

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

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

## AGRADECIMIENTOS

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

## REFERENCIAS

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

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

JOSÉ VERGARA AHUMADA<sup>1</sup>

### RESUMEN

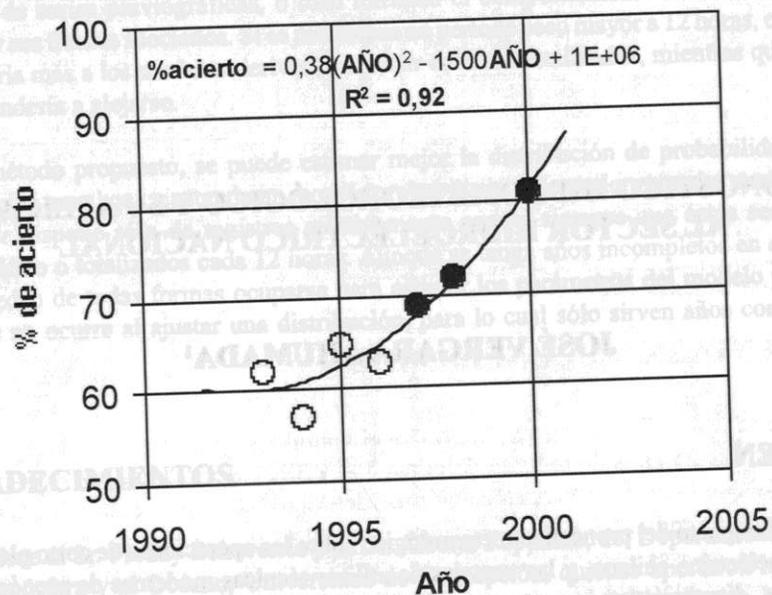
Se evalúa el impacto del pronóstico meteorológico sobre las operaciones de corto plazo en el sector hidroeléctrico chileno, y las ventajas de utilizar técnicas modernas de pronóstico del tiempo para disminuir los impactos negativos y aprovechar de mejor forma los recursos hidráulicos disponibles. El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

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

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

## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de la utilización del pronóstico del tiempo para el manejo de recursos hídricos en el sector hidroeléctrico chileno. Para esto, se analizan los resultados obtenidos durante los últimos cuatro años, desde 1997 a 2001, secuencia que incluye años extremos de la pluviometría chilena, como lo son 1997 y 1998, considerados de El Niño y La Niña, respectivamente.

