

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILENO

ESTIMACION ESTADISTICA DE LA LINEA DE NIEVES
DURANTE LOS EVENTOS DE PRECIPITACION
ENTRE LAS LATITUDES 28 Y 38 GRADOS SUR

HUMBERTO PEÑA T. (1)

FERNANDO VIDAL J. (2)

RESUMEN

En el presente estudio se hace un análisis de los registros termométricos de diferentes estaciones ubicadas entre los 28 y 38 grados de latitud sur, con el propósito de estimar la elevación de la línea de nieves durante los eventos de precipitación. Como resultado del estudio se entrega una función de distribución de frecuencias de la elevación de la línea de nieves válida para el área analizada y un perfil latitudinal de su nivel medio.

-
- (1) Ingeniero Civil - Dirección General de Aguas.
(2) Ingeniero de Ejecución - Dirección General de Aguas.

1.- INTRODUCCION

Las importantes crecidas observadas en las cuencas pluvionivales de gran parte del país desde 1982 en adelante han demostrado que la línea de nieves constituye una variable de gran relevancia en la generación de los caudales de crecidas en ese tipo de cuencas.

La explicación de este fenómeno se encuentra en el ascenso de la línea de nieves en 200 m aproximadamente por cada grado de aumento de la temperatura del aire durante la tormenta, lo cual, considerando las características topográficas de las cuencas, significa un cambio sustancial del área aportante al caudal de crecida.

Al respecto se han entregado antecedentes que demuestran que las diversas cuencas, en su llegada al valle central, pueden modificar su tamaño en varias veces su valor por esta causa (Peña, 1989).

El aumento del caudal originado en el derretimiento de la nieve al recibir una precipitación líquida, contrariamente a lo que se señala con frecuencia en la información periodística, desempeña un papel secundario en relación al efecto anterior.

Frente a esta situación, se han presentado propuestas metodológicas conducentes a utilizar en el diseño de crecidas de cuencas pluvionivales análisis de frecuencia multivariados, en los cuales el caudal resulta considerando como variable aleatoria no sólo la precipitación, lo que es utilizado normalmente, sino que además la superficie aportante (Espíldora, 1987; Seguel y Stowhas, 1985). Se ha comprobado que esta aproximación entrega distribuciones de frecuencias de los caudales máximos más ajustados a los valores observados (Seguel y Stowhas, 1985).

En el presente trabajo se busca entregar una distribución de frecuencias de la elevación de la línea de nieves en Chile entre los 28 y 38 grados de latitud sur, basándose en los registros estadísticos de la temperatura del aire durante los días con precipitación. De este modo se espera facilitar la incorporación del área aportante como una variable aleatoria, a los cálculos de crecidas de diseño que se realizan en la ingeniería práctica.

2.- ANTECEDENTES UTILIZADOS

La información básica para este informe han sido los registros de temperaturas del aire contenidos en el Banco de Datos Hidrológicos de la Dirección General de Aguas. De dichos archivos se seleccionaron 23 estaciones meteorológicas ubicadas entre Copiapó (27°S) y Puerto Montt (40°S). De esas estaciones se efectuó una nueva selección tomando en cuenta la longitud y confiabilidad de las estadísticas disponibles, la distribución espacial de las estaciones y su elevación, dando preferencia a aquellas que estuvieran más próximas a la línea de nieves. De este modo se seleccionaron las estaciones del Cuadro N°1 y cuya distribución espacial se muestra en la Figura N°1.

A continuación se procedió a confeccionar las series de datos correspondientes a los días con precipitación mayor que 10 mm y 25 mm para los meses de Mayo a Agosto. De ese modo no se incluyeron en la muestra precipitaciones de primavera o verano que pudieran estar asociados a fenómenos de otras características.

Las variables consideradas fueron las temperaturas del aire máximas, mínimas y medias ($(T_{máx}+T_{mín})/2$), y la precipitación, todas a nivel diario. El número de eventos considerados en cada estación se entregan también en el Cuadro N°1.

3.- METODOLOGIA Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION

Es un hecho reconocido en meteorología, la estrecha relación que existe entre la temperatura del aire y la ocurrencia durante un temporal de precipitación líquida o sólida; de modo que dicha variable se utiliza universalmente para discriminar, a priori, entre la existencia de una u de otra forma de precipitación.

