

Figura N°6

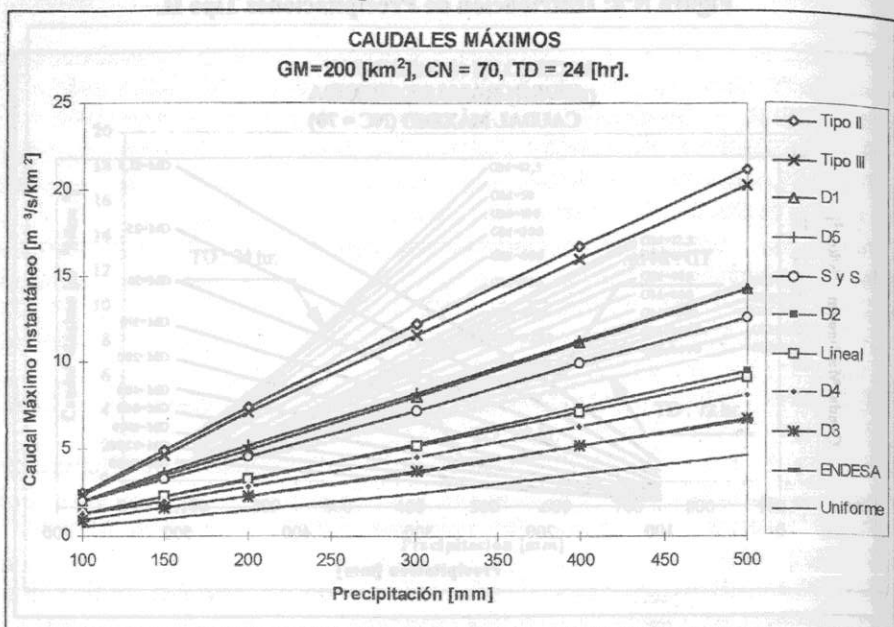
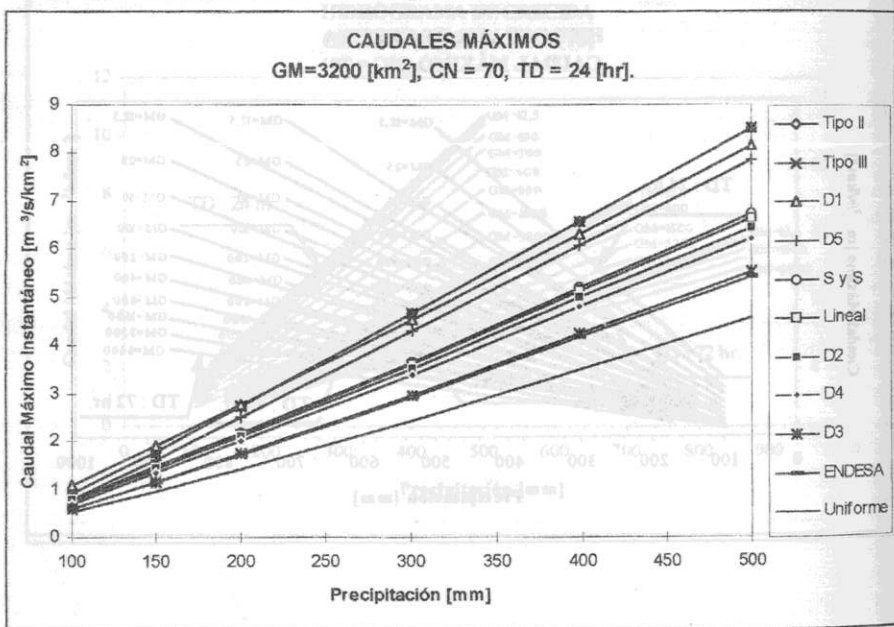


Figura N°7



**PRONOSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO EN LA CUENCA DEL MAULE  
CON DATOS DE ENOS Y COBERTURA NIVAL**

Bonifacio Fernández Larrañaga<sup>1</sup>  
Daniel Tripodi<sup>2</sup>

**RESUMEN**

Se analiza el interés de incorporar los datos sobre la evolución de la cobertura de nieve e indicadores del fenómeno ENOS ("El Niño" Oscilación del Sur) en los sistemas de pronósticos de caudales de deshielo en la cuenca alta del río Maule, en la zona central de Chile, de 5600 km<sup>2</sup>, con elevaciones entre los 440 y los 4000 msnm. La cobertura nival se estima en base a imágenes del sensor AVHRR, montado en satélites NOAA, superpuestas a un modelo digital de la cuenca, lo que permite obtener series cronológicas del área cubierta de nieve según diferentes elevaciones y orientaciones. Los datos del fenómeno ENOS corresponden a las anomalías de temperatura del Pacífico ecuatorial (zona 3). Para el pronóstico se utiliza un esquema basado en funciones de transferencia de múltiples entradas para estimar los caudales mensuales, y modelos de estimación de volúmenes totales en combinación con métodos de desagregación para estimar la onda de deshielo. En esta cuenca se observa que la incorporación de antecedentes sobre ENOS permite mejorar el pronóstico de los volúmenes totales de deshielo, especialmente en años húmedos, mientras que la evolución del área cubierta de nieve mejora los pronósticos a un mes plazo durante la temporada de deshielo.