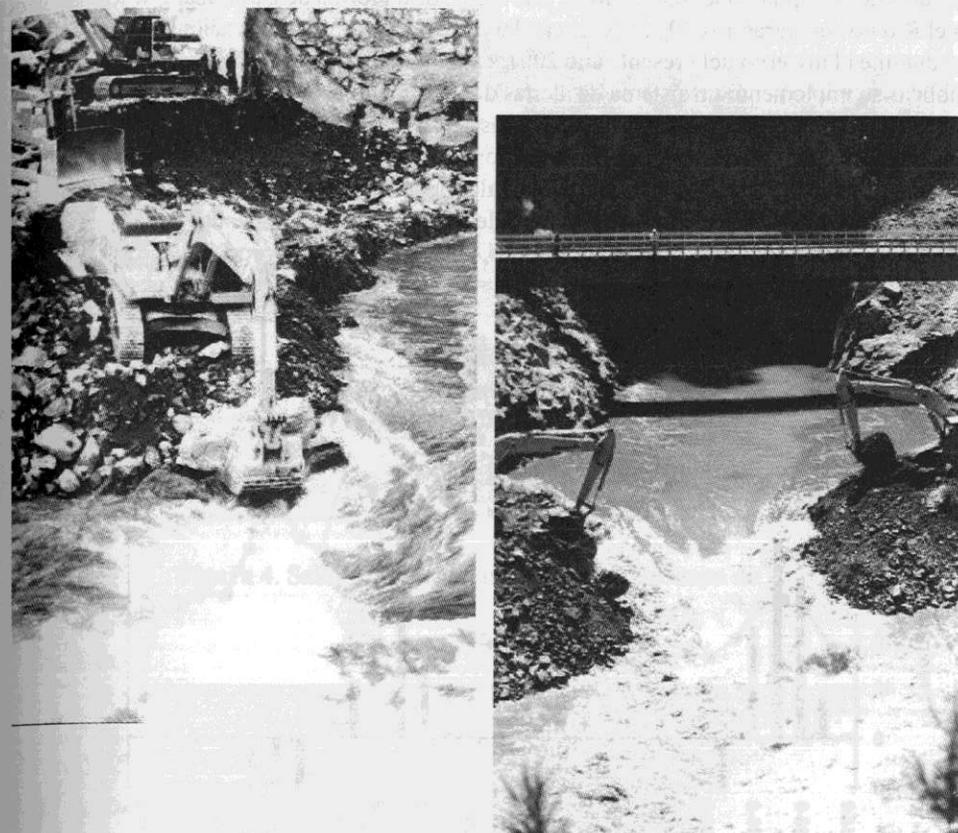


**Figura 1.** Evolución del grado de acierto del pronóstico meteorológico a 24 horas, desde 1993 al 2000. Durante 1997 (círculos negros rellenos) se implementó el primer modelo de pronóstico del tiempo para Chile (adaptado de Vergara *et al.*, 2001).

Desde el punto de vista hidrológico y del pronóstico de caudales, las fuertes pendientes y lo reducido de las áreas que caracterizan a las cuencas del sistema hidroeléctrico chileno, desarrollan las condiciones para generar crecidas extraordinariamente rápidas, con tiempos de respuestas inferiores a un día. Esto se traduce finalmente en que la predictabilidad de los caudales, basada en información puramente hidrológica, se reduce a algunas horas, tiempo insuficiente para tomar medidas respecto de cómo operar centrales hidroeléctricas, o proteger a la población, frente a eventuales crecidas. Por ello, la implementación de un pronóstico de caudales no tiene sentido sin un buen pronóstico cuantitativo de precipitaciones, que incorpore entre otros, la cantidad e intensidad de las precipitaciones asociadas a un temporal. Este pronóstico de precipitaciones sólo puede ser logrado utilizando, en conjunto, modelos numéricos, modelos estadísticos y un análisis sinóptico de la atmósfera.

Por este motivo, y con la ayuda del Proyecto FONDECYT N° 1970507 de 1997, se ha implementado un pronóstico numérico del tiempo para Chile y Sud América, el que se encuentra en etapa operacional desde 1997 (Vergara, 1998). Al pronóstico numérico se le acopla un modelo tipo MOS (*Model Output Statistic*; Wilks, 1995), lo que ha permitido mejorar notablemente los pronósticos tradicionales del tiempo, y en particular el pronóstico de precipitaciones y temperatura. Luego, con la información obtenida de las etapas anteriores, se realiza un análisis sinóptico de las situaciones meteorológicas que se aproximan y se realiza el

pronóstico final. Dentro de este estudio, se analiza el grado de acierto de esta metodología y se realiza una evaluación económica del impacto de esta información en la toma de decisiones para la operación de las centrales hidroeléctricas.