De acuerdo a lo anterior, en el presente trabajo se asume que las propiedades estadísticas de la temperatura del aire en los eventos de precipitación tiene una correspondencia directa con las propiedades estadísticas de la elevación de la línea de nieves.

Considerando que la información base disponible se refiere exclusivamente a las temperaturas diarias extremas y medias, valores que no coinciden necesariamente con la temperatura del aire existente durante el temporal, resulta pertinente analizar cual de

estas variables es más adecuada para discriminar entre situaciones de precipitación líquida o sólida. Al respecto se puede señalar que usualmente en la modelación hidrológica se emplea como temperatura índice la temperatura media diaria (o del período de simulación), sin embargo otros autores (Seguel y Stowhas, 1985), han utilizado en la zona Central de Chile la expresión:

$$T_i = 1/K (T_{\text{máx}} + (K-1)*T_{\text{mín}}) \quad [1]$$

Ajustando un valor para K igual a 4 y 7 según distintos criterios. El hecho de proponer una temperatura índice más próxima a la mínima, se explicaría porque dicha temperatura está más cerca de la temperatura del punto de rocío, la cual reflejaría mejor las condiciones meteorológicas durante la tormenta. En el presente estudio se trabajó con las series de temperaturas medias y mínimas, aunque como se señala en el análisis se estiman más confiables los resultados obtenidos con esta última.

El análisis de las series de temperaturas se hizo de acuerdo al siguiente procedimiento:

i.- Comprobación de la existencia de independencia entre las variables temperatura del aire y magnitud de la precipitación. Este aspecto es de la mayor relevancia para el análisis de la información de temperaturas y en especial para el uso de los resultados en el cálculo de crecidas de diseño. Con este propósito se efectuaron diversos análisis gráficos precipitación versus temperatura y se hizo un corte de las series considerando en forma aislada los eventos con precipitación diaria mayor que 25 mm, de modo de comparar los resultados obtenidos con ambos conjuntos de datos. En la Figura N°2 se presentan el gráficos precipitación versus temperatura en estaciones representativas y en el Cuadro N°1 se comparan las temperaturas medias correspondientes a las dos series consideradas.

ii.- Determinación de la distribución empírica de frecuencias acumuladas de la temperatura del aire en días con precipitación, en las distintas estaciones seleccionadas. Para hacer comparables las diversas funciones se normalizaron empleando como variable T-Tmed. Las curvas de frecuencias acumuladas para las temperaturas mínimas se entregan en el Cuadro N° 2 y Figuras N° 3 y 4. La variación

latitudinal de algunas probabilidades de excedencia representativas se entregan en la Figura N° 5.

En el Cuadro N° 2 se ha estimado también el cambio en la elevación de la línea de nieves respecto de la elevación media, asumiendo que el gradiente térmico de la temperatura índice durante los eventos de precipitación es consistentemente similar al gradiente adiabático húmedo ($-0.50 \text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).

iii.- Finalmente se prepararon relaciones de la elevación media de la línea de nieves en función de la latitud. En esta determinación se requiere definir el gradiente de temperatura y el valor umbral de la temperatura índice, que permite distinguir entre precipitaciones líquidas y sólidas.

Es importante destacar que, desde el punto de vista de los resultados, ambos parámetros están estrechamente relacionados ya que un cambio en la temperatura umbral puede ser compensada por una modificación del gradiente de temperatura, entregando una misma línea de nieves final.

Para los propósitos del presente estudio se efectuaron algunos análisis tendientes a investigar la relación temperatura versus elevación, las cuales mostraron perfiles con pendientes levemente superiores al gradiente adiabático húmedo en una atmósfera estandar, pero con una importante dispersión, de modo que finalmente se optó por utilizar el valor del gradiente adiabático húmedo en los cálculos. Cabe destacar que sin lugar a dudas en la realidad los perfiles térmicos durante un día con precipitación reflejan condiciones complejas y cambiantes, de modo que la utilización de un gradiente térmico único y constante constituye una simplificación extrema, justificable solamente por la naturaleza de la información disponible y por el carácter estadístico del estudio.