<sup>1</sup> Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Ingeniero Civil, PUC, Ph. D. Colorado State University.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina, Magister en Ciencias de la Ingeniería, PUC.

## 1. INTRODUCCION

En las cuencas andinas de la zona central de Chile se efectúan pronósticos de los caudales de deshielo desde la década del '50, basados en estimaciones de la cantidad de nieve disponible a fines del invierno de acuerdo a información de rutas de nieve, registros de precipitaciones durante esos meses y otros indicadores, tanto para fines de generación hidroeléctrica, como para la gestión de sistemas de riego, (DGA-CIRH, 1997). Una evaluación general de estos sistemas de pronóstico revela dificultades para conocer con razonable precisión las características de la cobertura nival en base a datos proporcionados por las rutas de nieve, así como imprecisiones en temporadas especialmente críticas de sequía. Durante los últimos años ha habido gran cantidad de información sobre los fenómenos climáticos como "El Niño", "La Niña" o el fenómeno más global del conjunto océano-atmósfera designado como ENOS ("El Niño" Oscilación del Sur) y su impacto en el comportamiento de los recursos hídricos (Rutllant y Fuenzalida, 1991; Aceituno y Garreaud, 1995). También se han popularizado nuevas técnicas cada vez más económicas de percepción remota para estimar propiedades de la cobertura nival gracias al apoyo satelital (Baumgartner y Apfl, 1995; Rango y Martinec, 1997). Se supone que el nuevo conocimiento generado alrededor de estos dos hechos debiera permitir mejorar de manera sustancial el pronóstico de caudales de deshielo en las cuencas andinas del Pacífico sur.

Según varios autores, (Martinec et al., 1983, 1991; Baumgartner et al., 1987) en cuencas de montaña el tamaño del área cubierta de nieve es un claro indicador de la magnitud de la cantidad de recursos hídricos almacenados. El área cubierta de nieve depende de una serie de factores que afectan la temperatura del manto y la radiación solar incidente, los que a su vez están condicionados por la pendiente, orientación y elevación de cada punto. En cuencas de montaña resulta difícil ponderar el efecto combinado de estos factores, incluyendo situaciones como la sombra de montes cercanos que pueden disminuir significativamente el flujo diario de radiación solar incidente, a menos que se realice un análisis detallado para cada punto. Para su estimación se han elaborado relaciones entre la altura de la llamada línea de nieve y relaciones hipsométricas, sobre la base de observaciones directas o con la temperatura del aire, o mediante fotografías aéreas (Gray y Male, 1981). Actualmente la observación desde satélites permite obtener medidas precisas y relativamente continuas de la cobertura nival casi para cualquier cuenca en cualquier instante, aunque persisten algunas dificultades de interpretación dada la existencia de nubes y otros fenómenos (Maxson et al., 1996; Simpson et al., 1997). Este tipo de información ha permitido desarrollar modelos de pronóstico de caudales de deshielo en cuencas de montaña (Martinec et al., 1983, Singh, 1995). Recientemente la empresa Colbún Machicura SA ha decidido impulsar la gestión de sus recursos apoyada en un mayor número de mediciones, instalando, en una primera etapa, plataformas nivo-meteorológicas en la parte alta de la cuenca, cuyos datos serán empleados como fuente de información básica para la modelación hidrológica (Díaz et al., 1998).

En este artículo se analiza la utilidad de incorporar en los sistemas de pronóstico de caudales de deshielo en la cuenca del río Maule, Chile, la información proporcionada por imágenes satelitales sobre el área cubierta de nieve y su evolución temporal, en combinación con un mapa digital de la cuenca, lo que permite disponer de diversas series cronológicas que caracterizan el fenómeno. Al mismo tiempo interesa evaluar si la información sobre el comportamiento de ENOS y sus indicadores disponibles son un aporte efectivo para esos pronósticos. Para efectuar una comparación cuantitativa se utiliza un esquema de pronóstico basado en funciones de transferencia de múltiples entradas para los caudales mensuales, y modelos de estimación de

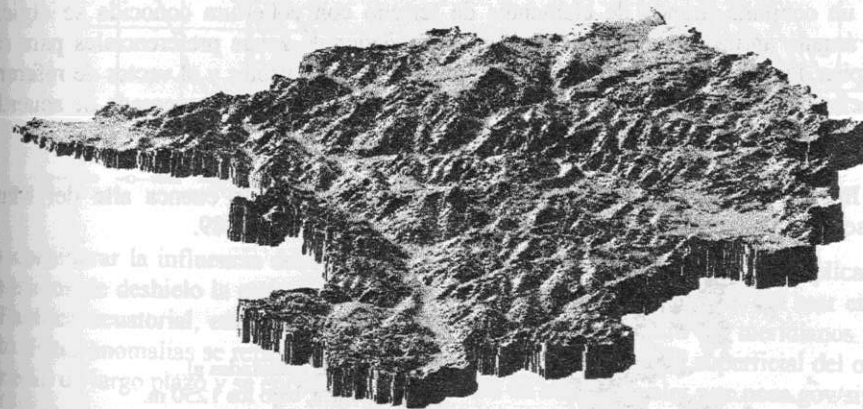
volúmenes totales en combinación con métodos de desagregación para estimar la onda de deshielo.