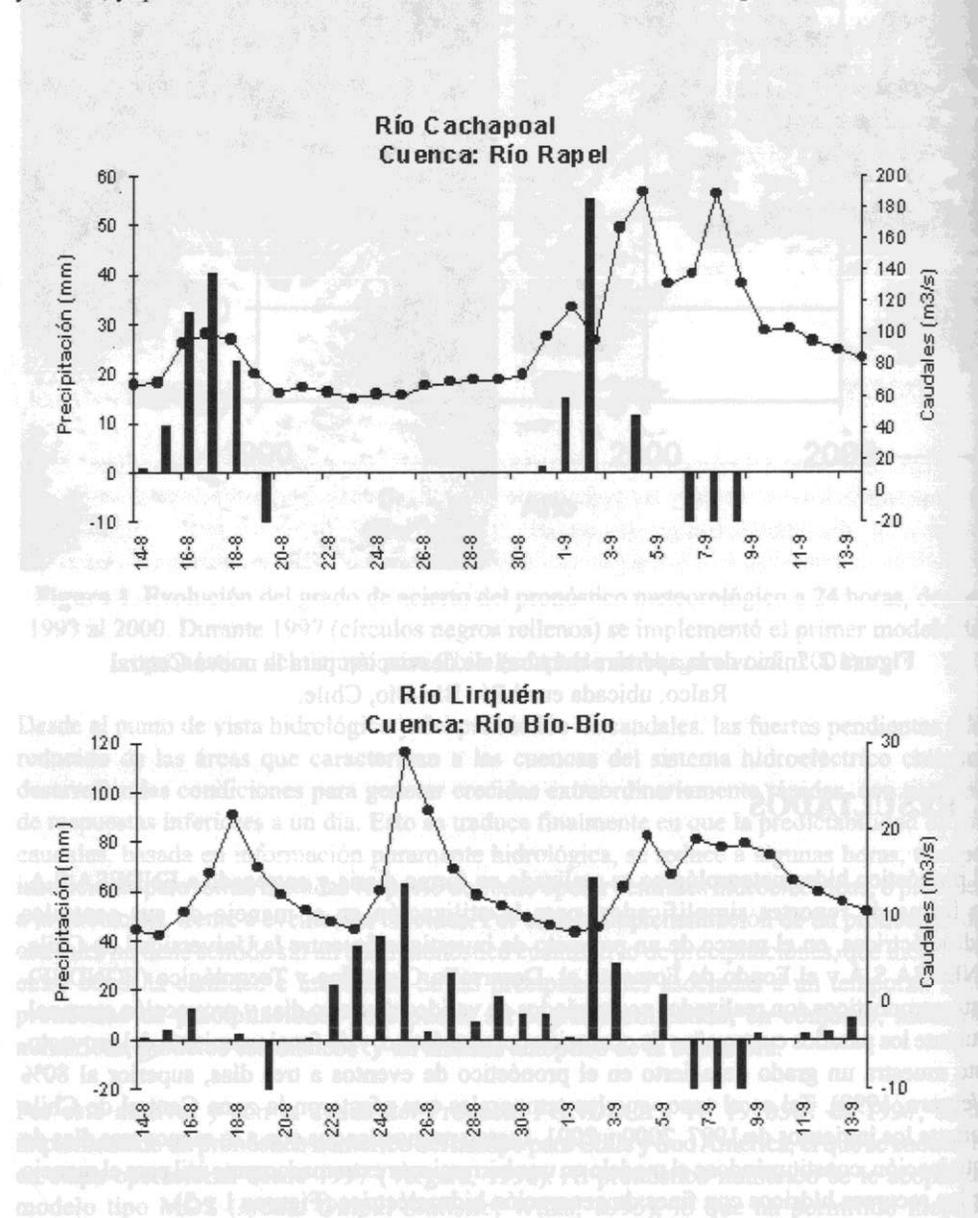
**Figura 2.** Inicio de la apertura del túnel de desviación para la nueva Central Ralco, ubicada en el Río Bío-Bío, Chile.

## 2. RESULTADOS

El pronóstico hidrometeorológico es realizado en forma diaria y entregado a ENDESA S.A. en forma de reportes simplificados, para la utilización en el manejo de sus centrales hidroeléctricas, en el marco de un proyecto de investigación entre la Universidad de Chile, ENDESA S.A y el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF). Estos pronósticos son realizados con períodos de validez de cinco días y proyección semanal. Durante los pasados cuatro años de operación del pronóstico, y de funcionamiento del proyecto, éste muestra un grado de acierto en el pronóstico de eventos a tres días, superior al 80% (Vergara, 1998). Tal es el caso, que los temporales que afectaron la zona Central de Chile durante los inviernos de 1997, 2000 y 2001, fueron pronosticados con a lo menos tres días de anticipación, constituyéndose el modelo en una herramienta extremadamente útil para el manejo de los recursos hídricos con fines de generación hidroeléctrica (Figuras 1 y 3).

