1 mm, se obtuvo un total de 1350 eventos de precipitación en el período 1975-1999.

Para cada tormenta, se obtuvo las siguientes características: altura de agua caída,  $h$ ; duración del evento,  $t$ ; tiempo entre el final de la tormenta y el inicio de la siguiente,  $t_b$ ; tiempo entre llegadas (inicios) de tormentas,  $t_a$ ; e intensidad media,  $i_p$  (dada por la razón  $h/t_r$ ). Estas variables quedan definidas en la Figura 1, donde se modela las tormentas como pulsos rectangulares de lluvia.

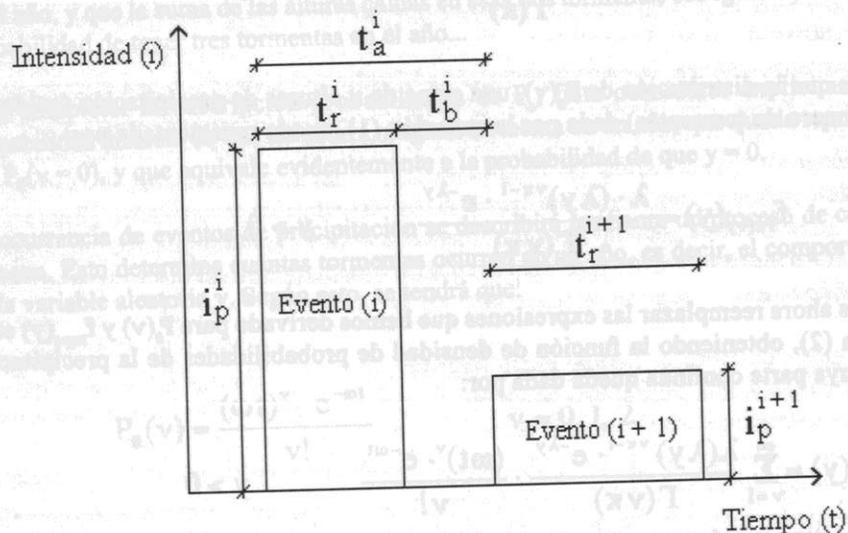


Figura 1. Visualización de las características relevantes de la secuencia de tormentas.

Las características de mayor interés son la altura caída,  $h$ , y el tiempo entre llegadas de tormentas,  $t_a$ , puesto que conociendo los parámetros de sus distribuciones, podemos obtener la distribución de la precipitación anual, dada por la ecuación (7). La altura caída queda representada muy bien por una distribución Gamma, ecuación (5), con parámetros  $\lambda = 0.02784 \text{ mm}^{-1}$ , y  $\kappa = 0.6157$ . Se ajustó una distribución exponencial a los tiempos entre llegadas, según ecuación (4), con resultados satisfactorios. Se encontró que  $\omega = 0.006261 \text{ hr}^{-1}$ . Los respectivos ajustes de tales modelos a histogramas de las dos variables se muestran en la Figura 2.

Los valores de los parámetros  $\lambda$ ,  $\kappa$ , y  $\omega$ , recién obtenidos, fueron reemplazados en la ecuación (7), obteniéndose la función de densidad de probabilidades de la precipitación anual en Concepción. Se encontró que la probabilidad de tener  $P_a = 0$  es del orden de  $10^{-24}$ , por lo que es claramente despreciable el pulso de probabilidad descrito por la ecuación (8). De aquí en adelante, se trabajó siempre con la función de densidad, dada por la ecuación (7), en vez de la función acumulada (9), ya que es más simple calcular  $\Gamma(\nu\kappa)$  que  $P[\nu\kappa, \lambda y]$ . La evaluación de (7), así como su integración, fueron realizadas numéricamente utilizando una planilla de cálculo.