Al igual que el gradiente térmico, el valor de la temperatura umbral es variable, siendo el resultado de complejos fenómenos termodinámicos. Desde un punto de vista estadístico existen estudios en Estados Unidos (Corps of Engineers, 1956) y en Los Alpes (Braun, 1985), que muestran que la discriminación entre las precipitaciones líquidas y sólidas se presentan en una amplia banda

que va desde aproximadamente -2°C a $+4^{\circ}\text{C}$, con una media alrededor de $+1^{\circ}\text{C}$. En Chile se ha utilizado como temperatura umbral el valor de $0,9^{\circ}\text{C}$ (Seguel y Stowhas, 1985).

Por otra parte, considerando que se está trabajando con temperaturas diarias y no con temperaturas observadas durante el temporal, es necesario introducir una corrección adicional a dichos valores. En el caso de Chile los autores han obtenido buenos resultados en estudios específicos con temperaturas diarias utilizando como umbral temperaturas entre 2 y 3°C .

De acuerdo a estos antecedentes se decidió estimar la elevación de la línea de nieves para las condiciones medias de temperatura considerando un gradiente térmico de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ y una temperatura umbral de $1,0^{\circ}\text{C}$ cuando se utiliza como temperatura índice la temperatura mínima diaria y parametrizada con 2 , 3 y 4°C cuando se trata de la temperatura media diaria. Los antecedentes y determinaciones correspondientes se han sintetizado en el Cuadro N° 3 y en las Figuras N° 6 y 7 que entregan un perfil latitudinal de la línea de nieves media según estas estimaciones.

4.- ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados permite hacer los siguientes comentarios:

i.- Los antecedentes proporcionados demuestran que no existe en el período Mayo-Agosto una relación comprobable entre la magnitud de la precipitación diaria y la temperatura (Cuadro N° 1 y Figura N° 2), de modo que para los efectos de determinación de crecidas de diseño se pueden considerar variables aleatorias independientes.

ii.- Se comprueba que tanto la distribución de frecuencias de las temperaturas mínimas como medias en los días con precipitación son muy similares entre las distintas estaciones de la zona del estudio. Se observan algunas tendencias para bajas probabilidades de excedencia, pero ellas en el caso de las temperaturas mínimas son leves y se presentan sólo para probabilidades menores del 10%. Asimismo, para una probabilidad de excedencia determinada los valores obtenidos en las distintas estaciones difieren poco entre sí, de modo que se puede adoptar el promedio como valor

suficientemente representativo. La única excepción, cuando se utiliza la temperatura mínima, se presenta para probabilidades de excedencia del 5%, siendo preferible en ese caso definir un valor distinto al norte del río Choapa.

Es interesante señalar que la distribución de frecuencias empírica se presenta sin discontinuidades y con pendientes suaves, lo que podría interpretarse como una comprobación de que se trata de una muestra homogénea; sin que las características meteorológicas de los eventos de precipitación (frentes fríos, cálidos, etc.) generen clases diferenciables desde el punto de vista de la temperatura y magnitud de las precipitaciones.

iii.- La línea de nieves obtenida utilizando la temperatura mínima y la temperatura umbral de 1°C es concordante con la estimada usualmente en la zona próxima a la Región Metropolitana. Para llegar a resultados similares con la temperatura media se debe emplear una temperatura umbral próxima a 4°C.

iv.- Utilizando como temperatura índice la temperatura media diaria o la temperatura mínima se observa un ascenso de la línea de nieves hacia el norte (Figura Nº 6 y 7), sin embargo la tendencia es sustancialmente más acentuada cuando se usa la temperatura media. Posiblemente ello se relaciona con la mayor amplitud térmica que se registra hacia el norte en los días con precipitación (Figura Nº 8), la cual a su vez pudiera hacer recomendable el uso de una temperatura umbral variable, creciente hacia el norte.

v.- Considerando la mejor base física del uso de la temperatura mínima como temperatura índice y la mayor consistencia general de los resultados obtenidos, se recomienda en definitiva el uso de las relaciones obtenidas con la temperatura mínima para estimación de la línea de nieves.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

i.- Utilizando como temperatura índice la temperatura mínima y con una temperatura umbral de 1,0°C, se ha podido deducir una relación entre la elevación media de la línea de nieves y la latitud, para los días con precipitación en el período Mayo-Agosto, la cual se entrega en la Figura Nº 6.

ii.- La variación de la línea de nieves en torno a las condiciones medias para el período Mayo a Agosto se resume con una aproximación razonable en una función unica de frecuencias acumuladas (Cuadro N° 2), para toda la zona del estudio.

iii.- Para los propositos de diseño, la línea de nieves puede ser considerada una variable independiente. De este modo, la probabilidad de ocurrencia de un caudal asociado a un evento de precipitación definido por una magnitud de precipitación y una temperatura, corresponde al producto de la probabilidades de ocurrencia de la precipitación y la temperatura. De este modo, los antecedentes proporcionados en conjunto con el análisis de frecuencia de las precipitaciones permite el cálculo del caudal de diseño como una función multivariada, según las metodologias indicadas en otros trabajos (Espíldora, 1982; Seguel y Stowhas, 1985).

iv.- Para mejorar la precisión de los resultados del presente trabajo sería recomendable profundizar el conocimiento del gradiente de temperatura en días con precipitación y de la temperatura umbral, en distintos lugares del area del estudio.

Cabe destacar que el procedimiento empleado en este trabajo no se refiere a situaciones meteorológicas excepcionales, que pudieran no estar consideradas en la información estadística básica.

BIBLIOGRAFIA

- Peña H., 1989, Aspectos Hidrológicos del Control de Crecidas, Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol.5 N°1.
- Espíldora B., 1987, Planteamiento General de los Métodos de Cálculo de Crecidas de Diseño, Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Vol.2 N°1.
- Seguel R. y L. Stowhas, 1985, Estimación de Crecidas de Diseño en Cuencas Mistas Pluvionivales, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.
- Corps of Engineers, 1956, Snow Hydrology.
- Braun L., 1985, Simulation of Snowmelt-Runoff in Low Land and Lower Alpine Regions of Switzerland, ZGS-21.

CUADRO No 1: DATOS DE UBICACION Y PROMEDIOS ESTADISTICOS

ESTACION	LAT. Sur	ELEVAC. msnm	REGIST. años	SERIE CON PPP >10mm			SERIE CON PPP >25mm		
				TEMP. MEDIA oC	DS	CANTIDAD EVENTOS	TEMP. MEDIA oC	DS	CANTIDAD EVENTOS
1 EMBALSE LAUTARO	27.97	1110	17	16.0	4.5	17	18.1	4.9	5
2 CONAY	28.97	1450	26	13.8	3.7	48	13.9	4.2	24
3 RIVADAVIA	29.97	850	17	14.3	4.2	44	14.6	4.3	14
4 EMBALSE LA LAGUN	30.20	3100	17	2.2	4.0	43	-1.2	3.7	13
5 HURTADO	30.28	1200	12	12.8	3.4	48	11.9	3.1	21
6 LA TRANQUILLA	31.90	975	25	12.7	3.9	120	12.1	4.1	62
7 HACIENDA AlicaHU	32.33	835	22	11.1	3.6	137	10.9	3.1	58
8 VILCUYA	32.87	1100	26	8.2	2.8	212	8.3	2.4	87
9 EMBALSE EL YESO	33.68	2475	28	2.5	4.2	248	3.2	3.9	85
10 LAS MIELOSAS	33.90	1527	15	8.2	4.2	215	7.8	3.7	88
11 CONVENTO VIEJO	34.77	245	19	9.8	2.5	338	9.9	2.3	149
12 COLORADO	35.62	400	20	8.9	2.9	564	9.1	2.9	333
13 EMBALSE DIGUA	36.25	380	17	8.3	2.5	471	8.3	2.5	271
14 LA PUNILLA	36.67	840	26	5.7	3.4	692	5.5	3.4	400
15 DIGUILLIN	36.87	710	26	7.7	3.0	912	7.6	3.1	522
16 QUILACO	37.68	225	26	8.2	2.7	814	8.2	2.6	353

CUADRO No 2

DISTRIBUCION EMPIRICA DE LA FRECUENCIA ACUMULADA DE LA TEMPERATURA MINIMA NORMALIZADA, EN DIAS CON PRECIPITACION MAYOR QUE 10 mm (T_{min} - T_{min.med})

PROB. EXC. %	LAUTARO	CONAY	HIVADAVIA	LA LAGUNA	HURTADO	TRANQUILLA	ALICAHUE	VILCUYA
2	-	-	-	-	-	7.2	6.3	5.3
5	-	6.1*	7.1*	7.7*	7.0*	5.5	4.7	4.4
10	5.9	4.7	4.9	5.1	4.8	4.3	4.3	3.7
20	4.2	2.7	3.0	4.5	3.7	2.7	2.5	2.7
30	2.7	2.4	1.7	2.3	2.0	1.6	1.6	1.8
40	0.9	0.7	0.1	1.9	0.7	1.0	0.8	0.9
50	-1.1	-0.3	-0.4	0.7	-0.3	0.2	-0.1	0.2
60	-2.7	-1.3	-0.8	0.1	-1.3	-1.0	-0.9	-0.4
70	-3.6	-2.1	-1.0	-0.5	-2.1	-1.8	-1.7	-1.1
80	-6.4	-3.4	-2.6	-1.3	-2.8	-3.0	-2.7	-2.3
90	-7.3	-4.7	-3.6	-3.3	-5.3	-4.5	-3.7	-4.2

PROB. EXC. %	EL YESO	MELÓSAS	C.VIEJO	COLCHADO	DIGUA	PUNILLA	DIGUILLIN	QUILACO
2	7.4	8.6	5.1	6.6	6.2	7.1	7.4	5.9
5	6.4	7.1	4.2	5.7	5.3	5.6	6.2	5.0
10	5.2	5.1	3.4	4.5	4.2	4.1	4.4	4.0
20	3.7	2.6	2.2	2.9	3.0	2.6	2.9	2.9
30	2.1	1.6	1.6	1.7	1.6	1.6	1.8	1.4
40	1.4	0.6	0.9	0.7	1.2	0.6	0.6	0.0
50	0.4	0.1	0.5	0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.6
60	-1.1	-0.9	-0.3	-0.5	-0.8	-0.9	-1.0	-1.6
70	-2.5	-1.4	-0.9	-1.5	-1.8	-1.9	-1.8	-2.3
80	-3.6	-3.4	-1.9	-2.6	-2.8	-2.9	-2.6	-4.4
90	-5.2	-3.9	-3.6	-4.2	-4.0	-3.9	-3.9	-4.9

PROB. EXC. %	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	H(mm)
2	6.6	6.6	5.1	1329
5	5.5	7.1	4.2	1093
10	4.4	5.2	3.4	889
20	3.0	4.5	2.2	595
30	1.6	2.4	1.4	363
40	0.8	1.9	0.0	161
50	0.0	0.7	-0.6	8
60	-0.8	0.1	-1.6	-169
70	-1.6	-0.5	-2.5	-325
80	-2.8	-1.3	-4.4	-564
90	-4.2	-3.3	-5.3	-839

*: Valores no incluidos en el calculo del promedio y en el rango.

CUADRO No 3: VALORES MEDIOS EN ESTACIONES SELECCIONADAS

ESTACION	PRECIP. mm/d	Tmax oC	Tmin oC	Tmed oC	Tmed-Tmin oC	Tmed-Tmax oC	LNmed* ms/m
1 EMBALSE LAUTARO	23,2	23,8	8,1	16,0	7,9		2531
2 CONAY	27,5	20,3	7,3	13,8	6,5		2718
3 EMBALSE LA LAGUNA	23,7	7,8	-3,4	2,2	5,6		2211
4 RIVADAVIA	22,2	21,0	7,3	14,1	6,9		2102
5 HURTADO	28,4	19,3	6,3	12,8	6,5		2257
6 LA TRANQUILLA	28,6	19,5	6,0	12,7	6,8		1966
7 HACIENDA ALICAHUE	24,8	16,3	5,7	11,0	5,3		1776
8 VILCUYA	25,7	11,3	5,1	8,2	3,1		1919
9 LAS MELOSAS	32,1	13,0	3,4	8,2	4,8		2000
10 EMBALSE EL YESO	25,0	6,3	-1,4	2,5	3,9		1999
11 CONVENTO VIEJO	28,7	12,5	6,9	9,7	2,8		1433
12 EMBALSE DIGUA	33,9	12,8	3,8	8,3	4,5		944
13 COLORADO	36,1	13,3	4,3	8,8	4,5		1068
14 LA PUNILLA	33,0	10,5	0,9	5,7	4,8		815
15 DIGUILLIN	36,4	12,7	2,6	7,6	5,0		1037
16 QUILACO	26,2	16,1	4,1	10,1	6,0		845

*: Cálculo de la LN correspondiente al uso de la temperatura mínima
(Tu=1 oC y GT=-0,5 oC/100m)