## 2. LA CUENCA DEL RIO MAULE

La cuenca del río Maule se ubica en la parte central de Chile y se extiende desde la divisoria continental de Los Andes hasta el océano Pacífico, con una superficie total de 20295 km<sup>2</sup> y elevaciones máximas que alcanzan los 4000 metros de altura. Para este estudio el interés se centra en la parte alta de esta cuenca: el sector cordillerano de sólo 5600 km<sup>2</sup> que desagua en el valle central a una altura de 440 msnm. En esta cuenca la precipitación anual promedio supera los 2500 mm. Las lluvias, concentradas fundamentalmente en los meses de otoño e invierno, coinciden con la época de menores temperaturas, de manera que parte importante de ellas caen en forma de nieve y quedan almacenadas hasta el inicio de la primavera, cuando comienzan los deshielos que se prolongan hasta bien entrado el verano.

Actualmente en esta cuenca, al igual que en otras del país, se efectúan pronósticos de caudales de deshielo a mediano plazo al término del invierno para estimar los volúmenes totales que se espera escurrirán durante la primavera y el verano, así como su distribución mensual. La información para estos pronósticos se basa en los datos de rutas de nieve en las que se mide la profundidad y densidad en intervalos de 30 días comenzando poco antes de la fecha esperada de la máxima acumulación y extendiéndose durante toda la temporada de derretimiento. Los datos que estas rutas de nieve han entregado desde 1953 han permitido disponer de valiosa información sobre la variabilidad interanual de la acumulación nival, el inicio y término de la temporada de deshielo y valores aproximados de las tasas de derretimiento.

Figura 1.- MDE de la cuenca alta del Maule.



Con el fin de analizar en detalle el comportamiento de la radiación solar en la cuenca alta del Maule, y poder definir series cronológicas de área cubierta de nieve con diferentes características, se confeccionó un Modelo Digital de Elevaciones, que se presenta en la Figura 1, basado en información cartográfica a escala 1/25000 con curvas de nivel cada 25 m. El MDE resultante posee 6,4 millones de celdas de 30 m de lado cada una, cubriendo 5700 km<sup>2</sup>. Utilizando este modelo es posible analizar detalladamente propiedades como la elevación de cada subcuenca, la orientación, pendiente y otras de interés.

### 3. ANTECEDENTES DEL AREA CUBIERTA DE NIEVE Y ENOS

Para estimar el área cubierta de nieve en la cuenca se recurrió a las imágenes que provee el sensor AVHRR de los satélites de órbita polar de la NOAA (NOAA, 1997). Este tipo de imágenes ha sido utilizado ampliamente para estos fines en muchas cuencas alrededor del mundo (IAHS, 1991, 1997; Rango y Shalaby, 1998). Su utilidad está dada por una razonable resolución temporal y espacial. Cada satélite completa 14 órbitas diarias, de manera que con los satélites actualmente operativos se dispone de imágenes de un mismo sitio dos veces por día. El sensor AVHRR es un sensor pasivo de 4 ó 5 canales, que varían entre 0,58 y 12,50 micrómetros. A cada canal le corresponde un sensor que, en promedio, tiene un ángulo de apertura de 1,4 miliradianes, permitiendo una resolución espacial de aproximadamente 1,1 km, con un ancho de barrido de 2399 km, teniendo en cuenta que se desplazan en una órbita promedio de 833 km de altura.

La imagen satelital para una fecha y hora específicas la componen 5 "subimágenes", es decir, una por canal. La estimación del área cubierta de nieve en esta imagen no es inmediata. En los canales visibles, es decir entre 0,4 y 0,7 micrómetros, la cobertura nival se confunde con otras coberturas, como sombras y nubes, lo que hace necesario utilizar varios canales para derivar la cobertura real de nieve. Para este propósito se han desarrollado varios métodos. Los primeros hacían uso de computadoras, cámaras de video y mesas digitalizadoras (Johnstone e Ishida, 1984). El avance tecnológico experimentado en los últimos años ha permitido simplificar el proceso (Maxson et al., 1996; Simpson et al., 1997) mediante un análisis digital basado en la composición de las subimágenes de cada canal. En este proyecto se emplea el denominado algoritmo Teeta, propuesto por Maxson et al. (1996), en el cual se define, para cada elemento del terreno, un vector cuyas componentes son los valores de cada canal, el que se compara con un vector arbitrario de referencia, determinando el ángulo entre ambos. Se supone que igual tipo de coberturas formarán el mismo ángulo, lo que permite identificarlas y clasificarlas con relativo éxito. Para un conjunto grande de elementos de terreno con cobertura conocida se obtienen valores del ángulo agrupados en nubes de puntos alrededor de zonas preferenciales para cada cobertura típica. Para cada elemento el valor del ángulo entre su vector y el vector de referencia permite asociarlo al grupo más cercano. La Figura 2 muestra la imagen procesada de acuerdo a este procedimiento correspondiente al 28 de septiembre de 1989.

Figura 2.- Imagen correspondiente al área cubierta de nieve en la cuenca alta del Maule, clasificada según orientación y altura, para el día 28 de septiembre de 1989.