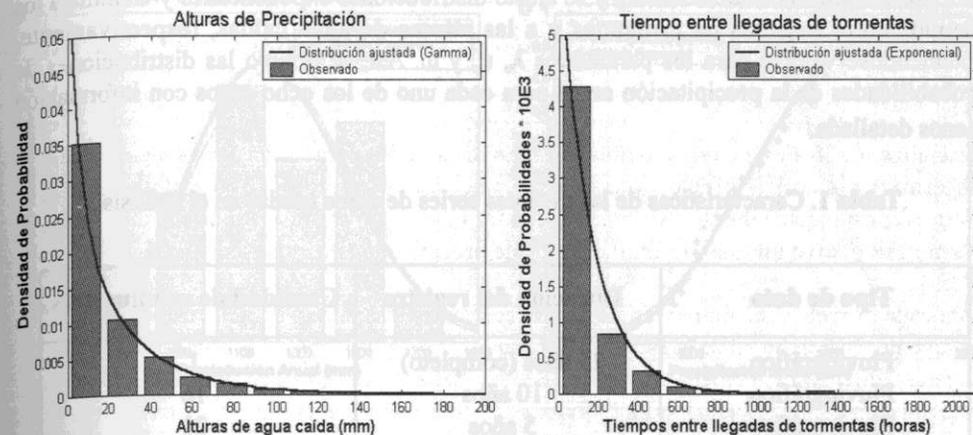


Figura 2. Ajuste de modelos probabilísticos a las alturas caídas y tiempos entre llegadas.

En relación a las demás características de los eventos, se encontró que las duraciones,  $t_r$ , se distribuyen exponencialmente con parámetro  $\lambda_r = 0.05312 \text{ hr}^{-1}$ , los tiempos entre tormentas,  $t_a$ , son Gamma con parámetros  $\lambda_b = 0.02953 \text{ hr}^{-1}$  y  $\kappa_b = 0.4158$ , y las intensidades medias,  $i_p$ , dadas en  $\text{mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ , tienen una distribución lognormal con parámetros  $\mu_{\ln y} = -0.06181$  y  $\sigma_{\ln y} = 0.6264$ .

#### Con información menos detallada (registros pluviométricos y/o de menor duración)

Los parámetros  $\lambda$ ,  $\kappa$ , y  $\omega$ , que definen la distribución de la precipitación anual, pueden obtenerse también utilizando datos totalizados (pluviométricos) y/o series de menor duración. Esto representaría una situación más cercana al caso real, ya que la mayoría de las estaciones no dispone de registro pluviográfico continuo para períodos largos. Por ello, se repitió el proceso de identificación de las tormentas para series de tiempo submuestreadas del registro completo, pero con menor contenido de información, considerando distintas combinaciones de tipo de datos y de duración de la serie.

Se trabajó con tres tipos de datos: pluviográficos (continuos), y pluviométricos (totalizados), colectados ya sea cada 12 horas (entre 8:00 y 20:00, y entre 20:00 y 8:00), o cada 24 horas (entre las 8:00 de un día y las 8:00 del día siguiente). A su vez, además de los 25 años, se consideró duraciones de 5 o 10 años para las series, las que se obtuvieron submuestreando el registro completo. Las nueve combinaciones utilizadas en el análisis se detallan en la Tabla 1.

El registro pluviográfico de 25 años es el más completo, ya que contiene toda la información disponible para esta estación, mientras que las series de 5 años de duración, con datos totalizados cada 24 horas, son aquellas con menor contenido de información. Al submuestrear el registro completo, pueden elegirse 16 diferentes ventanas de tiempo para una duración de 10 años, y 21 en el caso de series de 5 años, aceptando traslape. En este estudio, se trabajó con tales ventanas, bajo la lógica de que si en Concepción hubiesen sólo 5 (ó 10) años de datos disponibles, podrían ser cualesquiera dentro de los 25 años realmente observados. Por otra parte, esto imposibilita el análisis estadístico entre submuestras, ya que las ventanas no son independientes entre sí (sólo hay dos y cinco ventanas independientes, para duraciones de 10 y 5 años, respectivamente).

