

# COBERTURA NIVAL Y ENOS EN EL PRONÓSTICO DE CAUDALES EN CUENCAS DE MONTAÑA

Daniel Tripodi y Bonifacio Fernández\*

## Resumen

En este artículo 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 una cuenca de montaña de la región de Los Andes. El análisis se efectúa para la cuenca alta del río Maule, en la zona central de Chile, de 5600 km<sup>2</sup> y 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.

**Palabras clave:** Cobertura nival, pronóstico de caudales, imágenes de satélite, funciones de transferencia, deshielo.

## Introducción

La necesidad de disponer de pronósticos precisos a corto y mediano plazo de la escorrentía generada por el derretimiento de nieve en cuencas de montaña de la región de Los Andes se ha convertido en una componente importante para la gestión de los recursos hídricos en la zona central de Chile. En las cuencas andinas de esta zona 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, datos de precipitaciones registradas 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 las dificultades para conocer con razonable precisión las características de la cobertura nival en base a datos proporcionados por las rutas de nieve, así como impre-

cisiones en temporadas especialmente críticas de sequía o de abundancia. 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.

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

\* Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Casilla 306 Correo 22, Santiago, Chile.

Tel: 56-2-6864341 Fax: 56-2-6865786 e-mail: bfernand@ing.puc.cl

Artículo recibido el 3 de febrero de 1999, recibido en forma revisada el 9 de septiembre de 1999 y aceptado para su publicación el 16 de septiembre de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

(Martinec et al., 1983, 1991; Baumgartner et al., 1987). 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 todos estos factores, incluyendo situaciones como la sombra de montes cercanos que puede 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). La observación desde satélites permite, hoy en día, obtener medidas de alta precisión y relativamente continuas de la cobertura nival, independientemente de las facilidades de acceso, siendo posible disponer de este tipo de antecedentes casi para cualquier cuenca en cualquier instante, aunque persisten algunas dificultades de interpretación debido a la existencia de nubes y otros fenómenos. (Maxson et al., 1996; Simpson et al., 1997). La disponibilidad de este tipo de información ha permitido el desarrollo de modelos de pronóstico de caudales de deshielo especialmente orientados al empleo de datos de este estilo en cuencas de montaña (Martinec et al., 1983, Singh, 1995). Recientemente una de las empresas presentes en el río Maule ha decidido impulsar la gestión de sus recursos apoyada en un mayor número de mediciones para lo cual ha comenzado a instalar una primera etapa de plataformas colectoras de información meteorológica y de características de la nieve 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 cro-

nológicas 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 la comparación 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.

### La cuenca del río 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. La Figura 1 muestra la ubicación de esta cuenca y un mapa de su red hidrográfica principal.