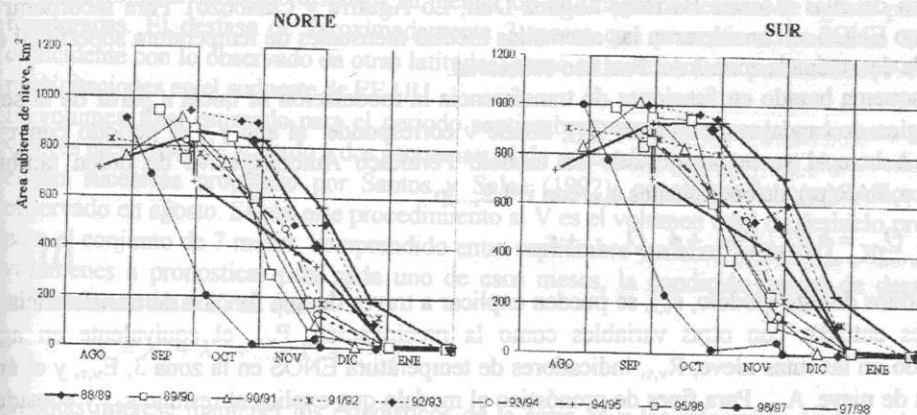


- Laderas orientadas al...
- ... norte, bajo los 1250 m.
  - ... norte, entre 1250 m y 2000 m.
  - ... norte, entre 2000 m y 2500 m.
  - ... norte, sobre los 2500 m.
  - ... sur, bajo los 1250 m.
  - ... sur, entre 1250 m y 2000 m.
  - ... sur, entre 2000 m y 2500 m.
  - ... sur, sobre los 2500 m.

Para el estudio se dispuso de 60 imágenes NOAA de la cuenca del Maule en la época de deshielo para unas diez temporadas. Estas imágenes se superpusieron al mapa de orientaciones de la cuenca, derivado del análisis del MDE. Posteriormente el resultado de esta superposición fue discriminado según alturas de acuerdo a bandas definidas bajo 1250 m, entre 1250 y 2000 m, entre 2000 y 2500 m y sobre los 2500 m, para orientaciones norte y sur. Este procedimiento permitió obtener 8 series cronológicas de cobertura nival clasificada según altura y orientación. La evolución de esta serie para las temporadas en que se dispone de información se muestra en la Figura 3.

Las series cronológicas permiten analizar las curvas de recesión temporal del área cubierta de nieve y determinar cuál de ellas es la que entrega mejores antecedentes para mejorar el pronóstico. En este caso la serie que muestra una mayor varianza entre temporadas y es consistentemente más confiable es la definida por el área cubierta de nieve entre los 2000 y los 2500 msnm, con orientación norte. Se aprecia que la pendiente de las curvas de recesión es relativamente constante y que las mayores diferencias se deben al instante en que se inicia el derretimiento en cada temporada.

Figura 3.- Curvas de evolución del área cubierta de nieve, en km<sup>2</sup>, en la cuenca alta del Maule entre 2000 m y 2500 m, para laderas orientadas al Norte y al Sur, durante la temporada de derretimiento.



Para considerar la influencia del fenómeno ENOS se incluyó como variable explicativa en los pronósticos de deshielo la serie de anomalías de la temperatura superficial del mar en la zona 3 del Pacífico ecuatorial, entre los paralelos 5° Norte y 5° Sur y entre los meridianos 90° y 180° Oeste. Estas anomalías se refieren a la diferencia entre la temperatura superficial del océano y su promedio de largo plazo y se encuentran disponibles en <http://shoveler.wrc.noaa.gov/sites/nino/>.

### 4. MODELOS PARA EL PRONOSTICO Y RESULTADOS

Para estudiar la influencia del área cubierta de nieve y el fenómeno ENOS en el pronóstico de los recursos hídricos durante la temporada de deshielo en la cuenca alta del Maule se plantean dos esquemas complementarios. El primero efectúa un pronóstico de los volúmenes que se esperan durante toda la temporada, normalmente de septiembre a marzo, considerando la información disponible en agosto, que es la época en que habitualmente se termina la acumulación de nieve en

la parte alta de la cuenca. Esta modelación entrega una estimación del volumen total y de la distribución mensual de la onda de derretimiento. Posteriormente para cada mes se modifica la estimación con modelos de pronóstico a un mes plazo, en los cuales se incorporan mes a mes nuevos antecedentes a medida que avanza la temporada y se dispone de la información de lo ocurrido durante el mes anterior.

La estimación de temporada se ha hecho con un modelo de Función de Transferencia de múltiples entradas (Box y Jenkins, 1976; Hipel y MacLeod, 1994) construido a partir de un modelo autorregresivo periódico para los caudales mensuales, cuyos residuos han sido explicados incorporando sucesivamente diferentes variables exógenas como las precipitaciones, rutas de nieve, condiciones de ENOS y área cubierta de nieve. Un esquema similar ha sido empleado por Wang y Salas (1991) para construir una función de transferencia periódica en el pronóstico de caudales de deshielo en cuencas de Colorado, EE.UU. Para facilitar la comparación con modelos en uso en la zona, se ha considerado adicionalmente un modelo de regresión múltiple entre el volumen total de derretimiento y antecedentes disponibles sobre la precipitación de invierno, acumulación máxima en las rutas de nieve y ENOS. Para la serie de caudales se emplearon los registros de la estación fluviométrica de Maule en Armerillo, ubicada prácticamente a la salida de la cuenca, desde 1940; la precipitación corresponde a la observada en Cipreses, mientras la información sobre rutas de nieve considera el promedio mensual del equivalente en agua medido en cuatro de ellas (Meseta Barroso, Laguna Dial, Lo Aguirre y Calabozo). Para incorporar el fenómeno ENOS se consideraron las anomalías medias mensuales de temperatura superficial del mar en la denominada zona 3 del Pacífico ecuatorial.