Para cada una de las combinaciones indicadas, se identificó los eventos de precipitación en la serie, se extrajo sus características, y se ajustó distribuciones exponenciales y Gamma a los tiempos entre llegadas de tormentas y a las alturas de agua caídas, respectivamente, obteniéndose valores para los parámetros  $\lambda$ ,  $\kappa$ , y  $\omega$ . Así, se obtuvo las distribuciones de probabilidades de la precipitación anual para cada uno de los ocho casos con información menos detallada.

**Tabla 1.** Características de las distintas series de datos usadas en el análisis.

Tipo de dato	Duración del registro	Cantidad de submuestras
Pluviográfico	25 años (completo)	1
Pluviográfico	10 años	16
Pluviográfico	5 años	21
Totalizado cada 12 horas	25 años (completo)	1
Totalizado cada 12 horas	10 años	16
Totalizado cada 12 horas	5 años	21
Totalizado cada 24 horas	25 años (completo)	1
Totalizado cada 24 horas	10 años	16
Totalizado cada 24 horas	5 años	21

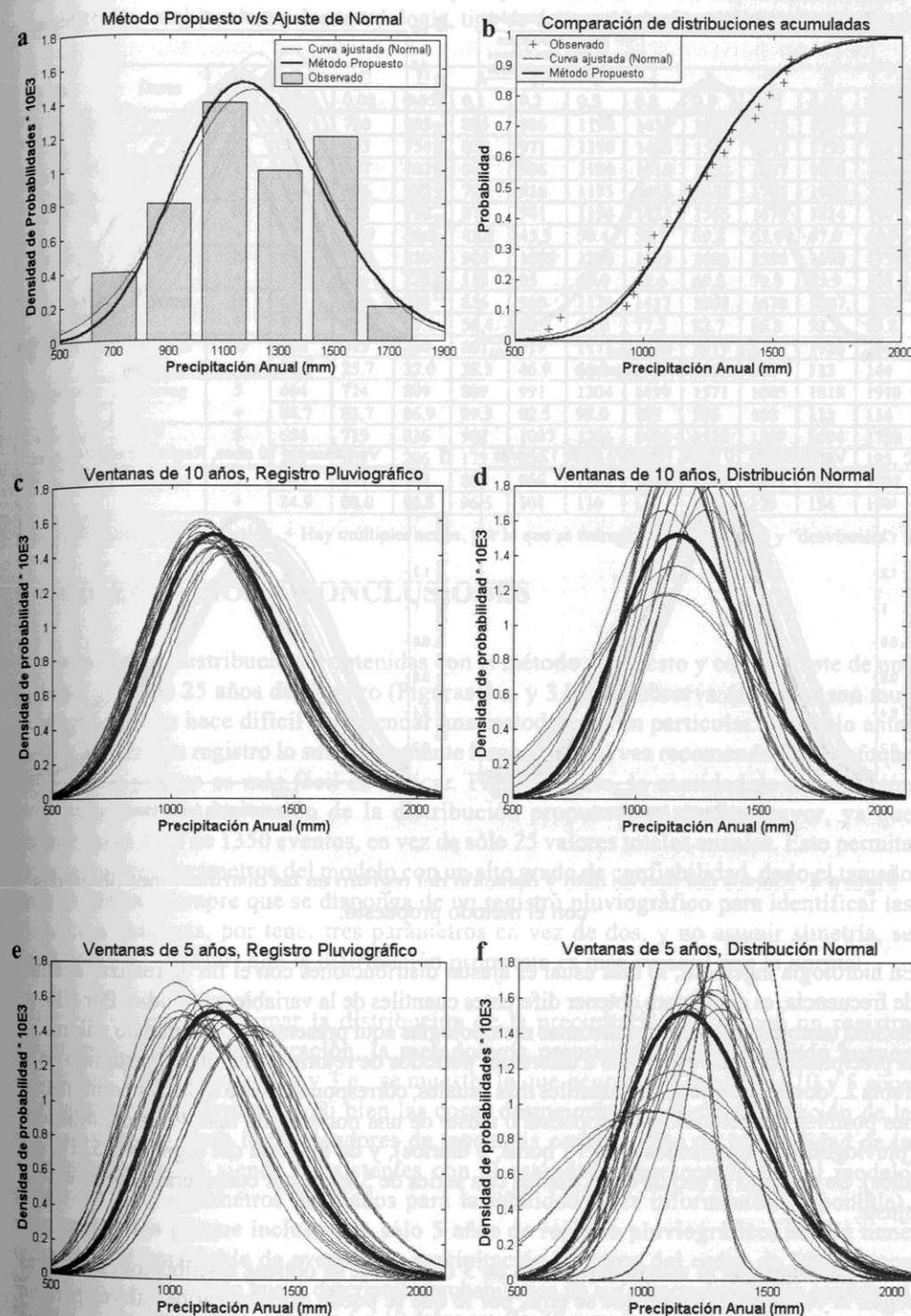
#### 4. COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS

Hemos obtenido la distribución de probabilidades para la precipitación anual en Concepción, utilizando la metodología propuesta por Eagleson (1978). Este análisis se llevó a cabo considerando el registro pluviográfico completo, así como para series de datos con menor contenido de información. Sin embargo, la función de densidad de probabilidades puede también obtenerse utilizando el método tradicional, consistente en ajustar un modelo probabilístico, generalmente una normal, a los valores totales anuales de precipitación.

Puede entonces hacerse dos tipos de comparaciones: primero, entre el método tradicional y el propuesto, y segundo, para el método propuesto, entre el análisis con información completa y las diferentes series con menor contenido de información. En cada comparación entre funciones de densidad, se muestra siempre la distribución obtenida para la información completa, pues se asume que ésta representa mejor la variabilidad de la precipitación anual en Concepción.

Tanto para el registro completo como para las distintas ventanas de tiempo consideradas, se procedió a ajustar una distribución normal a los datos totales anuales de precipitación, la práctica hidrológica común para zonas húmedas (Linsley et al., 1982). Por cierto, el que los datos sean pluviográficos o totalizados no afecta en nada estos ajustes, ya que sólo se requiere los totales anuales, que no dependen del tipo de registro que se tenga.

En las gráficas 3.a. y 3.b., se compara el método propuesto con el ajuste de una distribución normal, considerando toda la información disponible. En 3.a., junto a las funciones de densidad, se muestra un histograma de los totales anuales. En 3.b., se grafica las distribuciones acumuladas así como las probabilidades de los 25 valores anuales observados, calculadas con la fórmula empírica de Weibull (Linsley et al., 1982). Las demás gráficas en la Figura 3. indican las consecuencias de reducir la duración del registro a series de 10 y 5 años. La Figura 4. muestra los efectos combinados del tipo de dato y de la duración del registro sobre la metodología propuesta.



**Figura 3.** Comparaciones entre el método tradicional y el método propuesto. a. Distribución propuesta, ajuste normal e histograma de totales anuales. b. Distribuciones acumuladas, propuesta y normal, y valores anuales observados graficados según Weibull. c y d. Efectos de reducir la duración del registro a 10 años, para método propuesto y ajuste de normal, respectivamente. e y f. Efectos de reducir la duración del registro a 5 años, para el método propuesto y ajuste de normal.