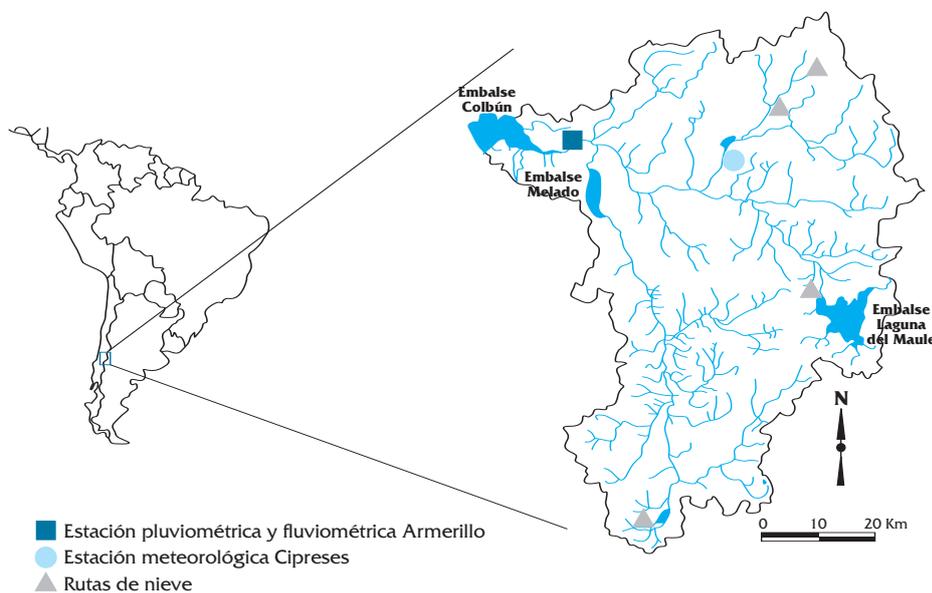


Figura 1: La cuenca alta del Maule

En la cuenca alta del Maule, actualmente una de las de mayor desarrollo hidroeléctrico de Chile, compiten las tres principales empresas generadoras de energía del país, operando un total de ocho centrales con una potencia instalada de 1300 MW y cuatro obras de embalse con casi 3000 hm<sup>3</sup> de volumen de regulación total. Una vez que abandonan

la parte alta de la cuenca las aguas del río se utilizan en el riego de 335.000 hectáreas en la zona del valle central. 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. La Figura 2 muestra la distribución de los caudales medios diarios de uno de sus afluentes. Se puede observar la onda de aporte pluvial en el invierno y la de los deshielos en la primavera y verano, cuyo volumen es apreciable.

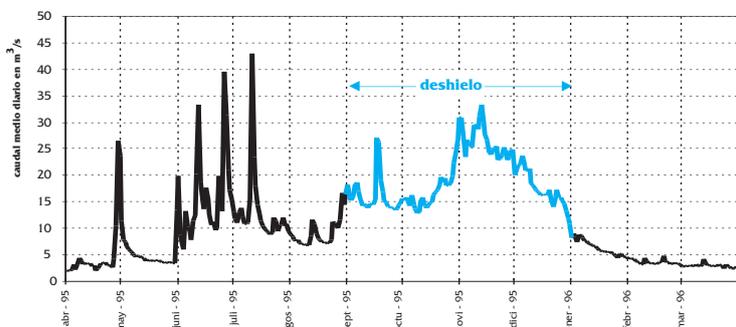


Figura 2: Caudales medios diarios en el río Melado, entre abril de 1995 y marzo 1996

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.

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, MDE, basado en información cartográfica a escala 1/25000 con curvas de nivel cada 25 m. La elevación entre curvas de nivel se obtuvo mediante un modelo de interpolación lineal. Para mejorar la

precisión se agregó información sobre las cumbres, la red de drenaje y otras propiedades de interés. El MDE resultante posee 6,4 millones de celdas de 30 m de lado cada una, cubriendo 5700 km<sup>2</sup>. Se optó por celdas de este tamaño para lograr coincidencia con la resolución de imágenes TM de satélites LANDSAT. Utilizando este modelo es posible analizar detalladamente propiedades como la elevación de cada subcuenca, la orientación, pendiente y otras de interés. La Figura 3 muestra el relieve de la cuenca obtenido del MDE, así como la distribución de elevaciones y orientaciones, y una combinación de ambas propiedades importantes para analizar el comportamiento de la variación del área cubierta de nieve durante la época de derretimiento.