En el esquema basado en funciones de transferencia la modelación se inicia a partir de la serie cronológica de caudales mensuales,  $Q_{v,\tau}$ , donde  $v$  corresponde al año y  $\tau$  al periodo con  $\tau=1, 2, \dots, 12$ , a la cual se le ha ajustado un modelo Periódico Autorregresivo de orden también periódico, PAR( $p$ ), de coeficientes  $\phi_{i,\tau}$ , con  $i=1, 2, \dots, p$ :

$$Q_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Q_{v,\tau-1} + \dots + \phi_{p,\tau} Q_{v,\tau-p} + \varepsilon_{v,\tau} \quad (1)$$

Los residuos de este modelo,  $\varepsilon_{v,\tau}$ , se pueden explicar a través de una función de transferencia de múltiples entradas con otras variables como la precipitación,  $P_{v,\tau}$ , el equivalente en agua observado en las rutas nieve,  $R_{v,\tau}$ , indicadores de temperatura ENOS en la zona 3,  $E_{v,\tau}$ , y el área cubierta de nieve,  $A_{v,\tau}$ . Para fines de pronóstico el modelo que explica al residuo  $\varepsilon_{v,\tau}$  y considera todas las variables involucradas puede expresarse como:

$$\varepsilon_{v,\tau} = W(B)P_{v,\tau} + V(B)R_{v,\tau} + U(B)E_{v,\tau} + S(B)A_{v,\tau} + a_{v,\tau} \quad (2)$$

donde  $W(B)$ ,  $V(B)$ ,  $U(B)$  y  $S(B)$  son polinomios estacionarios en  $B$  de diferente orden y similar estructura, del tipo:

$$W(B) = w_0 + w_1 B + \dots + w_s B^s \quad (3)$$

siendo  $B$  el típico operador de retardo tal que  $B^n z_t = z_{t-n}$  (Box y Jenkins, 1976).

En cada etapa en que se ha agregado una nueva variable explicativa se ha supuesto que los parámetros ya estimados del modelo permanecen invariables de acuerdo a la estimación efectuada, de manera que dados los residuos se calculan sólo los nuevos parámetros para la variable agregada, con la información disponible para ello. Esto permite aprovechar toda la información disponible para cada variable, ya que las series cronológicas de datos son de

diferente longitud. Para la estimación de los parámetros de caudales se han empleado las series cronológicas mensuales desde 1940 hasta 1995, mientras que para el área cubierta de nieve sólo se ha dispuesto de diez años desde mediados de la década del '80. Con estos modelos se efectúa un pronóstico a un mes de plazo contando con los antecedentes hasta el mes anterior. Para el pronóstico de temporada se efectúan pronósticos a partir de septiembre con la información disponible al inicio de ese mes a uno, dos, hasta siete meses de plazo, con lo que se obtiene la curva de deshielo estimada. A partir de ella, por simple suma, se estima el volumen total de deshielo.

La otra alternativa ha consistido en estimar directamente el volumen total de deshielo de la temporada a partir de una regresión lineal múltiple con los datos conocidos en agosto, como son la precipitación de los meses de invierno, la acumulación promedio de nieve en las rutas de nieve y una serie de temperaturas como indicador representativo del fenómeno ENOS. La mejor regresión se obtuvo al considerar la precipitación de los meses de mayo, junio y julio, la ruta de nieve promedio de julio y las anomalías de temperatura del Pacífico ecuatorial de mayo. Bajo este esquema la inclusión de antecedentes sobre el área cubierta de nieve resulta difícil de emplear para el pronóstico del volumen total de deshielo ya que la información disponible en este estudio cubre solo la etapa de derretimiento y no de acumulación, de manera que los datos no están disponibles en el mes en que debe realizarse el pronóstico. Para que los antecedentes sobre área cubierta de nieve puedan ser incorporados en la ecuación de regresión para el volumen total de deshielo sería necesario disponer, al menos, de las imágenes del mes de agosto para todas las temporadas. El desfase de aproximadamente 3 meses que presenta el fenómeno ENOS sería coincidente con lo observado en otras latitudes, como es lo informado por Roldán (1994) para las precipitaciones en el sudoeste de EE.UU.

El volumen total estimado para el periodo septiembre-marzo fue desagregado para obtener los valores mensuales de acuerdo a dos esquemas: el de promedios mensuales y el procedimiento por etapas sucesivas propuesto por Santos y Salas (1992), considerando como valor inicial lo observado en agosto. Según este procedimiento si  $V$  es el volumen total de deshielo pronosticado para el conjunto de 7 meses, comprendido entre septiembre y marzo, y  $X_1, X_2, \dots, X_7$  son los volúmenes a pronosticar para cada uno de esos meses, la condición básica de desagregación consiste en estimar  $X_i$  tal que:

$$V = X_1 + X_2 + \dots + X_7 \quad (4)$$

Además interesa mantener los estadísticos de la serie  $X_i$  y las relaciones de dependencia entre cada volumen mensual y el valor del volumen total. En el esquema de desagregación propuesto por Santos y Salas (1992) se desagrega el volumen total entre el primer mes, septiembre, y la suma del resto. Posteriormente ésta se desagrega entre octubre y el resto y así sucesivamente hasta que en la última etapa se desagrega sólo entre los meses de febrero y marzo.