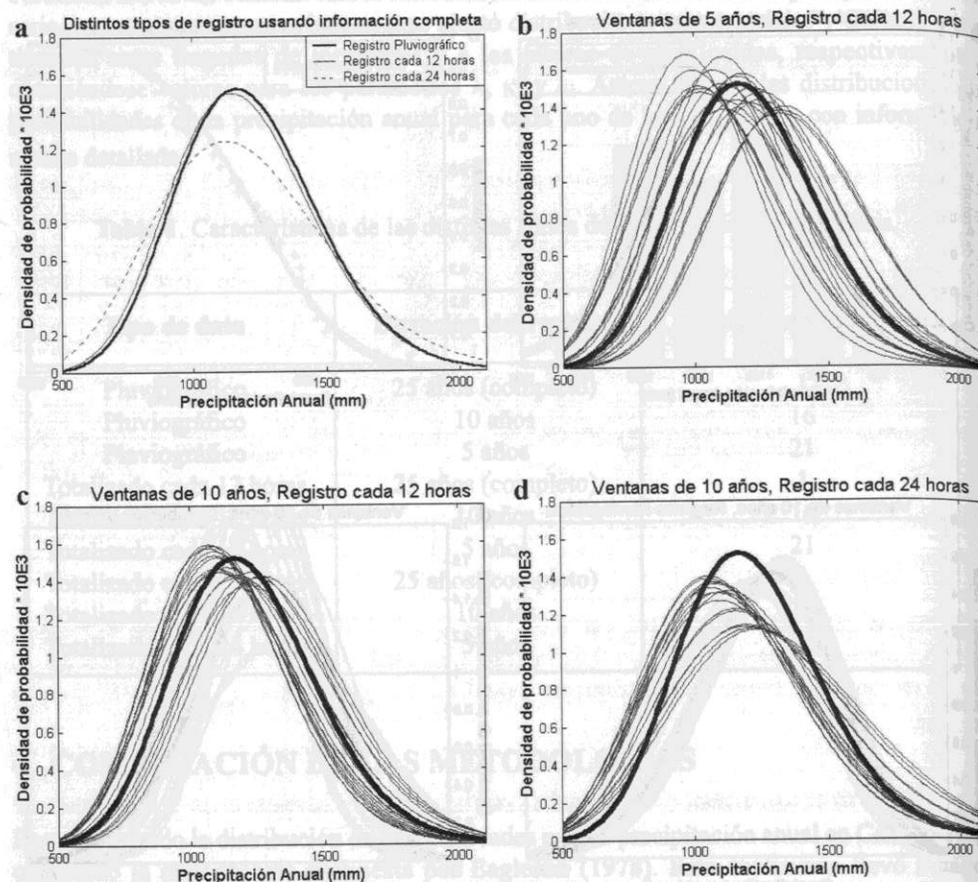


Figura 4. Efectos del tipo de dato y duración del registro en las distribuciones obtenidas con el método propuesto.

En hidrología ingenieril, lo más usual es ajustar distribuciones con el fin de realizar análisis de frecuencia, es decir, para obtener diferentes cuantiles de la variable en estudio. Por ello, se decidió también comparar las distintas metodologías aquí presentadas, calculando valores de la precipitación anual asociados a diferentes períodos de retorno. Esto queda resumido en la Tabla 2., donde se entrega los cuantiles más usuales, correspondientes a todas las combinaciones posibles de metodología (propuesta o ajuste de una normal), de tipo de datos utilizados (pluviográficos, totalizados cada 12 horas, o diarios), y de longitud del registro (25, 10, ó 5 años). Se descartó el uso de datos diarios con series de 5 años, por considerarse deficiente el ajuste.

Nótese además que al usarse duraciones de 5 ó 10 años, se obtiene distribuciones distintas según la ventana de tiempo que se elija, por lo que se puede calcular varios valores para un mismo cuantil. Por ello, se entrega las “medias” y “desviaciones” de los distintos valores obtenidos, las que sólo sirven para efectuar comparaciones entre los métodos, no teniendo validez estadística general, ya que, como se dijo anteriormente, estas ventanas traslapadas no constituyen muestras independientes. En otras palabras, se requeriría una serie mucho más larga para poder estimar adecuadamente la media y la desviación de un cuantil dado, con submuestras independientes. Una forma de obviar lo corto de los registros sería generando series de tiempo sintéticas mediante una simulación Monte-Carlo, usando las distribuciones ajustadas para  $h$  y  $t_a$ .

Tabla 2. Cuantiles de la distribución de la precipitación anual en Concepción, derivados con distintas combinaciones de metodología, tipo de datos, y duración del registro (en mm).