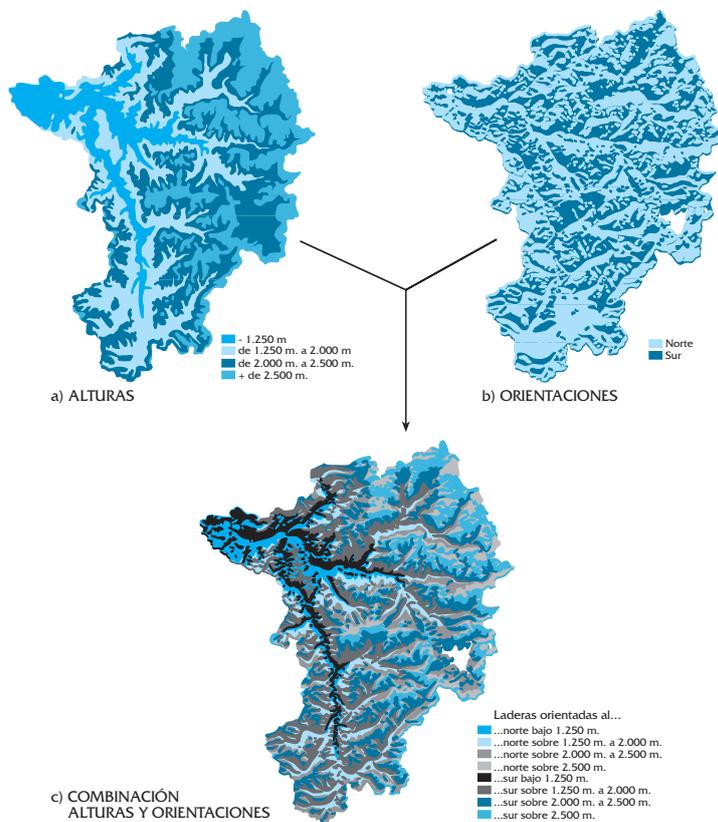


Figura 3: Procesamiento de imágenes a partir del MDE de la cuenca alta del Maule.

### Antecedentes del área 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 (Advanced Very High Resolution

Radiometer) 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 ya que 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, lo que permite una resolución espacial de aproximadamente 1,1 km, con un ancho de barrido de la imagen digital 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.

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, deri-

vado 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, ilustrado en la Figura 3, permitió obtener 8 series cronológicas de cobertura nival clasificada según altura y orientación. La Figura 4 muestra la imagen procesada de acuerdo a este procedimiento correspondiente al 28 de septiembre de 1989.

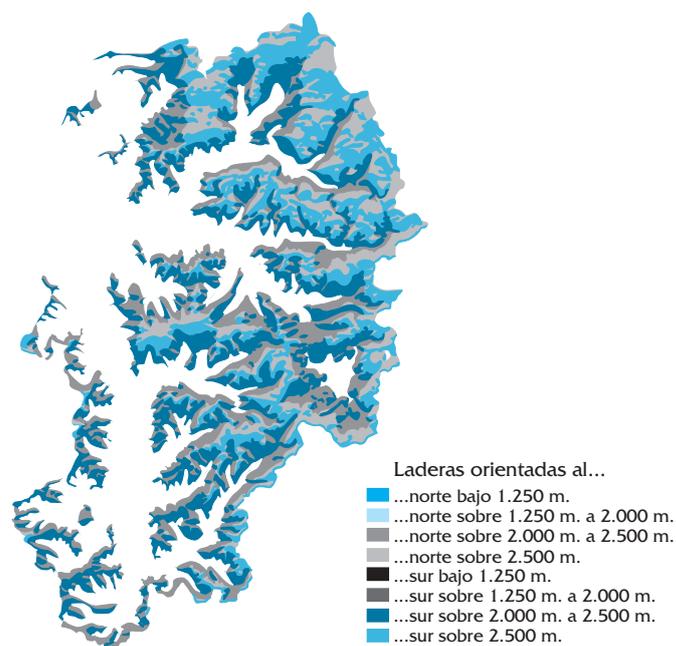


Figura 4: Imagen correspondiente al área cubierta de nieve en la cuenca alta del Maule, clasificada según orientación y altura, el día 28 de septiembre de 1989.

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. La evolución de esta serie para las temporadas en que se dispone de información se muestra en la Figura 5. 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.

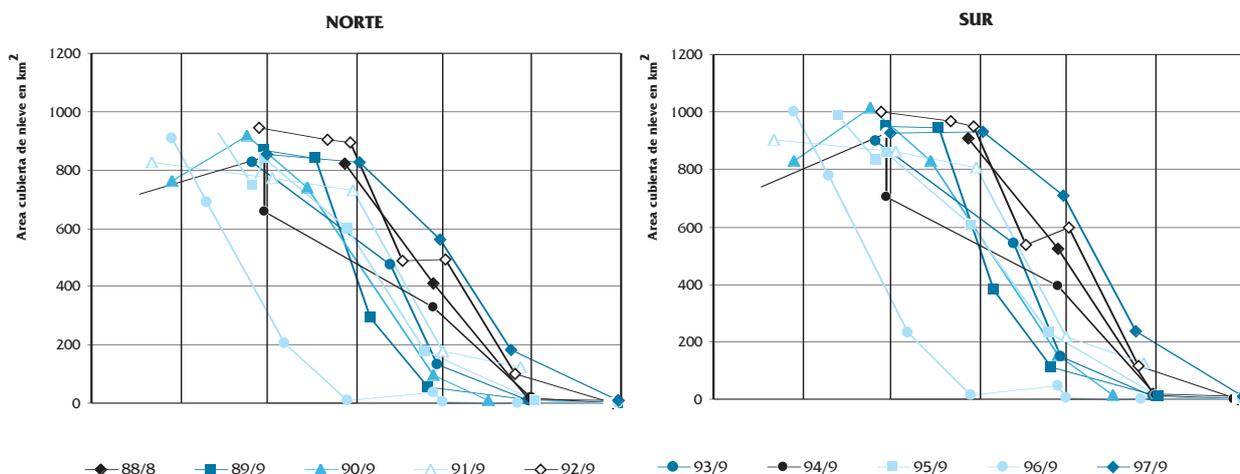


Figura 5: Curvas de evolución del área cubierta de nieve, en km<sup>2</sup>, en la cuenca alta del Maule entre 2000 m y 2500 m, para laderas orientadas al Norte y al Sur, durante la temporada de derretimiento.

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 Internet (<http://shoveler.wrc.noaa.gov/sites/nino/>).

### Modelos para el pronóstico 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 octubre a marzo, considerando la información disponible en septiembre, 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 base en 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,  $PAR(p_\tau)$ , 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. Así por ejemplo para la estimación de los parámetros de caudales se han empleado las series cronológicas mensuales desde 1940 hasta 1995, mientras para el área cubierta de nieve sólo se ha dispuesto de diez años desde mediados de la década del '80, para los cuales se cuenta con datos de información satelital. 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 en septiembre con la información disponible hasta ese mes a uno, dos, hasta seis meses de plazo, con lo que se obtiene la curva de deshielo estimada. A partir de ella, por simple suma, se obtiene el volumen total de deshielo.

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 septiembre, 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 junio, julio y septiembre, la ruta de nieve promedio de agosto y septiembre y las anomalías de temperatura del Pacífico ecuatorial de abril, mayo y junio. 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 cubre fundamentalmente 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. Desafortunadamente en este proyecto sólo se dispuso de muy pocas imágenes en agosto. El desfase de aproximadamente 3 meses que presenta el fenómeno de 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 octubre-marzo fue desagregado para obtener los valores mensuales. Esta desagregación se efectuó 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 septiembre. Según este procedimiento si  $V$  es el volumen total de deshielo pronosticado para el conjunto de 7 meses, comprendido entre septiembre y marzo, y  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_7$  son los volúmenes pronosticados para cada uno de esos meses, la condición básica de desagregación consiste en estimar  $X_i$  tal que:

Además interesa mantener los estadísticos de

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

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. En la primer etapa interesa mantener la dependencia entre septiembre y el valor observado en agosto,  $X_0$ . Sea  $S_i$  el saldo del volumen que queda una vez separado el mes  $i$ :

$$S_i = \sum_{j=i+1}^7 X_j \quad (5)$$

Entonces, para la primera etapa, que corresponde a septiembre, se propone el siguiente modelo de desagregación:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^1 \\ a_2^1 \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} c_1^1 \\ c_2^1 \end{bmatrix} X_0 + \begin{bmatrix} b_{11}^1 & 0 \\ b_{21}^1 & b_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^1 \\ \varepsilon_2^1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde  $\varepsilon^k$  es una variable aleatoria independiente normal de promedio cero y desviación típica  $\varepsilon^k$ . La condición de aditividad (4) impone las siguientes restricciones a los parámetros:

$$\begin{aligned} a_2^1 &= 1 - a_1^1 \\ c_2^1 &= -c_1^1 \\ b_{21}^1 &= -b_{11}^1 \\ b_{22}^1 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Para la etapa k, entre octubre y febrero, el sistema de ecuaciones, con las restricciones de aditividad incorporadas, es:

$$\begin{bmatrix} X_k \\ S_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^k \\ 1 - a^k \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} c^k \\ -c^k \end{bmatrix} X_{k-1} + \begin{bmatrix} b^k & 0 \\ -b^k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^k \\ \varepsilon_2^k \end{bmatrix} \quad (8)$$

Las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) permiten obtener los valores de los volúmenes mensuales  $X_i$  desagregando el volumen total de deshielo pronosticado para la temporada, V. La estimación de los parámetros del modelo de desagregación, que corresponden a los elementos de las matrices  $A^{(k)}$ ,  $B^{(k)}$  y  $C^{(k)}$  en las ecuaciones (6) u (8), se realiza de manera de preservar la dependencia entre las variables involucradas.

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 octubre de 1941 a marzo de 1998, la del año 1996/97, con 1758 hm<sup>3</sup> tiene una probabilidad de excedencia de 0,97 y la del 1997/98, con 6004 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 lo-

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

Modelo	Variables	Número de parámetros	Desviación típica del residuo (1)	Volúmenes estimados, en hm <sup>3</sup>	Errores en hm <sup>3</sup>	Errores relativos (2)
<b>Observado 96/97</b>				<b>1757</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Observado 97/98</b>				<b>6004</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
PAR ( $p_\tau$ )	Caudales	12	0.6227	3420 8040	-1663 -2036	-0.95 -0.34
FT (Q, P)	Caudales y precipitaciones	14	0.5069	3897 7530	-2140 -1526	-1.22 -0.25
FT (Q, P, R)	Caudales, precipitaciones y ruta de nieve	19	0.4985	3403 8088	-1646 -2084	-0.94 -0.35
FT (Q, P, R, E)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve y ENOS	26	0.4968	3376 7039	-1619 -1035	-0.92 -0.17
FT (Q, P, R, E, A)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve, ENOS y área cubierta de nieve.	30	0.4636	3282 7063	-1525 -1059	-0.87 -0.18
Regresión múltiple	Precipitaciones jun., ago., sep.; rutas de nieve de ago., sep. y ENOS abr., jun.	9	0.6707	1853 5809	-96 195	-0.05 0.03

(1) Corresponde a la desviación típica del residuo estandarizado

(2) En relación a los volúmenes observados

grar 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 6 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.

Estos mismos modelos permiten estimar la forma de la onda de derretimiento, es decir los valores mensuales durante la temporada de octubre a marzo. La Figura 6 muestra un resultado típico del pronóstico de la onda de deshielo hecho al inicio de la temporada y su comparación con los valores observados.

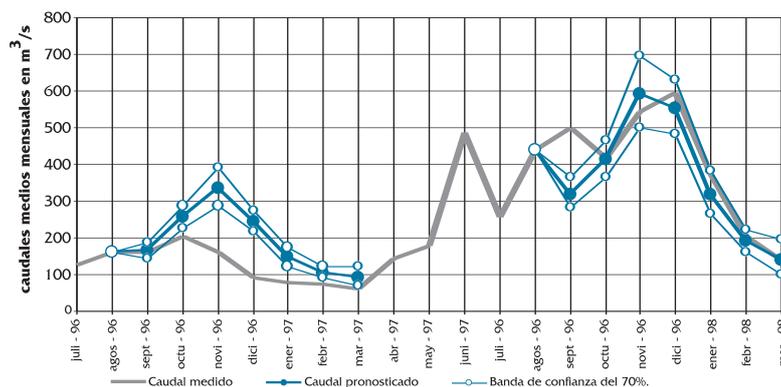


Figura 6: Pronóstico típico de temporada, correspondientes a las temporadas de deshielo 1996/97 y 1997/98 en Armerillo, cuenca alta del Maule, utilizando el modelo FT(Q, P, R, E).

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 12 meses. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

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

Modelo	Variables	Número de parámetros	Longitud del registro en meses (1)	Error promedio en m³/s	Desviación típica del error en m³/s
PAR (p <sub>i</sub> )	Caudales	12	440	-117	82
FT (Q, P)	Caudales y precipitaciones	14	258	-116	67
FT (Q, P, R)	Caudales, precipitaciones y ruta de nieve	19	258	-118	64
FT (Q, P, R, E)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve y ENOS	26	258	-84	68
FT (Q, P, R, E, A)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve, ENOS y área nival.	30	96	-82	66
Regresión múltiple	Desagregación promedio.	9	258	-5	57
	Desagregación por etapas.	9	258	-8	104

(1) Cantidad de meses de la muestra empleada en la estimación de los parámetros del modelo.

Finalmente en la Tabla 3 se comparan los pronósticos efectuados a 1 mes de plazo. Este tipo de

pronósticos, de mediano plazo, permite optimizar la generación hidroeléctrica (Seidel et al, 1987).

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

Modelo	Variables	Número de parámetros	Longitud del registro en meses	Error promedio en m <sup>3</sup> /s	Desviación típica del error en m <sup>3</sup> /s
PAR (p <sub>r</sub> )	Caudales	2	440	-21	64
FT (Q, P)	Caudales y precipitaciones	4	258	-24	55
FT (Q, P, R)	Caudales, precipitaciones y ruta de nieve	11	258	-27	47
FT (Q, P, R, E)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve y ENOS	15	258	-10	60
FT (Q, P, R, E, A)	Caudales, precipitaciones, ruta de nieve, ENOS y área nival.	20	96	-13	50
Regresión múltiple	Desagregación promedio.	9	258	-41	74
	Desagregación por etapas.	9	258	-54	132

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 tem-

porada de deshielo, desde septiembre hasta el derretimiento total. 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 aparece mes a mes. La Figura 7 muestra un resultado típico del pronóstico mes a mes, entre los meses de octubre y marzo, para las dos temporadas.

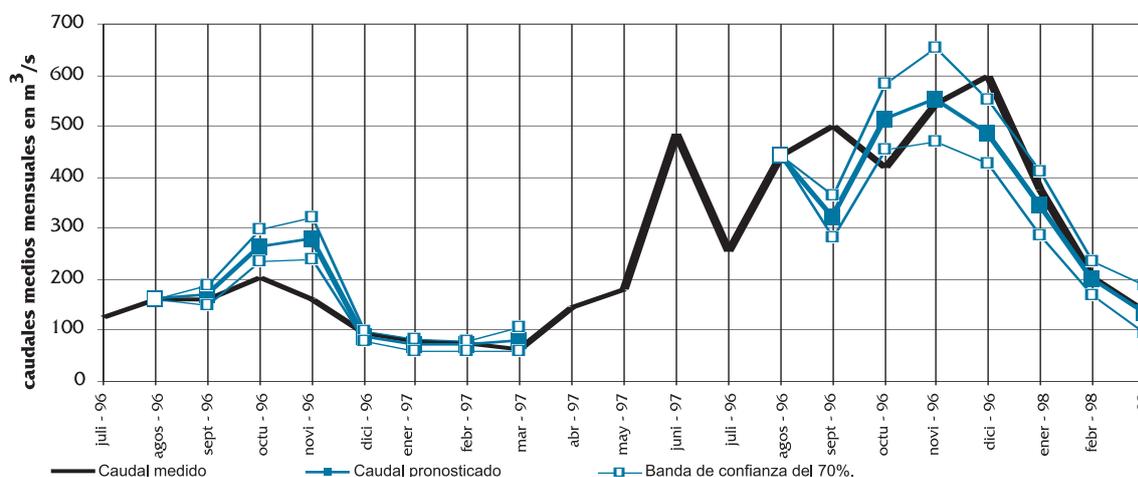


Figura 7: Pronóstico típico mes a mes, correspondientes a las temporadas de deshielo 1996/97 y 1997/98 en Armerillo, cuenca alta del Maule, utilizando el modelo FT(Q, P, R, E, A).

## 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.

En este artículo 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. Se verifica que 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. Debido a la poca información disponible sobre el área cubierta de nieve a principios de septiembre, la incorporación de esta variable en los modelos de pronóstico de los volúmenes totales de deshielo no resulta significativa. En cambio, durante la temporada de deshielo, la inclusión de la evolución del área cubierta de nieve en modelos de función de transferencia permite mejorar el pronóstico a 1 mes plazo, ya que es posible incorporar la información que se consigue a medida que avanza la temporada.