Dado el alto grado de acierto del pronóstico meteorológico implementado, éste se utilizó durante Diciembre de 2000 en operaciones de cierre del Río Bío-Bío, para la nueva Central

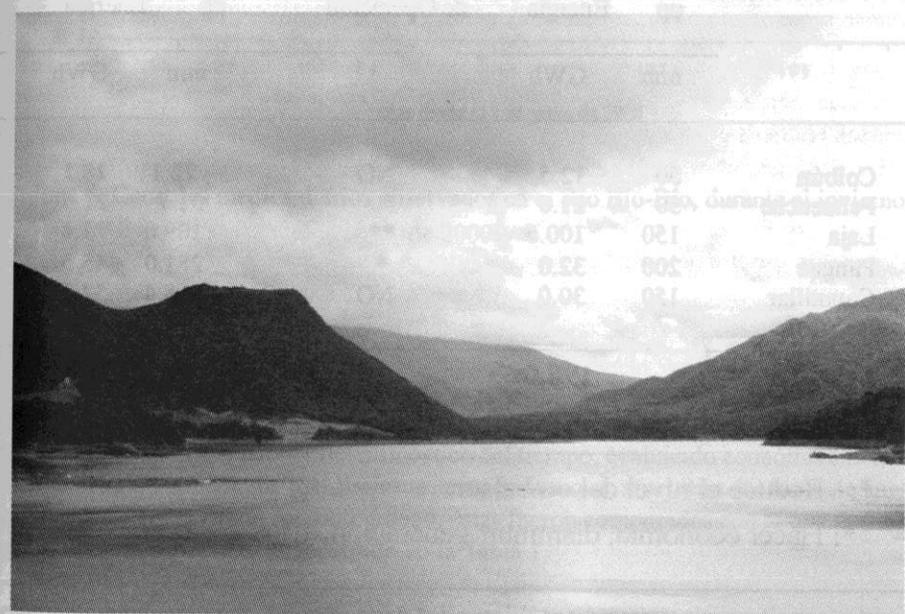
Hidroeléctrica de Ralco. Esta era una operación extremadamente delicada, dado que se tenía que realizar durante el periodo de verano, en el mes de diciembre, donde ocurren los caudales máximos de deshielo (Figura 2), y se tenía que elegir un período de a lo menos siete días con ausencia de precipitaciones para realizar esta faena, de tal forma de garantizar que los caudales en el Río no superaran los 300 m<sup>3</sup>/s, el caudal de diseño para esta operación. Otra aplicación fue durante el invierno del presente año 2001, cuando a solicitud de la Subsecretaría de Obras Públicas se implementó un sistema de alertas del tiempo para los pasos fronterizos, y Chile en general, para pronosticar y mitigar los impactos de los grandes temporales que afectan la zona Sur de Chile y que no son adecuadamente pronosticados por las metodologías tradicionales (Figura 4). Gracias a este pronóstico, se logró alertar anticipadamente (con más de tres días de anticipación) a las autoridades de los temporales que afectaron las cuencas del Bío-Bío, Laja y Maule, y que desarrollaron las inundaciones, entre otras, de Concepción.



**Figura 3.** Comparación entre precipitaciones pronosticadas 48 horas antes (en barras), y caudales observados, en dos cuencas dentro de la zona de interés hidroeléctrica. Los valores negativos indican falta de datos.



**Figura 4.** Salto del Laja durante la crecida de mayo de 2001.



**Figura 5.** Manejo del embalse Pangué antes de las lluvias; se puede observar la disminución en el nivel del embalse asociada a una mayor generación; la marca más clara en la ribera indica la disminución de nivel.

Dentro del pronóstico hidrológico orientado a la generación hidroeléctrica, no es suficiente con definir la ocurrencia de eventos de precipitaciones importantes, como son los temporales, sino que también es de suma importancia definir la magnitud de los eventos, tanto en intensidad como

en duración y área afectada, de tal forma de permitir cuantificar el volumen de la crecida (energía) y con esto modificar la operación, aumentando la generación durante los días previos y absorbiendo la crecida, evitando así el vertimiento y posibles daños aguas abajo (Vergara, 1998).

En el sistema interconectado chileno, existen embalses de regulación de corto plazo, que frente a la ocurrencia de precipitaciones intensas deben verter una gran cantidad de energía. Esto es consecuencia de que, al desconocer a priori las características del temporal que se aproxima, se pierde la oportunidad de generar energía en los días previos. Esta pérdida de generación debe ser cubierta por centrales térmicas, a un costo mucho más alto. Por ello, un pronóstico meteorológico anticipado más confiable y exacto, permitiría generar mayor energía hidráulica, evitando el vertimiento. Para que esto sea posible, se requiere cuantificar la intensidad y duración del temporal que se aproxima, con el fin de evaluar el volumen de agua que se requerirá generar para absorber la crecida, con a lo menos cinco días de anticipación, en orden a reducir el volumen del embalse generando energía que de otro forma sería vertida (Figura 5 y Tabla 1).

**Tabla 1.** Ejemplo de la evaluación económica de las decisiones realizadas basadas en el pronóstico meteorológico durante el invierno de 2000.

	PRONÓSTICO		Decisión de Operación	REAL	
	Mayo/29/2000			Junio/05/2000	
	pp	Energía		pp	Energía
	mm	GWh		mm	GWh
Colbún	50	12.5	NO	72.1	18.1
Pehuenche	50	21.0	*	51.7	21.5
Laja	150	100.5	**	109.0	73.4
Pangue	200	32.0	*	281.0	45.5
Canutillar	150	30.0	NO	258.4	52.7
<b>MEDIA</b>		<b>196.0</b>			<b>210.2</b>
<b>BALANCE TOTAL: US\$ 255.000.-</b>					

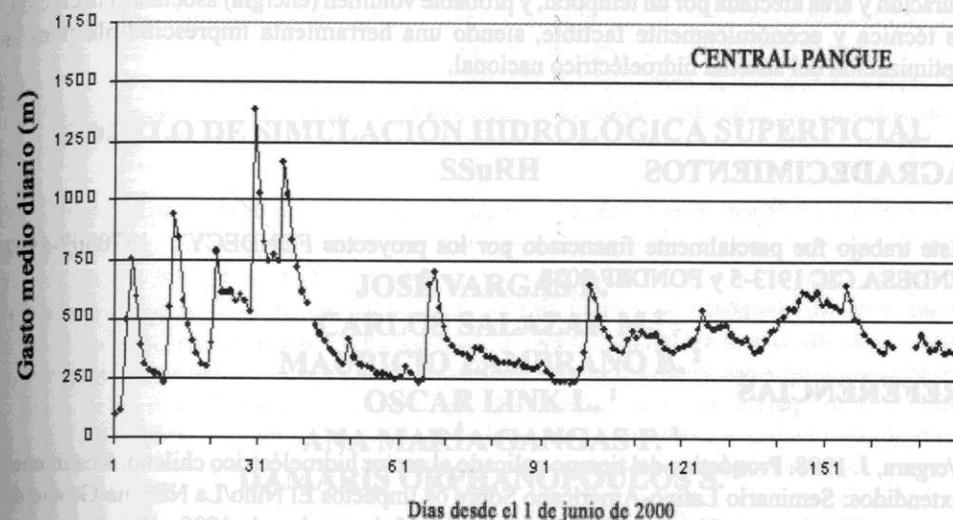
\*: Reduce el nivel del embalse.  
\*\*: Hacer economía, disminuir generación.

El pronóstico local, al nivel de cuencas tributarias a las distintas centrales hidroeléctricas, de precipitaciones acumuladas diarias, es realizado utilizando los datos en puntos de grilla generados por un modelo regional de pronóstico del tiempo (Vergara, 1998), modelos estadísticos tipo MOS y análisis sinóptico. Para la construcción de los modelos MOS, se utilizaron datos de precipitaciones diarias en las distintas centrales hidroeléctricas chilenas.

Los resultados muestran que el pronóstico de intensidad diaria de lluvias, realizado con 48 horas de anticipación, el tiempo mínimo necesario para modificar la operación en las centrales,

presenta errores medios cercanos a 30 mm (no mostrado acá), donde los datos pronosticados permiten explicar cerca del 66% de la variabilidad en las observaciones de precipitaciones disponibles (Vergara *et al.*, 2001). Por otra parte, el pronóstico de temperaturas y nivel de la isoterma de 0°C presenta errores medios de 1,5°C y 150 m, respectivamente.

Con los pronósticos de precipitaciones y temperaturas a 24, 48 y 72 horas de anticipación, se realiza el pronóstico de caudal o volumen de agua de la crecida asociada al temporal, para ser utilizado en la programación de la operación de las centrales hidroeléctricas durante los días siguientes. Con éste último se estima la generación esperada y se toman las decisiones (ver ejemplo en Tabla 1).



**Figura 6.** Caudales medios diarios observados en el Río Bio-Bio, durante el invierno de 2000.

#### 4. IMPACTO ECONÓMICO

Durante el invierno del año 2000, se realizaron evaluaciones económicas en tiempo real del impacto en la toma de decisiones del pronóstico del tiempo, evaluando económicamente las decisiones tomadas durante los distintos temporales que afectaron la zona de interés hidroeléctrico en el invierno de 2000. Luego, éstas fueron comparadas con lo que realmente ocurrió; un ejemplo de esto es mostrado en la Tabla 1.

En este invierno ocurrieron cerca de ocho temporales con precipitaciones diarias sobre 100 mm (Figura 6), y que desarrollaron aumentos en los caudales del Río Bio-Bio superiores a 300 m<sup>3</sup>/s. Se considera que 100 mm es una lluvia crítica para realizar una operación de disminución de cota en los embalses, en este caso en la Central Pangue. Todos estos temporales fueron pronosticados con éxito con más de tres días de anticipación, lo que permitió utilizar al máximo el recurso hídrico disminuyendo los vertimientos. Cada una de estas operaciones significó una ganancia cercana a los US\$ 250.000. En esta cifra sólo se consideran las ganancias por mejoras en la operación, y no se incluyen beneficios asociados a disminución de daños aguas abajo, y a mantención y prevención de fallas en líneas eléctricas, entre otros.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en este trabajo nos permiten afirmar que un pronóstico del tiempo especialmente orientado a la generación hidroeléctrica presenta notables ventajas, no sólo cualitativas, sino que también cuantitativas, en las operaciones de las centrales hidroeléctricas chilenas, permitiendo el ahorro de importantes recursos que de otra forma serían vertidos.

El análisis de tres años de operación del sistema de pronóstico con fines hidroeléctricos, nos permite afirmar que el pronóstico del tiempo, no sólo de eventos catastróficos como son los temporales que afectan a Chile durante el invierno, sino que también de otros elementos igualmente importantes en la planificación hidroeléctrica, como por ejemplo, intensidad, duración y área afectada por un temporal, y probable volumen (energía) asociada a la crecida, es técnica y económicamente factible, siendo una herramienta imprescindible para la optimización del sistema hidroeléctrico nacional.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos FONDECYT 1970507-1997, ENDESA CIC 1913-5 y FONDEF 2028.

## REFERENCIAS

- Vergara, J. 1998. Pronóstico del tiempo aplicado al sector hidroeléctrico chileno. Resúmenes extendidos: Seminario Latino-Americano Sobre os Impactos El Niño/La Niña na Gestao de Recursos Hídricos em Sistemas Hidrelétricos, 14-15 de outubro de 1998 - Río de Janeiro-RJ-Brasil, 15 páginas.
- Vergara, J., A. Ellena, R. León y W. Moraga. 2001. La meteorología en la ingeniería vial de alta montaña. Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, Vol. 113, No 2, pp 87-94.
- Wilks, D. 1995. Statistical Methods in Atmospheric Sciences: An Introduction. International Geophysics Series, Vol 59, Academic Press, San Diego. 467 páginas.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA SUPERFICIAL SSuRH

JOSÉ VARGAS B. <sup>1</sup>

CARLOS SALAZAR M. <sup>2</sup>

MAURICIO ZAMBRANO B. <sup>2</sup>

OSCAR LINK L. <sup>1</sup>

ANA MARÍA GANGAS P. <sup>2</sup>

DAMARIS ORPHANOPOULOS S. <sup>2</sup>

## RESUMEN

Hasta la fecha, los modelos para simulación hidrológica superficial de cuencas disponibles en la Dirección General de Aguas (DGA), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile, no han incluido una topología variable. La DGA, en conjunto con el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, desarrollaron, a través de un diseño computacional complementario, una componente o módulo que extiende la aplicabilidad de algunos modelos para cuencas específicas, que la Dirección General de Aguas ha desarrollado en el último tiempo, a cuencas de todo tipo. En este trabajo, se presentan las principales características del modelo SSuRH, un programa computacional que permite la modelación hidrológica superficial de cualquier cuenca en que se cuente con la información requerida para la simulación.

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

<sup>2</sup> Departamento de Estudios y Planificación. Dirección General de Aguas. MOP