Los modelos así confeccionados fueron comparados en el pronóstico de las temporadas de deshielo de los años hidrológicos 1996/97 y 1997/98. Estas dos temporadas son especiales en la cuenca ya que la primera de ellas es una de las más abundantes y la segunda una de las más escasas. En un análisis estadístico de los volúmenes escurridos entre octubre y marzo, considerando la información de 57 años desde 1941 a 1998, la del año 1996/97, con 2175 hm<sup>3</sup> tiene una probabilidad de excedencia de 0,97 y la del 1997/98, con 7299 hm<sup>3</sup> de 0,17. La Tabla 1 compara los resultados obtenidos con los diferentes modelos para los volúmenes totales de la temporada de deshielo. Como puede observarse los modelos de función de transferencia presentan dificultades para lograr un buen pronóstico de volumen total, especialmente en el año

de sequía, con estimaciones siempre por exceso de los volúmenes de deshielo totales, mientras que con la regresión múltiple se estiman valores muy acertados, con errores relativos inferiores al 5%. Esta importante diferencia puede deberse a que los modelos de función de transferencia son en esencia modelos de pronóstico mensual, en los cuales el volumen de temporada se obtiene como una variable secundaria, una vez que se hacen los pronósticos a 1, 2, ..., hasta 7 meses plazo para toda la temporada, cuya suma entrega el pronóstico del volumen total de deshielo. En cambio los modelos de regresión múltiple han sido especialmente contruidos para estimar el volumen total de deshielo.

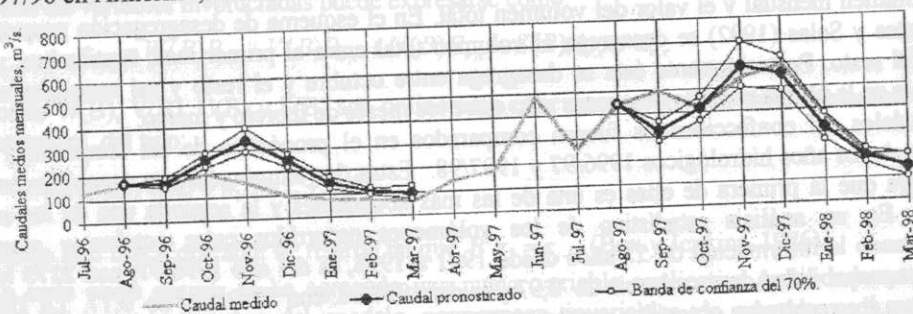
Tabla 1. Comparación de los pronósticos de volúmenes totales de deshielo estimados con los diferentes modelos.

Modelo	Variables	Nro de parám.	Desv. Std. del resid. (1)	Volumen estimado, en hm <sup>3</sup>	Errores, en hm <sup>3</sup>	Errores relativos (2)
Observado 96/97:		-	-	2175	0	0
Observado 97/98:		-	-	7299	0	0
PAR(p <sub>r</sub> )	Caudales	10	0.623	4134 5581	-1959 1718	-0,90 0,24
FT (QP)	Caudales y precip.	12	0.507	4003 6210	-1828 1089	-0,84 0,15
FT (QPR)	Caudales, precip. y ruta de nieve	18	0.499	3565 6334	-1390 965	-0,64 0,13
FT(QPRE)	Caudales, precip., ruta de nieve y ENOS	20	0.497	3528 6621	-1353 678	-0,62 0,09
Regresión múltiple	Precip. may, jun, jul, ruta de nieve de jul y ENOS may	4	0.671	2571 7258	-396 41	-0,18 0,01

(1) Corresponde a la desviación típica del residuo estandarizado

(2) En relación a los volúmenes observados

Figura 4.- Pronóstico típico de temporada, correspondientes a las temporadas de deshielo 1996/97 y 1997/98 en Armerillo, cuenca alta del Maule, utilizando el modelo FT(Q, P, R, E).



La Figura 4 muestra un resultado típico del pronóstico de la onda de deshielo hecho al inicio de la temporada con los modelos mencionados y su comparación con los valores observados. Se

presentan los resultados del pronóstico obtenido aplicando el modelo de función de transferencia entre las variables caudal, precipitación, ruta de nieve y ENOS. En este caso los modelos se comparan de acuerdo al error promedio y la varianza del error para las dos temporadas, considerando el conjunto de 14 meses. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.- Comparación de los valores pronosticados en septiembre para los meses de deshielo (septiembre a marzo) con los diferentes modelos.