Metodo	Datos	Años	C U A N T I L E S										
			0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Propuesto	Pluviog	25	667	720	805	885	986	1198	1431	1562	1675	1807	1898
Normal	*	25	569	643	754	852	971	1198	1426	1545	1643	1753	1827
Propuesto	12 horas	25	643	697	782	863	966	1180	1418	1552	1667	1803	1896
Propuesto	24 horas	25	546	606	702	795	916	1173	1465	1632	1778	1950	2069
Propuesto	Pluviog	10	659	712	798	878	981	1194	1432	1565	1679	1814	1907
		+	37.7	39.0	41.2	43.0	45.5	50.4	56.3	59.8	63.0	67.0	69.7
Normal	*	10	663	726	820	904	1006	1200	1395	1496	1580	1675	1738
		+	159	146	128	113	95	69.0	62.6	69.8	79.8	93.9	104
Propuesto	12 horas	10	635	689	775	856	960	1176	1417	1553	1670	1807	1902
		+	47.4	49.6	53.1	56.4	60.4	68.8	77.5	82.7	86.8	92.3	95.8
Propuesto	24 horas	10	556	615	710	801	919	1171	1456	1619	1761	1928	2044
		+	22.2	25.7	32.0	38.3	46.9	66.8	90.7	105	118	133	144
Propuesto	Pluviog	5	664	724	809	889	991	1204	1439	1571	1685	1818	1910
		+	88.7	83.7	86.9	89.5	92.5	98.0	103	106	108	112	114
Normal	*	5	654	719	816	902	1007	1206	1406	1510	1597	1694	1758
		+	259	237	206	179	150	108	109	127	148	176	195
Propuesto	12 horas	5	643	697	782	863	966	1182	1421	1556	1671	1808	1902
		+	84.9	88.0	92.5	96.5	101	110	119	124	129	134	138

\* Sólo se requiere totales anuales + Hay múltiples series, por lo que se entrega “media” (arriba) y “desviación”.

## 5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Al comparar las distribuciones obtenidas con el método propuesto y con el ajuste de una normal, para los 25 años de registro (Figuras 3.a. y 3.b.), se observa que éstas son muy similares, lo que hace difícil recomendar una metodología en particular. Según lo anterior, de tenerse un registro lo suficientemente largo, sería tal vez recomendable el enfoque tradicional, ya que es más fácil de aplicar. Por otra parte, la cantidad de información involucrada en la derivación de la distribución propuesta es mucho mayor, ya que considera un total de 1350 eventos, en vez de sólo 25 valores totales anuales. Esto permite estimar los tres parámetros del modelo con un alto grado de confiabilidad, dado el tamaño de la muestra, siempre que se disponga de un registro pluviográfico para identificar las tormentas. Además, por tener tres parámetros en vez de dos, y no asumir simetría, se puede plantear a priori que la distribución propuesta es más versátil que la normal.

Ahora, si se intenta estimar la distribución de la precipitación anual con un registro pluviográfico de menor duración, la metodología propuesta sigue entregando buenos resultados. En las figuras 3.c y 3.e., se muestra lo que ocurre al disponer de 10 y 5 años de registro, respectivamente. Si bien las cosas desmejoran al acortar la duración de la serie de tiempo, tanto los indicadores de tendencia central como de variabilidad de la distribución siguen siendo consistentes con el estándar (representado por el modelo propuesto, con parámetros estimados para la totalidad de la información disponible). Esto se explica porque incluso con sólo 5 años de registro pluviográfico, aún se tiene una cantidad apreciable de eventos de precipitación (ocurren del orden de 50 a 60 por año), lo que permite una buena descripción probabilística de sus características. En cambio, al intentar ajustar una normal con sólo 5 o 10 datos anuales (figuras 3.d. y 3.f.), se obtiene una gran dispersión en los resultados por ser la muestra demasiado pequeña. Incluso, se puede apreciar que se estima mejor la distribución con la metodología propuesta, disponiendo de 5 años de datos, que ajustando una normal a 10 totales anuales. Lo anterior queda corroborado al comparar los valores, y sobre todo la variabilidad, de los cuantiles, según tabla 2.