## Agradecimientos

Este artículo presenta resultados de un proyecto sobre pronóstico de caudales de deshielo en la cuenca del Maule desarrollado para la empresa Colbún Machicura S.A., en conjunto entre la Pontificia Universidad Católica de Chile y Colorado State University, el cual ha sido facilitado por un proyecto de colaboración académica entre ambas uni-

versidades financiado por la U.S. Information Agency. Los autores agradecen los valiosos comentarios y sugerencias de los evaluadores del presente artículo.

## Lista de símbolos

ENOS	”El Niño oscilación del Sur.”
$A_{v,\tau}$	Area cubierta de nieve promedio dentro de la cuenca del mes $\tau$ en el año $v$ , entre los 2000 y 2500 msnm con orientación norte.
$E_{v,\tau}$	Temperatura media superficial en la zona 3 del océano Pacífico del mes $\tau$ en el año $v$ , indicador del fenómeno ENOS.
$P_{v,\tau}$	Precipitación mensual del mes $\tau$ en el año $v$ .
$Q_{v,\tau}$	Caudal medio mensual del mes $\tau$ en el año $v$ .
$R_{v,\tau}$	Equivalente de agua promedio en las rutas de nieve del mes $\tau$ en el año $v$ .
PAR( $p_\tau$ )	Modelo Periódico Autorregresivo de orden $p_\tau$ .
$\phi_{i,\tau}$	Coefficiente autorregresivo periódico de orden $i$ en el mes $\tau$
$\varepsilon_{v,\tau}$	Residuo del modelo PAR de caudales del mes $\tau$ en el año $v$ .
FT(Q, P, ...)	Función de Transferencia de las variables Q, P, ...
B	Operador de retardo tal que para la variable $Z_t$ se cumple que $B^n Z_t = Z_{t-n}$ .
W(B)	Polinomio en B de la función de transferencia aplicado precipitaciones.
V(B)	Polinomio en B de la función de transferencia aplicado a la ruta de nieve.
U(B)	Polinomio en B de la función de transferencia aplicado al indicador del fenómeno ENOS

S(B)	Polinomio en B de la función de transferencia aplicado al área cubierta de nieve.
V	Volumen total de deshielo para la temporada.
$X_i$	Volumen de deshielo para el mes i (i = octubre, noviembre, ..., marzo).
$S_i$	Saldo del volumen de deshielo luego del mes i.
$\epsilon_i^k$	Residuos del mes k
a, b, c	Coefficientes de las matrices A, B y C del método de desagregación.

## Referencias

- 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, págs. 63-76.
- 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., págs. 73-82.
- 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.
- Box, G. y Jenkins, G. (1976) *Time series analysis, forecasting and control*, Holden Day.
- 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.
- 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.
- 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*, págs. 65-74.
- Gray, D. M. y Male, D. H. (1981) *Handbook of snow. Principles, processes, management & uses*, Pergamon Press, Canada Ltd.
- 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.
- IAHS (1991) *Snow, Hydrology and Forest in High Alpine Areas*, IAHS Publication N°205, editado por Baumgartner et al.
- IAHS (1997) *Remote sensing and geographic information systems for design and operation of water resources systems*, IAHS Publ. N°242, edited by Baumgartner, M. Et al.
- 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*.
- Martinec, J., Rango, A. and Malor, E. (1983) *The Snowmelt Runoff Model (SRM). User's Manual*, Nasa Ref. Pub. 1100, Washington D. C.
- 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, págs. 121-129.
- 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*.
- NOAA (1997) *NOAA Polar Orbiter Data User's Guide*, Revision, compiled and edited by Katherine B. Kidwell.
- 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., págs. 83-91.
- Rango, A. y Shalaby, A. (1998) Operational applications of remote sensing in hydrology: succes, prospects and problems, *Hydrological Sciences Journal* V 43, N°6, Diciembre 1998, págs 947-968.
- Roldán, J. (1994) Tendencias actuales en el modelado de la precipitación diaria. *Ingeniería del Agua*. Vol. 1, N°1, pp 89-100.
- 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, págs. 63-76.
- Santos, E. y Salas, J. D. (1992) Stepwise Dissagregation Scheme for Synthetic Hydrology, *J. Hydraulic Eng.*, vol. 118, N°5, pp. 765-784.
- Seidel, K., Brsch, 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.
- 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.
- Singh, Vijay P., ed. (1995) *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publ., USA.
- 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.