Modelo	Variables	Nro. de parám.	Error promedio, en m <sup>3</sup> /s	Desv. Std. del error, en m <sup>3</sup> /s
PAR(p <sub>r</sub> )	Caudales	10	-7	127
FT (QP)	Caudales y precipitaciones	12	-20	110
FT (QPR)	Caudales, precip. y ruta de nieve	18	-11	93
FT(QPRE)	Caudales, precip., ruta de nieve y ENOS	20	-18	87
Regresión múltiple	Desagreg. promedio	-	3	131
	Desagreg. por etapas.	-	2	68

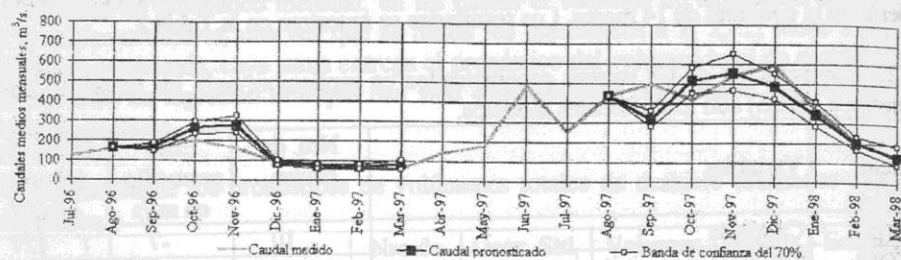
Durante la temporada de deshielo misma es posible efectuar pronósticos a un mes plazo, cuyos resultados se comparan en la Tabla 3. Este tipo de pronósticos, también conocidos como de mediano plazo, permite optimizar la generación hidroeléctrica (Seidel et al, 1987). En esta tabla se puede observar que el modelo de FT que incluye la información proveniente del análisis conjunto del MDE y la cobertura nival compite bastante bien frente a los otros, convirtiéndose en el mejor si se tiene en cuenta la cantidad de parámetros, la desviación típica del residuo y la longitud del registro empleada. Es necesario advertir que en este caso se dispuso de imágenes de cobertura de nieve prácticamente para todos los meses de la temporada de deshielo, desde septiembre hasta el derretimiento total.

Tabla 3.- Comparación de los valores pronosticados a un mes de plazo con los diferentes modelos.

Modelo	Variables	Nro. de parám.	Error prom., en m <sup>3</sup> /s	Desv. Std. del error, en m <sup>3</sup> /s
PAR(p <sub>r</sub> )	Caudales	2	14	91
FT (Q,P)	Caudales y precipitaciones	5	-7	78
FT (Q,P,R)	Caudales, precipitaciones y ruta de nieve	10	-10	72
FT(Q,P,R,E)	Caudales, precip., ruta de nieve y ENOS	12	4	75
FT(Q,P,R,E,A)	Caud., precip., r. de nieve, ENOS y área nival	15	2	69
Regresión múltiple	Desagreg. promedio	-	110	93
	Desagreg. por etapas.	-	46	105

Para este tipo de pronóstico los modelos de regresión para el volumen y su posterior desagregación no son competitivos por la dificultad que enfrentan para adecuarse a la nueva información que se les puede brindar mes a mes. La Figura 5 muestra un resultado típico del pronóstico mes a mes, entre los meses de octubre y marzo, para las dos temporadas y aplicando el modelo de pronóstico de función de transferencia entre las variables caudal, precipitación, ruta de nieve, ENOS y área cubierta de nieve.

Figura 5.- Pronóstico típico mes a mes, correspondientes a las temporadas de deshielo 1996/97 y 1997/98 en Armerillo, cuenca alta del Maule, utilizando el modelo FT(Q,P,R,E,A).



## 5. CONCLUSIONES

Si bien se reconoce la importancia de contar con pronósticos acertados de los volúmenes de deshielo esperados en cuencas de montaña, existen dificultades para disponer de antecedentes significativos de algunas de las variables que intervienen en el proceso, como ocurre con la cantidad de nieve acumulada al inicio de la temporada. Estos problemas se están abordando recurriendo a sensores remotos, como la información que proporcionan satélites NOAA con sensores AVHRR que, en conjunto con un mapa digital de elevaciones de la cuenca, permite obtener series de cobertura nival prácticamente en cualquier época del año. Además se comprueba que la evolución del fenómeno ENOS influye sobre la hidrología en cuencas de Los Andes del Pacífico sur.

Se analiza la incorporación de estos dos aspectos para obtener pronósticos más precisos del volumen total expresado para toda la temporada y de los caudales medios mensuales producidos por el derretimiento de nieve durante la temporada de primavera y verano en la cuenca del río Maule. Para el pronóstico de volúmenes totales hechos al inicio de la temporada de deshielo, la incorporación del fenómeno ENOS en modelos de pronóstico de volumen total de deshielo, basados en regresiones múltiples, entrega valores muy acertados tanto en temporadas de sequía como de abundancia. No ocurre lo mismo con modelos basados en funciones de transferencia mensuales, con los que se estiman valores muy superiores a los observados. Dada la poca información disponible sobre el área cubierta de nieve a principios de agosto, esta variable no pudo incorporarse en la modelación previa a la temporada. En cambio, durante el deshielo, su inclusión a medida que avanza la temporada en modelos de función de transferencia permite mejorar el pronóstico a 1 mes plazo. A su vez este tipo de modelos parece ser más adecuado para el pronóstico a mediano y corto plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo presenta resultados parciales de un proyecto sobre pronóstico de caudales de deshielo en la cuenca alta del Maule, desarrollado para la empresa Colbún Machicura S.A., en conjunto entre la Pontificia Universidad Católica de Chile y Colorado State University, facilitado por un proyecto de colaboración académica entre ambas universidades financiado por la U.S. Information Agency.

## REFERENCIAS

1. Aceituno, P. y Garreaud (1995) *Impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en regímenes fluviométricos andinos*. *Revista de la Sociedad Chilena de Hidráulica*, Volumen 10, N°2, 63-76.
2. Baumgartner, M. F. y Apfl, G. M. (1997) *Remote Sensing, geographics information system and snowmelt runoff models- an integrated approach* en *IAHS Publication N°242*, editado por M. F. Baumgartner, Schultz, G. A y Jonhson, A. I., 73-82.
3. Baumgartner, M. F., Seidel, K. and Martinec, J. (1987) *Toward snowmelt runoff forecast based on multisensor remote sensing information*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol GE-25 N°6, Nov 1987.
4. Box, G. y Jenkins, G. (1976) *Time series analysis, forecasting and control*, Holden Day.
5. DGA-CIRH (1997) *Pronósticos para la temporada de deshielo 1997-1998*, Centro de Información de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
6. Diaz, G., Fernández, B y Pasch, J. R. (1998) *Selección de áreas potenciales para el monitoreo de nieve en cuencas de montaña*, *II Simposio de recursos hídricos del Cono Sur*, Santa Fe, Argentina.
7. Escobar, F., Bales, R. y Pozo, V. (1997) *Aplicación de un modelo de derretimiento de nieves (SRM3-2) usando SIG e imágenes LANDSAT y NOAA*, *Memorias del XIII Congreso Chileno de Hidráulica*, 65-74.
8. Gray, D. M. y Male, D. H. (1981) *Handbook of snow. Principles, processes, management & uses*, Pergamon Press, Canada Ltd.
9. Hipel, K. W. y McLeod, A. R. (1994) *Time series modeling of water resources and environmental systems*, *Developments in Water Sciences 45*, Elsevier, N. Y.
10. IAHS (1991) *Snow, Hydrology and Forest in High Alpine Areas*, *IAHS Publication N°205*, editado por Baumgartner et al.
11. IAHS (1997) *Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems*, *IAHS Publ. N°242*, edited by Baumgartner et al.
12. Johnstone, K. e Ishida, S (1984) *An analogue/digital procedure for the mapping of snow cover from satellite imagery*, *Canadian Climate Centre*, Report N°84-9.
13. Martinec, J., Rango, A. and Malor, E. (1983) *The Snowmelt Runoff Model (SRM). User's Manual*, Nasa Ref. Pub. 1100, Washington D. C.
14. Martinec, J., Seidel, K., Bunkart, U. Y Baumann, R. (1991) *Areal modelling of snow water equivalent based on remote sensing techniques*. *IAHS Publication N°205*, 121-129.
15. Maxson, R. W., Allen, M. W., Szeliga, T. L. (1996) *Image classification by comparison of angles created between multi-channel vectors and an empirical reference vector*, *National Operational Hydrologic Remote Sensing Center of the National Wether Service, US*.
16. NOAA (1997) *NOAA Polar Orbiter Data User's Guide*, Revision, compiled and edited by Katherine B. Kidwell.
17. Rango, A. J. y Martinec, J. (1997) *Water storage in mountain basins from satellite snowcover monitoring*, en *IAHS Publication N°242*, editado por M. F. Baumgartner, Schultz, G. A y Jonhson, A. I., 83-91.

18. Rango, A. y Shalaby, A. (1998) *Operational applications of remote sensing in hydrology: succes, prospects and problems*, Hydrological Sciences Journal V 43, N°6, Dic. 1998, 947-968.
19. Roldán, J. (1994) *Tendencias actuales en el modelado de la precipitación diaria*. Ingeniería del Agua. Vol. 1, N°1, 89-100.
20. Rutllant, J. y Fuenzalida, H. (1991) *Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability asociated within the Southern Oscillation*. Int. Journal of Climatology, Vol. 11, 63-76.
21. Santos, E. y Salas, J. D. (1992) *Stepwise Dissagragation Scheme for Synthetic Hydrology*, J. Hydraulic Eng., vol. 118, N°5, 765-784.
22. Seidel, K., Brusch, W., Steinmeier, Ch. y Martinec, J. (1987) *Real time runoff forecasts for two hydroelectric stations based on satellite snow cover monitoring*, Geoscience and remote sensing. Vol. GE-25, N°6.
23. Simpson, J. J., Stitt, J. R., Sienko, M. (1997) *Improves estimates of areal extent of snow cover from AVHRR data*, Journal of Hydrology 204, 1-23.
24. Singh, Vijay P., ed. (1995) *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publ., USA.
25. Wang, D. C. y Salas, J. D. (1991) *Forecasting streamflow for Colorado River Systems*, Completion Report N°164. Colorado Water Resources Research Institute. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

#### CRITERIOS DE INDEPENDENCIA PROBABILÍSTICA

Bárbara Orellana (\*)

Eduardo Varas C. (\*\*)

#### RESUMEN

Este trabajo analiza la independencia entre variables aleatorias bivariadas por distintos métodos. Tres de los métodos son válidos para cualquier distribución bivariada. En el método de los octantes las probabilidades teoricas están calculadas para la distribución bivariada de valores extremos tipo I pero pueden modificarse para ser usado con otras distribuciones.

Los procedimientos se han aplicado para estudiar la independencia entre varias series anuales de caudales máximos diarios registrados en estaciones fluviométricas de la cuenca de los ríos Itata y Bio-Bío. Los resultados muestran el potencial de discriminación de los procedimientos y la consistencia de los resultados que se logran.

(\*) Estudiante de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile  
 (\*\*) Profesor Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile