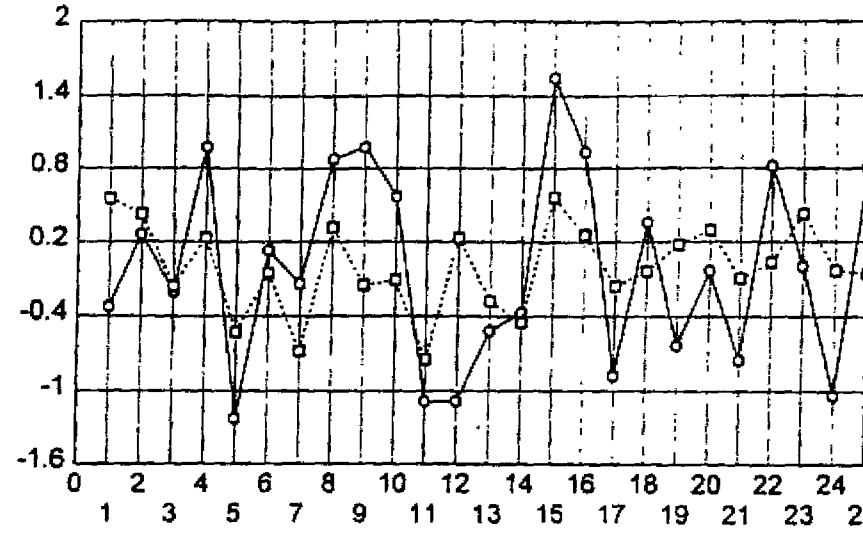

Figura 3.- Predicción sin caudales previos para el río Ijui. La línea llena representa los valore observados y la línea punteada los valores calculados por el modelo.

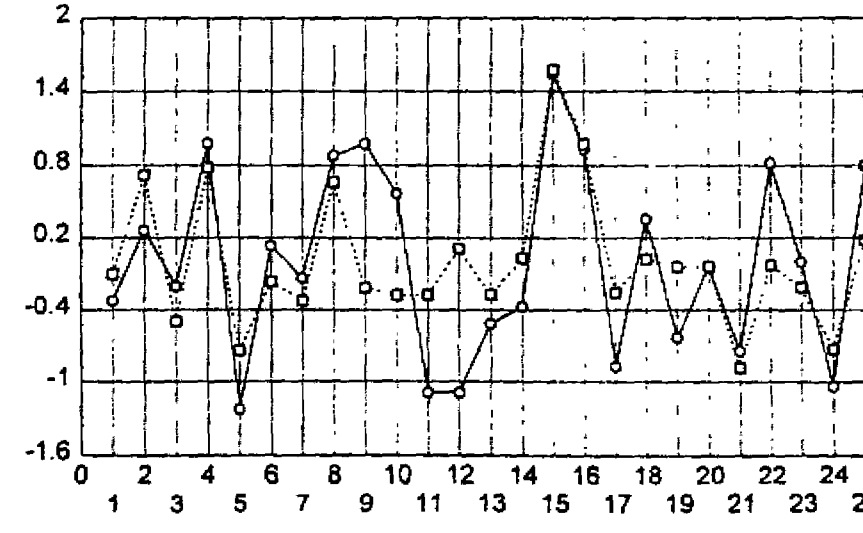

Figura 4.- Predicción con caudales previos para el río Ijui. La línea llena representa los valore observados y la línea punteada los valores calculados por el modelo.

ANOMALIAS DE CAUDALES EN CHILE: UN INTENTO DE PRONOSTICO CONSIDERANDO LA INFLUENCIA DEL FENOMENO ENOS

Daniel BENITEZ G.
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Con anterioridad se han estudiado los regímenes fluviométricos de Chile y su relación con el Niño (Aceituno y Vidal, 1990; Aceituno y Garreaud, 1994) observándose que para los ríos con componente nival importante (al norte de los 35°), la coincidencia del invierno con eventos cálidos (Niño) provoca mayores precipitaciones aumentando el volumen para deshielo disponible en verano. Lo contrario sucede cuando sobrevienen eventos fríos. Más al sur no parece relevante la relación. Se reconoce también que el grado de asociación es en general variable en el tiempo y la respuesta a eventos Niño no es de igual intensidad que la respuesta a eventos fríos o de la Niña.

Se ha estudiado también el pronóstico estacional de los caudales de algunos ríos en Chile central (Montecinos y Garreaud,1994) usando como predictor las temperaturas del pacífico tropical. De los resultados se ha observado que es posible obtener niveles de predictabilidad superiores al pronóstico que utiliza la persistencia interanual, para una antelación de entre 3 y 6 meses.

En el presente trabajo se analizarán en forma preliminar las series de tiempo de 18 estaciones fluviométricas entre 30° y 41° de latitud con el objetivo de zonificar la influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). También se pretende seleccionar una serie, entre tres series de las temperaturas de la superficie del mar (TSM) y el Indice de Oscilación del Sur (IOS), para con ella como predictor, analizar el ajuste de modelos estadísticos de pronóstico a nivel mensual con períodos de 1 y 3 meses de previsión.

Se han seleccionado estaciones fluviométricas con registros lo más completos posibles y que se ubicasen en un rango amplio de latitudes. En el caso de datos faltantes estos han sido rellenados usando estaciones cercanas de comportamiento homogéneo o bien recurriendo a la persistencia de la propia serie. Las series de tiempo de TSM son las temperaturas superficiales del océano promediadas para tres regiones denominadas Niño1+2, Niño3 y Niño4. Para ellas y para el IOS la NOAA proporciona pronósticos periódicamente de hasta 18 meses. El registro de estas series se extiende desde 1949. Las 18 estaciones seleccionadas están indicadas en la Tabla 1 indicando sus principales características.

En Chile, los regímenes fluviométricos están muy relacionados con la latitud. En el norte, la ausencia casi total de lluvias determina ríos cuyos caudales se originan en deshielos, con máximos que ocurren entre noviembre y diciembre. En la zona central del país la componente pluvial se hace más importante pero sigue siendo el derretimiento de nieves el que provoca los máximos caudales promedio mensuales. En el sur, donde llueve más y la Cordillera de los Andes disminuye su altura, los ríos presentan mayor caudal en los meses de invierno del hemisferio sur, coincidiendo con el aumento de la lluvia. Por esta razón es obvio que de presentarse alguna relación, para cada cuenca el desfase sea distinto.

En primera instancia del análisis se desestacionalizaron las series y se estandarizaron obteniéndose "anomalías". De la correlación cruzadas entre las series de anomalías de caudales y cada una de las series de anomalías de índices se obtienen correlogramas como los de la Figura 1. Para las series de TSM los correlogramas son de signo contrario al de la figura pero su comportamiento es similar. A simple vista se observa que casi todos los ríos responden en forma similar y solo cambia la intensidad de la respuesta. En general los correlogramas muestran un leve aumento en el valor absoluto al inicio para llegar al máximo entre 3 y 6 meses, luego muestran máximos locales cerca de 29, 41 y 72 meses. Estos últimos picos coinciden con los meses donde se dan las mayores intensidades de frecuencia en el periodograma de la serie del IOS. Como resultado del análisis de todos los correlogramas se observa que en general es la relación con el IOS la más fuerte. Si bien lo anterior es válido cuando no se hace distinción entre los meses, no significa que para cada período del año sea esta la variable más explicativa. Incluso al tomar toda la serie sin

discriminar se pueden estar enmascarando las relaciones más importantes. Sin embargo, por simplicidad, en el desarrollo de los modelos que siguen, fue el IOS la variable que se consideró como representativa del fenómeno.

En la Figura 2 se muestran isolíneas de correlación de todas las series con la serie del IOS retrasada 3 meses. Dado que las mediciones fluviométricas no son una variable isotrópica y que la orientación del escurrimiento en los ríos de Chile es en general de Este a Oeste, en la construcción de las isolineas se benefició esta dirección. De esta forma se puede rescatar la existencia de un gradiente en la dirección norte-sur observándose claramente que los ríos del centro de Chile tienen las mejores correlaciones.

Con los antecedentes hasta ahora obtenidos se ajustaron dos modelos distintos que incluían la variable IOS y se compararon con dos modelos que solo consideraban la persistencia. Los modelos se muestran en el siguiente cuadro:

MODELO:	COMPARADO CON:
$Z_t - fZ_{t-1} - bS_{t-3} = a_t$	$Z_t - fZ_{t-1} = a_t$
$Z_t - fZ_{t-3} - bS_{t-3} = a_t$	$Z_t - fZ_{t-3} = a_t$

donde : Z_t es la anomalía de los caudales en el mes t; S_t es la anomalía del IOS en el mes t; a_t es un ruido blanco; f y b parámetros.

El primer modelo pretende observar si es posible mejorar un modelo que intenta predecir con un mes de antelación. El segundo es similar pero para tres meses. En ambos casos se consideró la anomalía del IOS ocurrida 3 meses antes. Se realizó la estimación de parámetros mediante el método de mínimos cuadrados. Los modelos se comparan observando la varianza del error a_t y el numero de parámetros estimados.

En general los ajustes se ven mejorados. Más significativo es en el caso del segundo modelo debido a que la persistencia es menos importante en tres meses que en un mes. Sin embargo no se consideran mejorías significativas considerando que el numero de parámetros empleado aumenta al doble. Los modelos de pronóstico propuestos son como sigue:

$$Z_t = fZ_{t-1} + bS_{t-1}$$
$$Z_t = fZ_{t-3} + bS_{t-3}$$

donde los límites de confianza se construyen en base a que el error es un ruido blanco de varianza conocida. En la Tabla 2 se presentan algunos de los resultados obtenidos.

En base al criterio de Información de Akaike, que toma en cuenta la parsimonia del modelo y la varianza del error, los modelos que consideran el IOS se aceptan como mejores en todas las estaciones donde la correlación es significativa.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se confirma la existencia de una relación entre las anomalías del Niño y las anomalías de caudales en Chile. También se reafirma el hecho de que esta disminuye a medida que se avanza hacia el sur. La inclusión del índice IOS como un predictor más produce una disminución en la varianza de los errores de ajuste en los modelos.

Se debe estar consciente que la influencia entre el ENOS y los caudales en Chile varía mucho dependiendo del momento del año. Por esta razón sería más adecuado formular modelos donde los parámetros varíen en forma mensual o estacional.

Tan importante como mejorar la calidad de los modelos de pronóstico, es la búsqueda de aplicaciones prácticas de ellos. Esto último, sin duda, es uno de los caminos a emprender en la investigación futura. Parte importante de la generación hidroeléctrica del país se desarrolla en la zona donde la predictabilidad es mayor así como gran parte de la agricultura de secano.

El análisis de las sequías hasta ahora no ha considerado la relación con el ENOS. La posibilidad de pronóstico de las sequías meteorológicas e hidrológicas abriría inmensas posibilidades a la planeación de los recursos hídricos.

REFERENCIAS

Aceituno P. y F. Vidal, 1990;Variabilidad interanual en el caudal de los ríos andinos de Chile Central en relación con la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Central. Rev. Sociedad Ingeniería Hidráulica, Vol. 5, 1.

Aceituno P. y R. Garreaud, 1994; Impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en regímenes fluvimétricos andinos. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago- Chile, 7-11.

Montecinos A. y R. Garreaud, 1994; Pronóstico estacional del régimen fluviométrico en Chile Central. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago- Chile, 7-11.

Tabla 1.- Estaciones seleccionadas

Estación	Período (años)	Area km2	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura (m)	Mes máximo
Aconcagua en Chacabuquito	1949-1985	2400	32°50'	70°34'	1030	DIC
Allipen en los Laureles	1949-1985	1503	38°59'	72°14'	190	JUL
Bio-Bio en Rucalhue	1949-1985	7044	37°43'	71°54'	245	JUL
Cautin en Rari-Ruca	1949-1985	1365	38°26'	71°59'	400	JUL
Chillan en esperanza	1949-1985	224	36°47'	71°45'	435	JUL
Choapa en puente negro	1949-1985	3725	31°41'	71°16'	200	NOV
Claro en los Queñes	1949-1985	350	35°00'	70°49'	900	NOV
Colorado en Junta con Palos	1949-1985	942	35°16'	71°01'	600	DIC
Elqui en Algarrobal	1949-1985	5729	30°00'	70°35'	760	DIC
Ñuble en San Fabian	1949-1985	1709	36°34'	71°33'	410	NOV
Grande en puntilla San Juan	1949-1985	3512	30°42'	70°55'	420	NOV
Itata en Cholguan	1949-1985	852	37°09'	72°04'	220	JUL
Diguillin en San Lorenzo	1949-1985	162	36°56'	71°34'	598	JUL
Maipo en el Manzano	1949-1985	4968	33°35'	70°24'	850	DIC
Maule en Armerillo	1949-1985	5323	35°42'	71°03'	310	NOV
Pilmaiquen en San Pablo	1949-1985	2680	41°22'	73°01'	50	JUL
Tinguiririca bajo Los Briones	1949-1985	1400	34°41'	70°52'	518	DIC
Tolten en Villarica	1949-1985	2880	39°16'	72°14'	250	JUL

Tabla 2.- Mejora porcentual en la desviación estándar del error de ajuste en cada modelo

Modelo 1:	Desvio del Error			Modelo 2:	Desvio del Error		
	Sin IOS	Con IOS	% de mejora		Sin IOS	Con IOS	% de mejora
Colorado	0.776	0.760	1.643	Choapa	0.847	0.815	3.200
Choapa	0.716	0.700	1.597	Colorado	0.915	0.887	2.836
Claro	0.796	0.784	1.215	Maipo	0.730	0.702	2.777
Timgui	0.747	0.737	1.052	Maule	0.928	0.904	2.385
Maipo	0.535	0.526	0.921	Grande	0.765	0.741	2.385
Maule	0.741	0.732	0.843	Elqui	0.609	0.586	2.330
Grande	0.590	0.582	0.728	Aconcagua	0.795	0.777	1.801

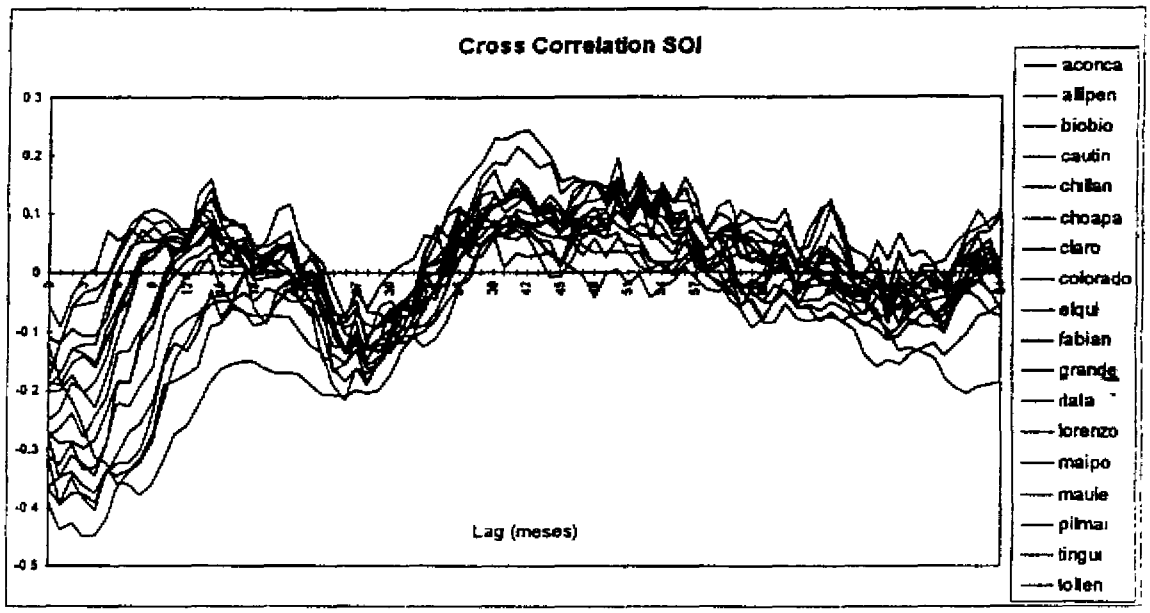

Figura 1.- Correlación cruzada entre las series de anomalías de caudales del IOS

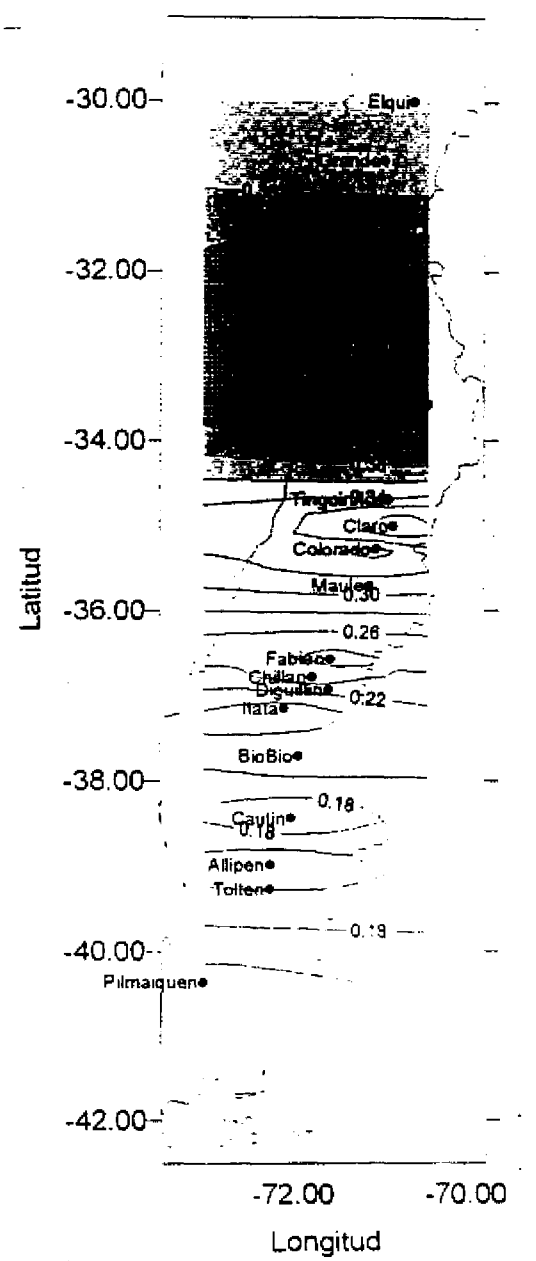

Figura 2.- Correlación entre los caudales y el IOS rezagado 3 meses

ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE EL ENOS Y EL REGIMEN FLUVIOMETRICO EN CUENCAS DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Gabriel CASTRO ARAYA
Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
Santiago, Chile

En la zona central de Chile se realiza un aprovechamiento integral de los recursos hídricos, coexistiendo procesos de generación hidroeléctrica, riego, actividades industriales y abastecimientos de agua potable, entre otros. Para realizar una planificación eficiente, resulta de vital importancia contar con relaciones de pronóstico que permitan estimar en forma anticipada y con cierto nivel de certeza, la disponibilidad de agua para una temporada próxima. De esta forma, en la medida que se disponga de información confiable, es factible tomar decisiones, las que en mediano y largo plazo se pueden traducir en éxitos o fracasos económicos.

En la actualidad, los pronósticos se realizan utilizando modelos de distinta naturaleza, tales como modelos de derretimiento de nieves, autorregresivos, generación de series sintéticas a través de procesos estocásticos, etc. Dentro de este ambiente, la incorporación de El Niño/ Oscilación del Sur (ENOS) abre una nueva perspectiva en las herramientas de evaluación y planificación de los recursos hídricos.

En efecto, diversos estudios (Aceituno et al., 1990, Montecinos et al., 1994), indican que en esta zona existe una alta relación entre la temperatura del Pacífico Tropical y el régimen pluviométrico y fluviométrico de la región. De esta forma, se ha observado que cuando se manifiesta el fenómeno de El Niño, en general, se produce un incremento de las precipitaciones con el consiguiente aumento en los caudales, habiéndose producido crecidas de importancia en algunos de estos años.

Teniendo en cuenta los antecedentes anteriores, este estudio tiene por objetivo establecer el nivel de correlación que existe a nivel mensual, entre los caudales de los ríos de las principales cuencas de la zona central del país (los ríos Maipo, Rapel, Maule y Bío-Bío), con el Indice de Oscilación del Sur y las temperaturas del Océano Pacífico ecuatorial, en las zonas denominadas Niño3 y Niño4. Se pretende utilizar individualmente como predictor a cada uno de los índices, identificando mes a mes, cúal de ellos permite realizar pronósticos estadísticamente significativos. Se debe hacer notar que es necesario tener en consideración la marcada distinción existente en la hidrología de la región, que se manifiesta estacionalmente en un período pluvial y otro de deshielo.

La zona central de Chile se ubica aproximadamente entre los 33°S y 38°S, limitando en sus extremos con las hoyas hidrográficas del río Aconcagua por el norte y del río Imperial por el sur. Los principales cursos de agua nacen en la Cordillera de los Andes y avanzan en el sentido este-oeste hasta desembocar en el Océano Pacífico. Estos ríos presentan un régimen hidrológico mixto, predominando la componente nival en el sector norte. En la medida que se avanza hacia el sur, se manifiesta en forma importante la componente pluvial, lo cual es consecuente con el régimen de precipitaciones imperantes en la zona. De esta forma, los mayores caudales medios mensuales se producen en el período de verano, mientras que los caudales máximos instantáneos se registran en invierno y están asociados principalmente a la ocurrencia de precipitaciones intensas producto del paso de frentes de mal tiempo.

Se destacan dentro de esta zona, tanto por su tamaño como por las actividades económicas que se desarrollan, las cuencas del río Maipo, río Rapel, río Maule y río Bío-Bío. En ellas se concentra el mayor uso del agua con fines de generación hidroeléctrica, riego, actividades industriales y consumo de agua potable.

Sobresalen como principales obras hidraúlicas en la cuenca del río Maipo la central Alfalfal y el embalse Yeso, el que se utiliza para regular el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Santiago. Además, existen otras centrales hidraúlicas de menor tamaño junto con numerosas extracciones que se realizan con fines de riego. De la misma manera, inmediatamente al sur de la cuenca del río Maipo se encuentra el río Rapel, donde se ubica la central hidroeléctrica Rapel. Este genera un importante lago artificial, el que se aprovecha con fines turísticos, entre otros.

En la medida que se continúa hacia el sur, se destacan las hoyas hidrográficas del río Maule y del río Bío-Bío. En la cuenca del río Maule se ha realizado el mayor aprovechamiento de los recursos hídricos para diversos fines. Se ubican en esta zona las centrales Cipreses, Isla, Curilinque, Pehuenche, Colbún y Machicura, además de la existencia de dos lagunas naturales (la Laguna del Maule y la Laguna La Invernada) las cuales descargan sus aguas al río Maule. Por tratarse de una zona principalmente agrícola, existen importantes obras destinadas a restituir derechos de aguas asignados a los regantes del sector.

La cuenca del río Bío-Bío se ubica en el centro-sur del país presentando un elevado potencial hidroeléctrico, el cual se comenzará a aprovechar una vez que entre en funcionamiento la central Pangue, actualmente en construción. Esta central, es la primera de un proyecto de aprovechamiento integral del río Bío-Bío. Además, esta cuenca es de vital importancia dado que sus recursos son utilizados en actividades industriales y en el abastecimiento de agua potable de algunas ciudades, entre las que se destaca Concepción. Para realizar este estudio se seleccionó en cada una de las cuencas, una estación de control fluviométrico, teniendo en consideración la longitud del registro y la calidad de la información, las que se indican en la Tabla 1.

Desde la cuenca del río Maipo hasta el río Maule, existe un predominio de los caudales de deshielo, produciéndose los valores máximos en los meses de noviembre, diciembre y enero. Para los meses invernales, en la medida que la cuenca se ubica más al sur, progresivamente se comienza a hacer notar la componente pluvial, manifestándose como la principal componente en la estación Bío-Bío en Rucalhue, aunque no se hace despreciable la componente de origen nival. Para la estación Maipo en el Manzano, los caudales medios mensuales muestran un incremento importante en aquellos años en que ocurrió el fenómeno ENOS.

Para cada estación seleccionada, se correlacionó mediante regresión lineal simple, cada una de las series mensuales de caudales estandarizados, con las distintas series de temperatura mensual estandarizada en las zonas Niño3 y Niño4. Análogamente, se realizó idéntico procedimiento con el IOS. En la Figura 1 se muestra, para los ríos ubicados en los extremos Norte y Sur, los valores máximos del coeficiente de correlación obtenido del análisis de las distintas series. En este gráfico no se indica el desfase mensual entre las variables. Se observa en ambos casos, que en el período de deshielo se obtienen mejores valores del coeficiente de correlación utilizando la región Niño3, mientras que para el período pluvial, la mayor dependencia se obtiene con el IOS, perdiendo significancia estadística la región Niño3. Además, estos resultados son mejores cuando se trabaja con el río Maipo, el que se ubica en el sector más al Norte.

Para la estación Maipo en el Manzano se observa que los meses de primavera (octubre y noviembre) presentan una alta dependencia con las temperaturas de mayo, mientras que en el resto del período predominan las temperaturas de diciembre. En un análisis similar para los caudales de abril a setiembre se puede observar que los primeros meses de otoño (abril y mayo), al igual que como ocurre con los caudales de verano, se relacionan con las temperaturas de diciembre. Por otro lado, en los meses de junio, julio y agosto existe una relación con las temperaturas de marzo.

En la Figura 2 (período de deshielo) y la Figura 3 (período pluvial) se muestra un resumen con los resultados de las correlaciones obtenidas en las cuencas analizadas; los rótulos en las curvas representan los meses en la región Niño3 con los cuales se obtiene el mejor ajuste. En ellas se observa durante el período de deshielo un comportamiento similar al descripto anteriormente. No obstante, se debe destacar que en la cuenca del río Bío-Bío algunos resultados pierden significancia estadística (valores del coeficiente de correlación inferiores a 0,2 aproximadamente). Por otro lado, en los meses de invierno (junio, julio y agosto), resultan ser significativas las temperaturas desde marzo a mayo, mientras que el mes de setiembre es dependiente en sí mismo.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis realizado, se ha observado que los mayores valores del coeficiente se correlación se obtienen utilizando el IOS y las temperaturas de la superficie del océano Pacífico en la región Niño3. Considerando el régimen hidrológico de la región, se aprecia la existencia de una alta relación entre los caudales del período de deshielo y las temperaturas de la región Niño3. Por otro lado, el IOS resulta ser un buen predictor para los caudales durante el período pluvial. Con la región Niño4 se obtienen correlaciones que en general resultan ser poco satisfactorias.

Si se comparan los resultados obtenidos de acuerdo a la posición geográfica, las correlaciones disminuyen en las cuencas ubicadas más al sur, esto se verifica al comparar los valores obtenidos en las cuencas ubicadas en los extremos.

Por otro lado, los caudales durante los meses de verano son dependientes de las temperaturas de fines de la primavera y de comienzo del verano (noviembre - diciembre). De acuerdo a esto, podría existir una relación entre el fenómeno El Niño, la radiación incidente sobre el manto nival y la temperatura en la región.

Adicionalmente, los caudales en los meses de invierno se relacionan directamente con las temperaturas de la región Niño3 de fines de la temporada de deshielo y del comienzo del período pluvial (febrero - mayo). Con respecto a los meses de transición entre invierno y verano o viceversa, existe una relación que probablemente guarda memoria entre la temporada anterior y las condiciones del momento.

Como propuesta para futuras investigaciones, se recomienda estudiar la dependencia entre el IOS y los caudales de invierno. Desde esta perspectiva, sería factible investigar la frecuencia de ocurrencia de crecidas o de intensidad de precipitaciones, haciendo la distinción entre los años Niño y Niña.

Tabla 1.- Ubicación de las estaciones fluviométricas seleccionadas

Cuenca	Estación	Lat.	Lon.	Alt. msnm	Area km2	Período
Río Maipo	Río Maipo en el Manzano	33 35	70 24	850	4968	1949-1989
Río Rapel	Río Tinguirica, Bajo Briones	34 41	70 52	518	1400	1949-1989
Río Maule	Río Maule en Armerillo	35 42	71 06	450	5323	1949-1989
Río Bío-Bío	Río Bío-Bío en Rucalhue	37 43	71 54	245	7044	1949-1989

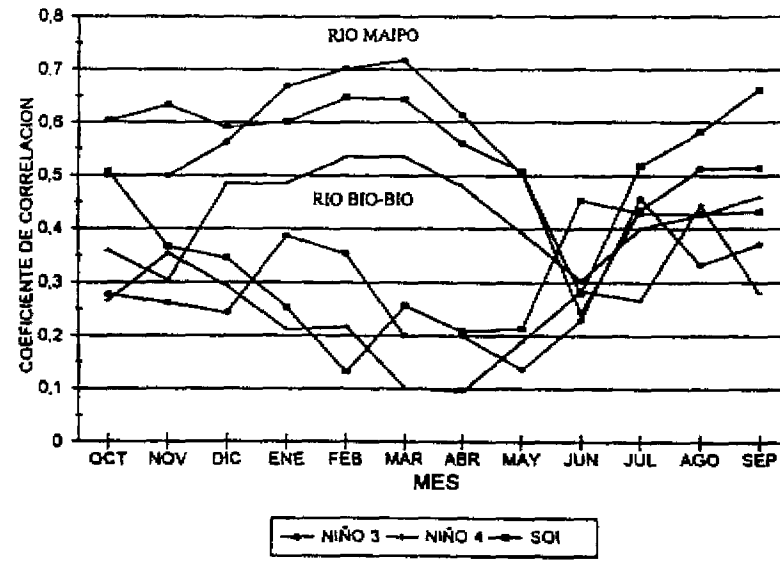

Figura 1.- Coeficiente de correlación entre los caudales de los ríos Maipo (3 curvas superiores) y Bio-Bio (3 curvas inferiores) y las temperaturas de las regiones Niño3 curva a), Niño4 curva b) y el IOS curva c).

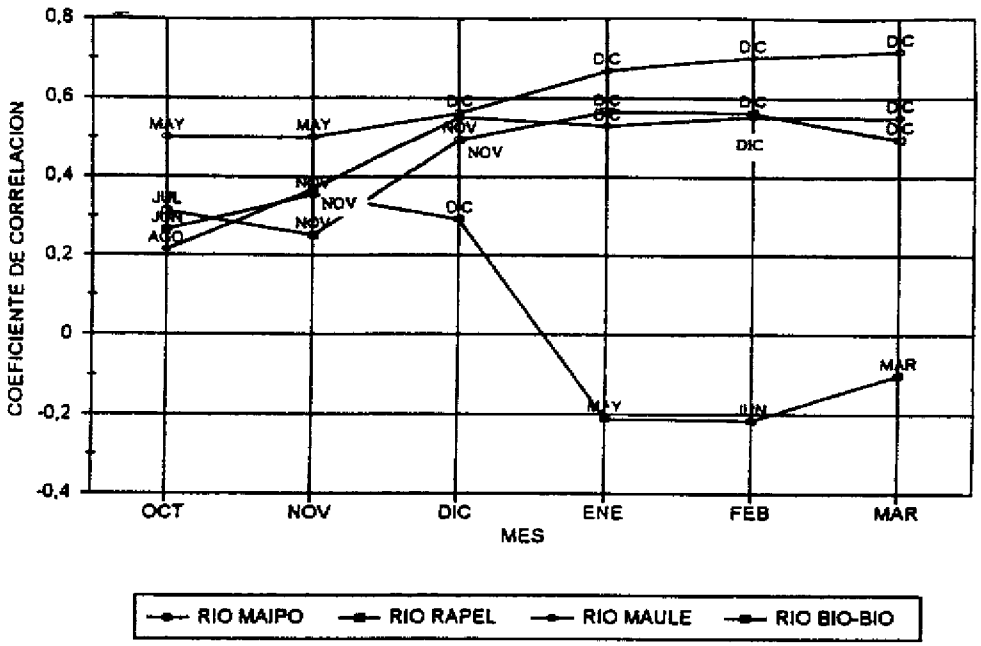

Figura 2.- Coeficientes de correlación, durante el período de deshielo, entre las temperaturas de la región Niño3 y los caudales de los ríos Maipo curva a), Rapel curva b), Maule curva c) y Bío Bío curva d). El rótulo en las curvas indica el mes con la más alta correlación.

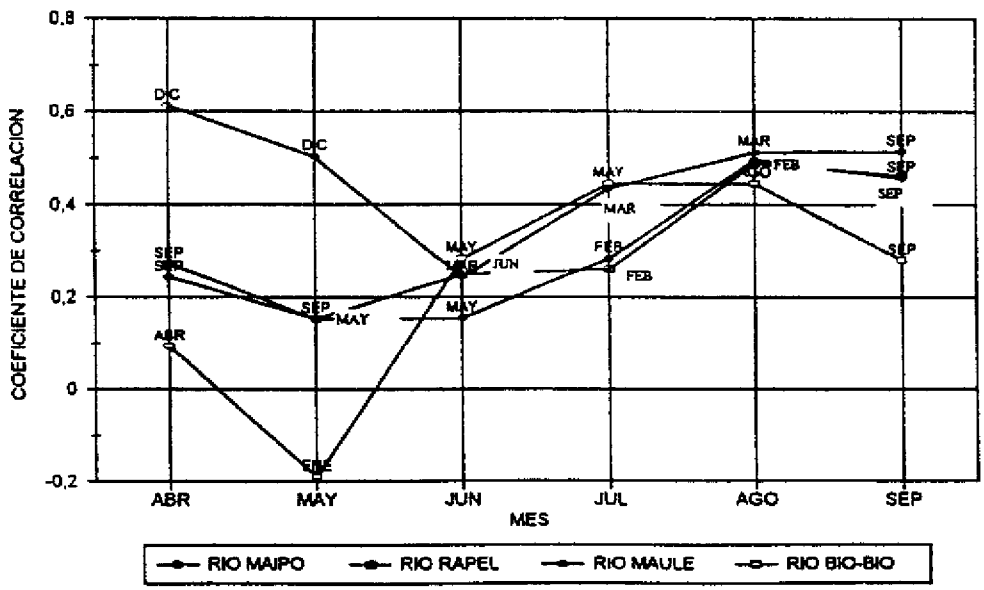

Figura 3.- Idem Figura 2 durante el período pluvial.