En muchas estaciones no se tiene instrumentos registradores, sino que se lee la altura acumulada cada 12 ó 24 horas. Por ello se derivó también distribuciones con la metodología propuesta,

pero con datos totalizados. En la figura 4.a. se observa el efecto de utilizar tales datos, para el mismo período de 25 años. La distribución derivada con datos tomados cada 12 horas es muy similar al estándar (con datos pluviográficos), pero si se usa datos diarios, las funciones de densidad difieren notoriamente, sobre todo en lo que respecta a la variabilidad. Influyen en esto cambios previsible en los valores de los parámetros (por ejemplo, la frecuencia de los eventos,  $\omega$ , disminuirá al usarse datos diarios, ya que se contarán menos tormentas). Debe también cuestionarse la decisión arbitraria de considerar una ventana de 12 horas sin precipitación para discriminar entre eventos independientes. Se debería efectuar un estudio para determinar el mejor valor de este período seco, ya sea analizando la autocorrelación temporal de series pluviográficas, o bien mirando el comportamiento en el tiempo de los ciclones y sus frentes asociados. Si se justificase un período seco mayor a 12 horas, el estándar se acercaría más a los modelos derivados a partir de datos totalizados, mientras que si fuese menor, tendería a alejarse.

Con el método propuesto, se puede estimar mejor la distribución de probabilidades de la precipitación anual que ajustando un modelo probabilístico a los valores totales anuales, sobre todo si se dispone sólo de registros relativamente cortos, siempre que éstos sean de tipo pluviográfico o totalizados cada 12 horas. Aunque se tenga años incompletos en el registro, éstos pueden de todas formas ocuparse para estimar los parámetros del modelo propuesto, cosa que no ocurre al ajustar una distribución, para lo cual sólo sirven años completos de registro.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sr. Freddy Echeverría y al Dr. Alberto Foppiano, del Departamento de Física de la Atmósfera y el Océano, Universidad de Concepción, quienes aportaron los datos de precipitación, así como al Dr. Glenn Hofmann, del Departamento de Estadística, Universidad de Concepción, quien hizo diversas sugerencias para mejorar este trabajo.

## REFERENCIAS

- Benjamin, J.R., y C.A. Cornell. 1970. Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers. McGraw-Hill, New York.
- Eagleson, P.S. 1978. Climate, soil, and vegetation. 2. The distribution of annual precipitation derived from observed storm sequences. Water Resources Research, 14(5), 713-721.
- Linsley, R.K., M.A. Kohler, y J.L.H. Paulhus. 1982. Hydrology for Engineers, 3<sup>rd</sup> Edition. McGraw-Hill, New York.

## EL PRONOSTICO HIDROMETEOROLÓGICO Y SU APLICACIÓN AL SECTOR HIDROELÉCTRICO NACIONAL

JOSÉ VERGARA AHUMADA<sup>1</sup>

### RESUMEN

Se evalúa el impacto del pronóstico meteorológico sobre las operaciones de corto plazo en el sector hidroeléctrico chileno, y las ventajas de utilizar técnicas modernas de pronóstico del tiempo para disminuir los impactos negativos y aprovechar de mejor forma los recursos hidráulicos disponibles. El alto grado de acierto logrado en pronóstico meteorológico ha permitido utilizar éste en faenas tan críticas como el corte del Río Bío-Bío para la construcción de la Central Ralco, durante Diciembre de 2000, y la operación diaria de las centrales hidroeléctricas.

Adicionalmente, en este estudio se analiza el impacto económico de la utilización del pronóstico hidrometeorológico durante el invierno del 2000, encontrándose que la metodología desarrollada es económicamente rentable, constituyéndose en una herramienta imprescindible para la toma de decisiones de mediano y corto plazo, que ha permitido mejorar las operaciones de escala semanal de las centrales hidroeléctricas chilenas.

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, PhD, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile