

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS CAUDALES MÁXIMOS EN LA ZONA MEDITERRÁNEA DE CHILE

- Roberto Pizarro • Francisco Balocchi* • Mauricio Vera •
- Alejandra Aguilera • Carolina Morales • Rodrigo Valdés •
- Claudia Sangüesa • Carlos Vallejos • Roberto Fuentes •
- Alejandro Abarza • Claudio Olivares •

Universidad de Talca, Chile

*Autor de correspondencia

Resumen

El presente estudio analizó la influencia del cambio climático en el comportamiento de los caudales punta en la Región Metropolitana, Región del Libertador Bernardo O'Higgins y la Región del Maule, en la zona central de Chile. Para ello, se utilizó la FDP de Gumbel, con la que se obtuvieron los mejores resultados para ajustar los caudales punta, los cuales se analizaron para los periodos de retorno de 10, 20, 30, 40 y 50 años. Se concluye, gracias a la segmentación de los datos a través de series en un periodo dado, que los caudales presentan una tendencia a registrar mayores valores en los periodos más actuales. Esto se visualizó con los valores promedio, gráficas de tendencia y ajustes de funciones de distribución de probabilidad. Finalmente se pudo evidenciar de manera gráfica y estadística que en los últimos años ha existido un aumento de los caudales máximos anuales, lo cual podría confirmar desde el punto de vista hidrológico procesos de cambio climático que de forma eventual han generado un mayor aporte de caudales a través de la disminución de las reservas de nieve y el retroceso glaciar por el aumento de las temperaturas.

Palabras clave: caudales punta, cambio climático, funciones de distribución de probabilidad, zona mediterránea.

Introducción

Existen evidencias de que en los últimos años el planeta ha experimentado alzas en sus temperaturas, y debido a que Chile se encuentra en una zona de transición climática, el fenómeno del cambio climático podría ser muy impactante, en particular para la disponibilidad y el uso del recurso hídrico. Por ello, la influencia de este fenómeno sobre el comportamiento de los caudales máximos podría verse aumentada (Ivanova y Corredor, 2006; Fuenzalida *et al.*, 1989).

Un estudio realizado en California, Estados Unidos, asociado con el impacto del cambio climático, enfocado desde el punto de vista de la hidrología, consistió en el análisis y la aplicación de modelos para determinar la

sensibilidad de algunas variables hidrológicas, donde se encontraron grandes cambios en la magnitud de los caudales punta, obteniéndose un mayor aumento de éstos en proporción a las precipitaciones; además, se pudo demostrar en este estudio, que el aumento de las temperaturas estarían derritiendo o disminuyendo los sectores con presencia de nieve (Miller *et al.*, 2003), misma situación que podría estar ocurriendo en la zona mediterránea de Chile.

Las variables hidrológicas, como las precipitaciones y los caudales, muestran un papel fundamental en cuanto a su sensibilidad al cambio climático, generando inquietudes sobre su comportamiento, debido a que son variables directamente influenciadas por fenómenos de amplio espectro temporal y espacial (Whitaker *et al.*, 2002; Waylen y Woo, 2008).

Las crecidas son procesos naturales, sin periodicidad, constituidos por un incremento importante y repentino del caudal en un sistema fluvial, el cual lleva consigo un ascenso del nivel de la corriente, que puede desbordar el cauce menor para ocupar progresivamente el cauce mayor hasta alcanzar un máximo o caudal-punta y descender a continuación (Aparicio, 1997; Ollero, 1996; Chow *et al.*, 1994). Según Paoli *et al.* (1998), las crecidas que se presentan en términos hidrológicos poseen un grado de riesgo y una probabilidad de excedencia diferente, según el caudal máximo, el volumen o la duración que se considere.

Dicho lo anterior, y con el fin de entender las posibles influencias del cambio climático sobre los caudales punta de la zona central de Chile, es necesario analizar el comportamiento de los caudales máximos debido a que ellos son un reflejo de las situaciones particulares que pueden estar sucediendo en la cuenca (Heusser *et al.*, 1981).

El aumento de las frecuencias de inundaciones, la escasez de agua para millones de personas, la amenaza del incremento del nivel del mar y la destrucción de comunidades costeras y hábitats (Combes *et al.*, 2003; Kroll y Vogel, 2002; Sullivan *et al.*, 2007) son preocupaciones que el cambio climático puede traer consigo. En este sentido, estudios realizados por Carrasco *et al.* (2005 y 2008), analizaron el comportamiento de la isoterma 0°, variable climática que afecta de manera directa al comportamiento nivoglaciario, encontrándose que dicha variable ha aumentado en su altura, es decir, se ha producido un aumento de la temperatura (Rosenbluth *et al.*, 1997), y por consiguiente, el volumen que anteriormente era nieve, a raíz del cambio de cota de la isoterma, se transforma de forma directa en escorrentía superficial.

Por tanto, surge la necesidad de determinar si los caudales máximos de cuencas de la zona central de Chile han presentado alguna variación significativa en las últimas décadas, producto de un aparente cambio climático.

Antecedentes generales

El estudio abarcó las regiones Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule, ubicadas en la zona central de Chile, caracterizadas por un clima semiárido o subhúmedo, con precipitaciones que van desde los 250 mm hasta los 500 mm anuales, y con sistemas hidrográficos de régimen pluvial y pluvionival.

La Región Metropolitana se ubica entre los 32° 55' y los 34° 19' de latitud sur, y entre los 69° 46' y 71° 43' de longitud oeste, aproximadamente. Esta región limita al sur con la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Tiene una superficie de 15 403.2 km², lo que representa un 2.05% del territorio nacional (excluido el Territorio Chileno Antártico).

Por otro lado, la Región del Libertador Bernardo O'Higgins está situada geográficamente entre los paralelos 33° 51' y 35° 01' de latitud sur, y 72° 02' y 70° 02' de longitud oeste. La superficie territorial es de 16 387 km², lo que en relación al total de Chile continental en superficie corresponde al 2.3%. Limita al norte con la Región Metropolitana.

La Región del Maule se extiende entre los 34° 41' y 36° 33' de latitud sur, y desde los 70° 20' de longitud oeste hasta el océano Pacífico. La superficie calculada por el Instituto Geográfico Militar es de 30 296 km², equivalente al 4% del territorio nacional. Al norte limita con la Región de O'Higgins, al sur con la Región del Bío-Bío, al oeste con el océano Pacífico y al este con la cordillera de los Andes.

En la figura 1 se presenta la ubicación de las estaciones fluviométricas por región. Asimismo, en el cuadro 1 se tienen los nombres de las estaciones, periodo de datos de cada una de ellas, caudal promedio y años de datos.

Metodología

La información necesaria para la realización del presente estudio fue proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), y ésta

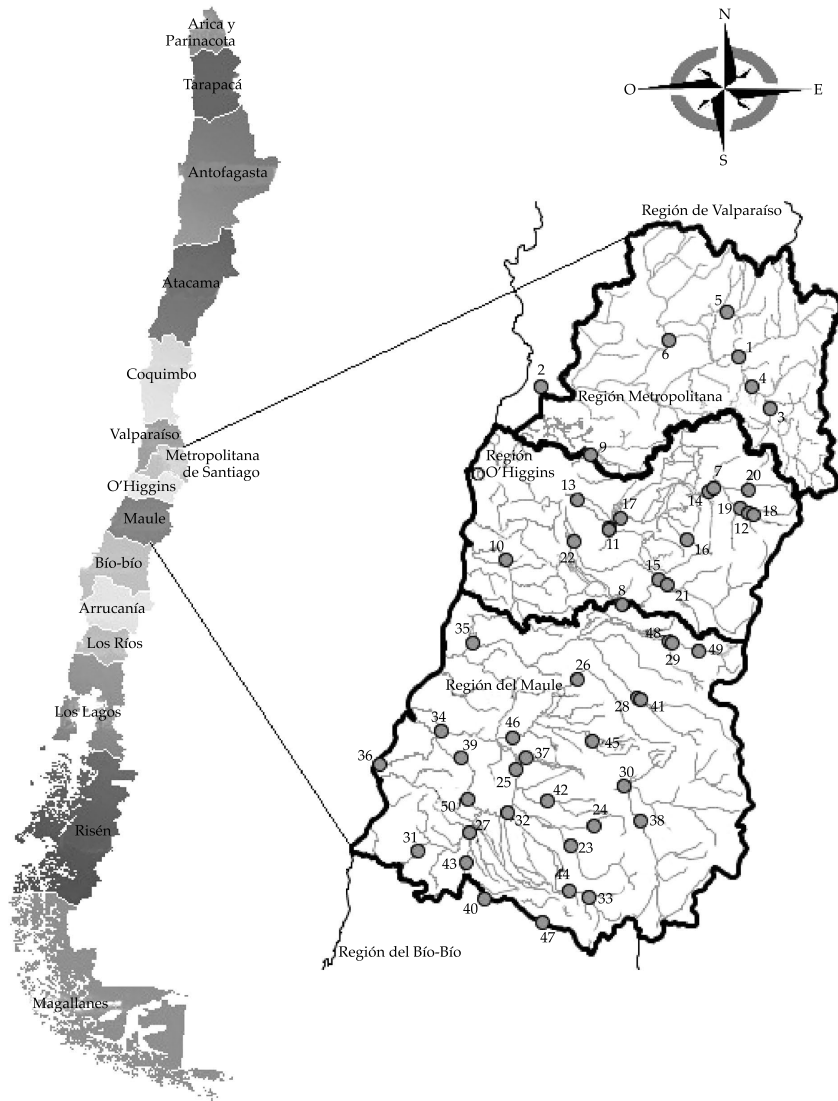


Figura 1. Regiones Metropolitana de O'Higgins y del Maule, y sus estaciones fluviométricas.

correspondió a los caudales máximos anuales de seis estaciones fluviométricas de la Región Metropolitana, 16 estaciones de la Región de O'Higgins y 28 estaciones de la Región del Maule (cuadro 1).

La información recopilada fue entregada por el organismo hidromensor oficial de Chile, la Dirección General de Aguas, por lo que no fue necesario realizar transformaciones con limnigramas, ni curvas de descarga, para obtener los caudales máximos anuales. Luego, para cada serie de datos, se determinaron, por

una parte, los estadígrafos de posición, también llamados de tendencia central, para indicar alrededor de qué valor se agruparon los datos obtenidos, como es el caso de la media, y por otra parte, los estadígrafos de dispersión. Estos estadígrafos o estadísticos extraen información de una muestra, indicando las características de la población. En el caso del presente estudio, los estadígrafos utilizados fueron la media, cuyo cálculo es el valor esperado de la variable misma o primer momento respecto al origen (muestra la tendencia central de la distribu-

Cuadro 1. Nombre de las estaciones fluviométricas, periodo de registro de datos, años de la serie y caudal promedio de cada estación.

Región	Núm.	Estación	Periodo	Años de la serie	Caudal promedio (m ³ /s)	
Región Metropolitana	1	Río Maipo en El Manzano	1979-2007	43	439.78	
	2	Río Maipo en El Cabimbao	1965-2007	29	1 443.5	
	3	Río Maipo en Las Melosas	1965-1972*, 1974-2007	27	162.42	
	4	Río Maipo en San Alfonso	1965-2007	43	267.45	
	5	Río Mapocho en Los Almendros	1965-1968*, 1979-2007	33	84.41	
	6	Río Mapocho en Rinconada de Maipú	1965-2007	43	253.57	
Región de O'Higgins	7	Canal Sauzal en Puente Termas	2005-2007	3	59.47	
	8	Canal Teno	2002-2003	2	39.9	
	9	Estero Alhué en Quilamuta	1970-2007	38	172.51	
	10	Estero Nilahue en Santa Teresa	1985-2007	23	456.06	
	11	Estero Zamorano en Puente El Niche	1985-2007	23	543.49	
	12	Río Cachapoal 5 km aguas abajo Junta Cortaderal	1989-2007	19	486.8	
	13	Río Cachapoal en Puente Arqueado	2002-2007	5	113.51	
	14	Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes	2002-2007	5	68.96	
	15	Río Claro en El Valle	1970-2007	38	223.03	
	16	Río Claro en Hacienda Las Nieves	1960-2007	48	109.08	
	17	Río Claro en Tunca	1994-2007	14	775.21	
	18	Río Cortaderal ante Junta Río Cachapoal	1985-1991*/ 2006-2007	9	24.96	
	19	Río Las Leñas ante Junta Río Claro	2006-2007	2	11.13	
	20	Río Pangal en Pangal	1985-2007	23	99.63	
	21	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	1984-2007	23	378.61	
	22	Río Tinguiririca en Los Olmos	2002-2007	6	79.28	
	Región del Maule	23	Río Achibueno en La Recova	1987-2006	20	46.19
		24	Río Ancoa en El Morro	1960-2006	47	22.13
		25	Río Loncomilla en Las Brisas	1983-2005	23	257.49
26		Río Claro en Camarico	1963-2006	42	19.19	
27		Río Cauquenes en Desembocadura	1986-2006	21	15.12	
28		Río Colorado en Junta con Palos	1975-2006	32	45.78	
29		Río Claro en Los Queñes	1986-2006	21	20.56	
30		Río Maule en Armerillo	1960-1978*, 2001-2006	20	198	
31		Río Cauquenes en El Arrayán	1987-2006	20	8.78	
32		Río Loncomilla en Bodega	1985-2006	22	145.16	
33		Río Longaví en El Castillo	1964-2006	42	34.73	
34		Río Maule en Forel	1988-2006	16	494.65	
35		Río Mataquito en Licantén	1987-2006	20	132.72	
36		Río Loanco en Desembocadura**	1987-2006	20	4.72	
37		Río Maule en Logitudinal	1962-2005	43	204.67	
38		Río Melado en El Salto	2003-2006	8	102.81	
39		Río Purapel en Nirivilo	1960-2006	47	2.73	
40		Río Perquilauquén en Ñiquen	1987-2006	20	39.66	
41		Río Palos en Junta con Colorado	1967-2006	40	29.14	
42		Río Putagán en Yervas Buenas	1987-2006	20	21.62	
43		Río Perquilauquén en Quella	1963-2005	43	57.74	
44		Río Longaví en Quiriquina	1960-2006	47	46.62	
45		Río Lircay en Puente Las Rastras	1961-2006	45	13.88	
46		Río Claro en Rauquén	1999-2006	8	95.83	
47		Río Perquilauquén en San Manuel	1960-2006	47	33.05	
48		Río Teno después de Junta con Claro	1960-2006	47	58.19	
49		Río Teno Bajo Quebrada Infiernillo	1985-2006	19	32.62	
50		Río Purapel en Sauzal	1999-2005	7	4.97	

* Estaciones con información intermedia faltante; ** estación perteneciente a las cuencas costeras del Maule, en el límite de la región.

ción); la varianza, que mide la variabilidad de los datos (es el segundo momento, con respecto al origen), y finalmente la desviación estándar, que es una medida de la variabilidad, ya que es la raíz cuadrada de los cuadrados de las diferencias.

Posteriormente, los datos fueron ajustados a cuatro funciones de distribución de probabilidad (FDP), a saber: Función de Distribución Log-Normal, Pearson Tipo III, Goodrich y Gumbel, con el fin de determinar cuál de estas funciones se adecuaba más a los caudales máximos anuales. Dichas funciones se definen en el cuadro 2.

Es imprescindible considerar que la información de parámetros estadísticos se calculó con la totalidad de datos proporcionados, a fin de no realizar ningún tipo de completación de datos faltantes, lo que le da un carácter fidedigno a la información utilizada. En los casos en que faltó información para uno o más años intermedios, se optó por no completar, para no producir sesgos de ninguna forma en la información original.

Después se determinó la calidad de las FDP ajustadas, en donde se realizó una contrastación para cada dato que se obtuvo en la frecuencia acumulada y en la frecuencia teórica acumulada; para ello se utilizaron métodos cuantitativos, a fin de determinar la bondad del ajuste, como el coeficiente de determinación R^2 y el test de Kolmogorov-Smirnov.

Para conocer el valor a asumir por la variable aleatoria de caudales máximos, se utilizaron los periodos de retorno de 10, 20, 30, 40, 50 y 100 años.

Análisis y discusión de resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en el presente estudio, acompañados de su discusión y análisis.

Calidad de los ajustes

De acuerdo con los resultados alcanzados de bondad de ajuste y por la facilidad del cálculo, se concluyó que en las tres regiones, la función de distribución de probabilidad de Gumbel es la más adecuada para su aplicación a los caudales máximos (Yue et al., 2006).

A continuación se presentan los resultados entregados por ambas pruebas en cuanto a la calidad del ajuste de las series de caudales máximos de las tres regiones en estudio (cuadro 3).

Por lo tanto, se puede determinar que las FDP Gumbel y Log-Normal, presentan los valores más altos de R^2 (cercaos al 95%), y un 100% de aceptación de K-S, por lo que se determinó que las dos funciones son adecuadas para el ajuste de los caudales máximos anuales. Sin embargo, y aunque la Distribución Log Normal presenta un R^2 promedio levemente más alto que el resto de las funciones, se utilizó la distribución de Gumbel debido a que es la más fácil de determinar y a la vez presenta una menor cantidad de parámetros a estimar.

Variabilidad regional

Con el fin de comprender la relación y el comportamiento existente entre los caudales

Cuadro 2. Funciones de distribución de probabilidad utilizadas.

FDP Log-normal	FDP Pearson Tipo III	FDP de Goodrich	FDP de Gumbel
$F(x) = \frac{1}{2\pi x(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - a}{\beta} \right)^2} dx$ <p>x: representa el valor a asumir por la variable aleatoria. β, x: parámetros. e: constante de Neper.</p>	$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx$ <p>x: representa el valor a asumir por la variable aleatoria. α, β y δ: parámetros. e: constante de Neper.</p>	$F(X) = 1 - e^{-\alpha(x-x_1)^{1/p}}$ <p>x: representa el valor a asumir por la variable aleatoria. α, p y X_1: parámetros. e: constante de Neper.</p>	$F(X) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$ <p>x: representa el valor a asumir por la variable aleatoria. e: constante de Neper. μ y d: parámetros.</p>

Cuadro 3. Bondad promedio del R^2 y porcentaje de aceptación promedio K-S para el conjunto de estaciones, para las tres regiones en estudio.

		Función de Distribución de Probabilidad (FDP)			
		Gumbel	Log-Normal	Goodrich	Pearson tipo III
Región Metropolitana	Promedio R^2 (%)	95.45%	98%	69.30%	95.40%
	Porcentaje de aceptación K-S	100%	100%	0%	100%
Región de O'Higgins	Promedio R^2 (%)	95.45%	93.88%	87.75%	94.92%
	Porcentaje de aceptación K-S	100%	100%	100%	100%
Región del Maule	Promedio R^2 (%)	96.40%	94.10%	97.20%	94.90%
	Porcentaje de aceptación K-S	100%	100%	96.4%	82.1%

que se presentaron en este estudio, se elaboró un índice relativo de magnitud de crecidas para las tres regiones, el cual representa la relación existente entre la estación que presenta el mayor caudal y las demás estaciones con distintos valores de caudal.

En este índice se consideraron los valores reales empíricos y los valores para periodos de retorno $T = 30$ y $T = 50$, el cual queda definido con la siguiente expresión:

$$IRmc = \frac{Q_{\text{máx}} E_{\text{mayor}}}{Q_{\text{máx } i}}$$

Donde:

$IRmc$ = índice relativo de magnitud de crecidas.

$Q_{\text{máx } E_{\text{mayor}}}$ = caudal máximo anual de la estación con el valor mayor.

$Q_{\text{máx } i}$ = caudal máximo, estación i .

Para la Región Metropolitana se consideró como estación patrón a la estación El Cabimbao; para la Región del Libertador Bernardo O'Higgins lo fue Santa Teresa, y para la Región del Maule lo fue Río Maule en Forel.

El cuadro 4 y la figura 2 presentan los resultados del índice de magnitud de crecidas tanto para los valores reales de caudales máximos como para los valores probables en los periodos de retorno de 30 y 50 años, con el

objetivo de entender sus comportamientos a través del tiempo.

Como se puede observar en el cuadro 4 y la figura 2, la estación Río Maipo en El Cabimbao sobrepasa 15.4 veces el caudal máximo real de la estación Río Mapocho en Los Almendros, donde esta estación es la que presenta los valores más bajos y se mantiene a través del tiempo tanto para 30 como para 50 años.

En cuanto a la Región de O'Higgins, los valores observados muestran que la estación Río Nilahue en Santa Teresa es la que presenta un mayor valor de caudal máximo, y al ser comparado con la estación Río Pangal en Pangal, ésta la supera en 7.4 veces, disminuyendo en $T = 50$ a 6.9 veces.

Para el caso de la Región del Maule, la estación Río Maule en Forel sobrepasa 54.6 veces el caudal máximo de la estación Río Purapel en Nirivilo, siendo esta última la que presenta los valores de caudales máximos más reducidos entre las estaciones, lo que se mantiene en el tiempo tanto para 30 como 50 años, llegando a sobrepasar 69.1 veces los caudales máximos probables en un periodo de retorno de 50 años. Sin embargo, la estación Río Loncomilla en Las Brisas sólo es sobrepasada 2.3 veces por la estación Río Maule en Forel.

En resumen, se puede observar que el caudal máximo en las tres regiones en estudio

Cuadro 4. Caudales máximos reales para estaciones de la Región Metropolitana, la Región de O'Higgins y la Región del Maule.

	Estaciones	Caudal Máximo (m³/s)	Caudal Máximo (m³/s) (T = 30)	Caudal Máximo (m³/s) (T = 50)	Irmc		
					Caudal real	T = 30	T = 50
Región Metropolitana	Río Maipo en El Cabimbao	5 095.4	4 387.1	4 929.9	1	1	1
	Río Maipo en El Manzano	1 430.3	1 044.3	1 155.7	3.6	4.2	4.3
	Río Mapocho en Rinconada de Maipú	1 124.7	780.6	877.8	4.5	5.6	5.6
	Río Maipo en San Alfonso	740.4	589.2	648.5	6.9	7.4	7.6
	Río Maipo en Las Melosas	427.7	340.6	373.4	11.9	12.9	13.2
	Río Mapocho en Los Almendros	330.2	294.6	333.3	15.4	14.9	14.8
Región de O'Higgins	Estero Nilahue en Santa Teresa	1 396.7	1 298.9	1 454.3	1	1	1
	Estero Zamorano en Puente El Niche	1 189.1	1 480.1	1 652.8	1.2	0.9	0.9
	Río Tinguiririca Bajo Los Briones	1 007.3	945.6	1 050.1	1.4	1.4	1.4
	Río Claro en Tunca	775.2	879.4	980.6	1.8	1.5	1.5
	Río Claro en El Valle	621.1	564.6	627.5	2.2	2.3	2.3
	Estero Alhué en Quilamuta	547.2	540.7	608.6	2.6	2.4	2.4
	Río Cachapoal 5 km aguas abajo Junta Cortaderal	486.8	436	475.6	2.9	3	3.1
	Río Claro en Hacienda Las Nieves	451.4	345.2	388.7	3.1	3.8	3.7
	Río Pangal en Pangal	188.5	192.2	209.3	7.4	6.8	6.9
Región del Maule	Río Maule en Forel	17 212.9	17 734.6	20 039	1.0	1.0	1.0
	Río Loncomilla en Las Brisas	7 623.4	7 743.4	8 498.6	2.2	2.3	2.4
	Río Mataquito en Licantén	4 638.3	4 844.1	5 324.4	3.7	3.7	3.8
	Río Loncomilla en Bodega	4 227.8	4 524.3	5 028	4.1	3.9	4.0
	Río Maule en Logitudinal	3 064	3 061.1	3 371.3	5.6	5.8	5.9
	Río Longaví en El Castillo	2 877.9	2 900	3 184.6	5.9	6.1	6.3
	Río Achibueno en La Recova	2 621.2	2 552.6	2 750	6.6	6.9	7.3
	Río Longaví en Quiriquina	2 534.9	2 482	2 740.8	6.8	7.1	7.3
	Río Perquilauquén en Quella	2 319.6	2 420.7	2 665.3	7.4	7.3	7.5
	Río Maule en Armerillo	2 305.2	2 398	2 637.7	7.5	7.4	7.6
	Río Claro en Rauquén	2 100.1	2 309.7	2 560.8	8.2	7.7	7.8
	Río Claro en Camarico	1 723.8	1 593.5	1 745.5	9.9	11.1	11.5
	Río Perquilauquén en Ñiquen	1 378.6	1 196.6	1 317.4	12.5	14.8	15.2
	Río Perquilauquén en San Manuel	1 244.9	1 184.5	1 303.5	13.8	15.0	15.4
	Río Teno después de Junta con Claro	1 155.8	1 083.6	1 205.6	14.9	16.4	16.6
	Río Ancoa en El Morro	1 080.9	1 033.3	1 139.6	15.9	17.2	17.6
	Río Cauquenes en El Arrayán	1 032.1	1 025.4	1 126.6	16.7	17.3	17.8
	Río Melado en El Salto	972	1 010.2	1 042.2	17.7	17.6	19.2
	Río Cauquenes en Desembocadura	922.4	915.5	1 029.1	18.7	19.4	19.5
	Río Loanco en Desembocadura**	854.9	780.2	857.6	20.1	22.7	23.4
	Río Lircay en Puente Las Rastras	850	712	787.5	20.3	24.9	25.4
	Río Colorado en Junta con Palos	689.6	658.1	731.1	24.9	26.9	27.4
	Río Palos en Junta con Colorado	597.4	563.9	619.5	28.8	31.4	32.3
	Río Claro en Los Queñes	527.9	558.7	616	32.6	31.7	32.5
	Río Teno Bajo Quebrada Infiernillo	358.8	447.1	497.1	47.9	39.7	40.3
	Río Purapel en Sauzal	321.2	357.3	391.4	53.6	49.6	51.2
	Río Purapel en Nirivilo	315.2	261.2	289.9	54.6	67.9	69.1

Donde:

Caudal máx: son los caudales reales máximos de cada serie.

Caudal máx (T = 30): son los caudales máximos probables para un periodo de retorno de 30 años.

Caudal máx (T = 50): son los caudales máximos probables para un periodo de retorno de 50 años.

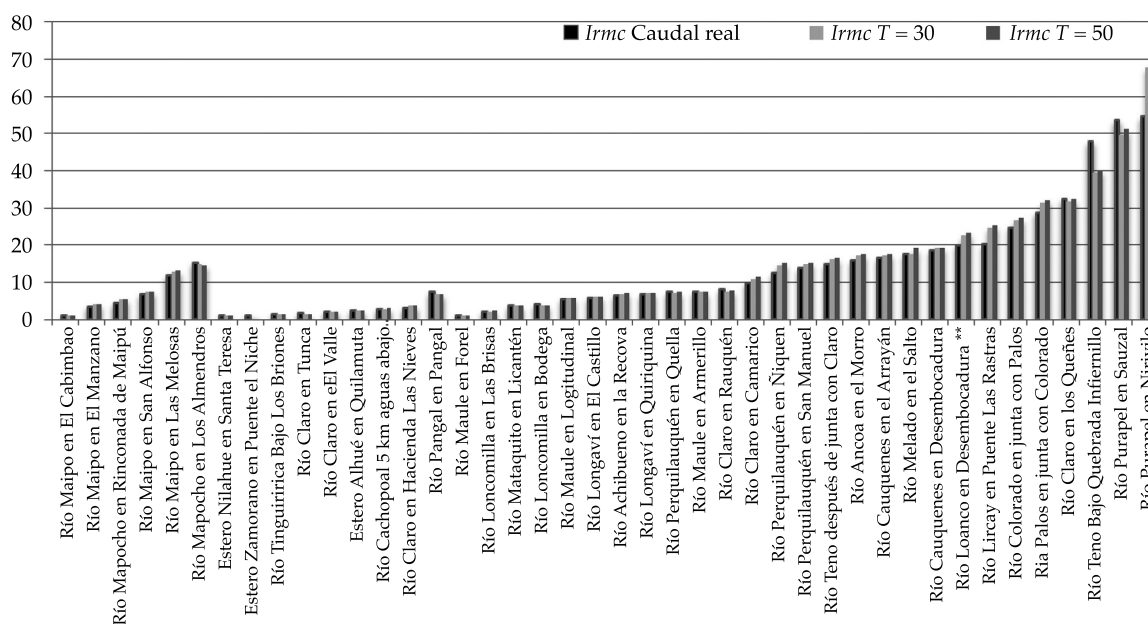


Figura 2. *IRmc* caudales máximos anuales ($T = 30$ y $T = 50$ años), para las regiones Metropolitana, de O'Higgins y del Maule.

posee un aumento gradual en el tiempo, cuya proyección ya da una idea de lo que está sucediendo con la variable en estudio.

Años con más frecuencias en que existen caudales punta

Con el fin de determinar si los caudales punta se han incrementado en las regiones en estudio en las últimas décadas, se confeccionó el cuadro 5, el cual presenta los periodos de tiempo y el número de caudales máximos que se han registrado en ese lapso en cada una de las estaciones de cada región.

Para la Región Metropolitana se consideró el total de estaciones presentes (6), donde se muestra que los valores más altos fueron encontrados en la década de 1960. Para el caso de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, se contemplaron las nueve estaciones en estudio, de las cuales prácticamente la mitad presenta máximos entre los años 2000-2006. En tanto, para la Región del Maule, se consideraron las 12 estaciones con mayor cantidad de registros, donde también se

observa que la mayor cantidad de máximos se presenta en los últimos seis años.

A fin de entender de mejor forma el comportamiento de los caudales punta observados anteriormente, se graficaron las tres estaciones de cada región que poseían la mayoría de los datos, con el fin de observar el comportamiento de los caudales punta, y adicionalmente las series de datos se dividieron en dos periodos. Así, la serie total, que corresponde a los años 1965-2006, se separó en dos series de datos; la primera consideró los años 1965-1981 y la segunda, 1982-2006. Por otra parte, la serie que considera el total de años desde 1970-2006, se separó en los años 1970-1981 y 1982-2006.

Se puede observar en un análisis más detallado de los caudales máximos en la estación Río Maipo en El Manzano, que el promedio general es de $448 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que al separar las series, el primer periodo tiene un promedio de $351 \text{ m}^3/\text{s}$, y en el caso del segundo periodo, alcanza un valor promedio de $513 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto queda demostrado en la línea de tendencia de los datos, que si bien no es tan

Cuadro 5. Número de estaciones por región con mayor frecuencia de existencia de caudales punta.

Década	Metropolitana (núm. de estaciones)	B. O'Higgins (núm. de estaciones)	Maule (núm. de estaciones)
1960-69	3	-	-
1970-79	1	1	2
1980-89	-	-	1
1990-99	1	4	3
2000-06	1	4	6
Total estaciones analizadas	6	9	12

pronunciada, entrega valores más altos en los últimos años (figura 3).

Para la estación Río Maipo en San Alfonso, se puede observar que los caudales máximos presentados para la primera estación presentan un promedio general de 283 m³/s. Al observar el primer periodo, el promedio alcanza 230 m³/s, en tanto que el promedio del segundo periodo es levemente superior, con 308 m³/s. Esto queda demostrado en la línea de tendencia general, que también indica ascenso, aunque los datos son muy fluctuantes alrededor de la media.

Finalmente, para la estación Río Mapocho en Hacienda de Maipú, el promedio general de la estación es de 281 m³/s. Para el caso del promedio del primer periodo, sólo alcanza los 94 m³/s, periodo que presenta una forma levemente ascendente. En el caso del segundo

periodo, el promedio alcanza los 370 m³/s. Con esto se verifica que en los últimos años han aumentado los caudales, lo que claramente se evidencia con la línea de tendencia de toda la serie, la cual es muy pronunciada.

En la estación Río Claro en Hacienda Las Nieves se presentan más fluctuaciones que en la estaciones anteriormente analizadas, donde el promedio general es de 120 m³/s. Para el primer periodo, el caudal promedio alcanza los 108 m³/s; en el caso del segundo periodo, el promedio es levemente superior a la media y alcanza un valor de 129 m³/s (figura 4).

Para la estación Estero Alhué en Quilamuta se presentan muchas fluctuaciones con muchos valores extremos tanto bajos como altos; el promedio total alcanza los 177 m³/s. En cuanto al primer periodo, el promedio denota un monto de 110 m³/s, mientras que en el segundo

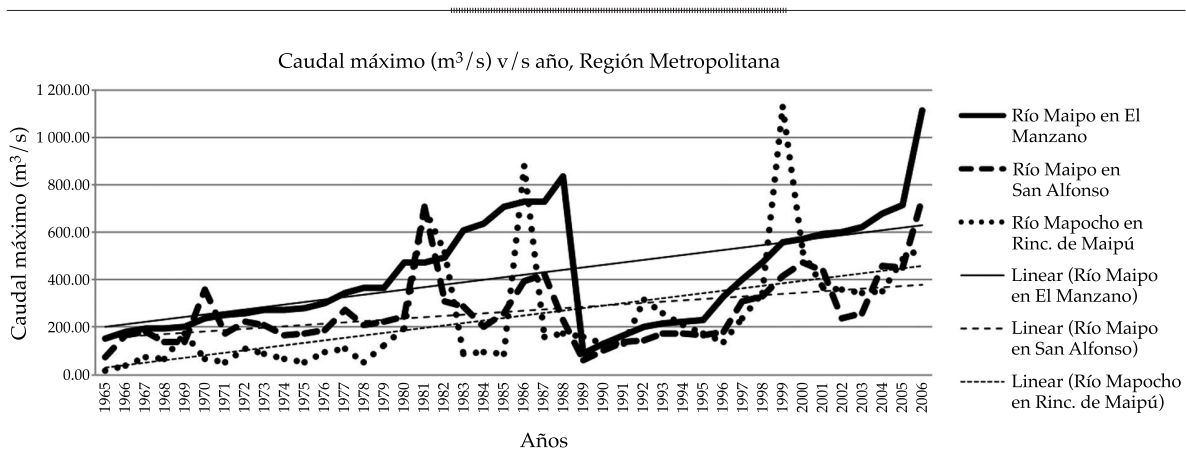


Figura 3. Caudales máximos, estaciones Río Maipo en El Manzano, Río Maipo en San Alfonso y Río Mapocho en Rinconada de Maipú, Región Metropolitana.

periodo, el promedio de los caudales máximos es de 208 m³/s.

Para el caso de la estación Río Claro en El Valle, el promedio general alcanza un total de 250 m³/s, mientras que en el primer periodo el promedio es mayor, alcanzando los 228 m³/s; este periodo cuenta con un par de datos extremos muy marcados. Para el segundo periodo, los valores de caudal son más o menos constantes, aumentando sólo en los últimos años; este periodo presenta un promedio de 218 m³/s, valor menor a la media general.

Para la estación Río Ancoa en El Morro, también sus valores son fluctuantes, pero se acercan más a la media, donde el promedio general alcanza los 317 m³/s. Asimismo, para

el primer periodo de la serie, sigue siendo menor con 260 m³/s, y en el caso del segundo periodo, el caudal promedio es levemente superior a la media y alcanza un valor de 356 m³/s. Esta gráfica muestra una línea de tendencia general más pronunciada que las anteriores (figura 5).

En el caso de la estación Río Purapel en Nirivilo, el promedio total es de 115 m³/s. En el primer periodo de datos considerado, este promedio es de 90 m³/s, mientras que en el segundo periodo el valor asciende a 127 m³/s. Esta gráfica muestra una línea de tendencia general ascendente, pero no de forma pronunciada. Esta diferencia puede deberse al aumento progresivo de las temperaturas en las

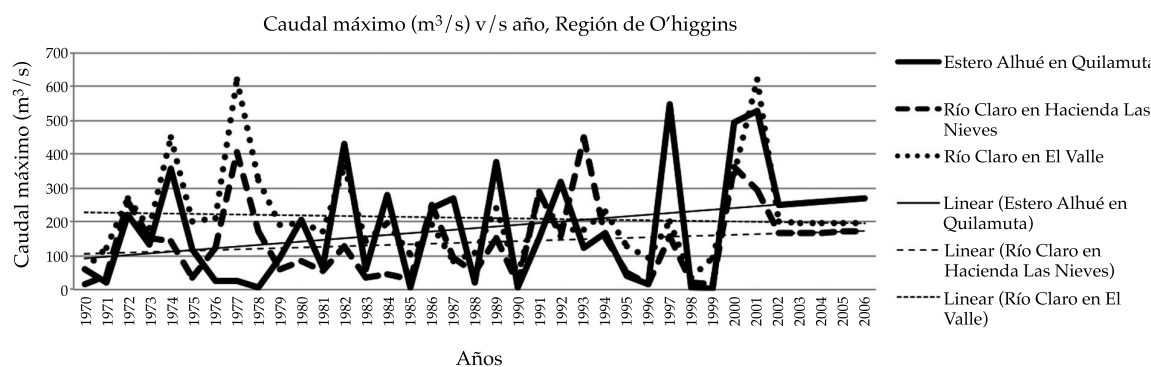


Figura 4. Caudales máximos, estaciones Río Claro en Hacienda Las Nieves, Estero Alhué en Quilamuta y Río Claro en El Valle, Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

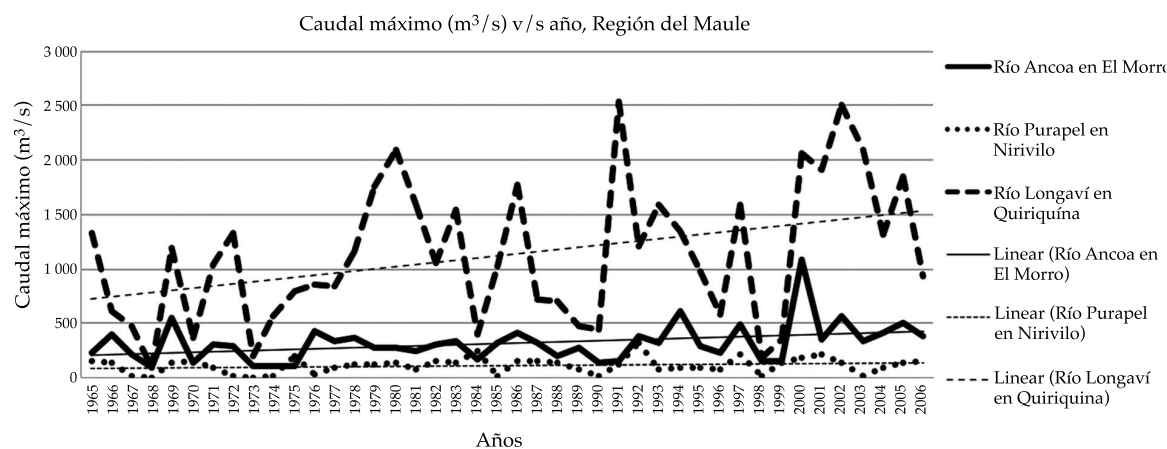


Figura 5. Caudales máximos, estaciones Río Ancoa en El Morro, Río Purapel en Nirivilo y Río Longaví en Quiriquina, en la Región del Maule.

últimas décadas, tendencia que se observa en la gran mayoría de las estaciones analizadas.

De las gráficas se puede inferir que los segundos periodos considerados muestran un valor promedio de caudal mayor que los primeros periodos; asimismo, las gráficas de las curvas de tendencia general son todas ascendentes, hecho que está claramente influenciado por los valores de caudales del segundo periodo. Además, esto implica que los caudales en el tiempo están tendiendo a mostrar valores más altos, y marca un cambio en los últimos 10 años, lo que podría asociarse con un aumento de las temperaturas.

Es importante señalar que el método de análisis probabilístico utilizado para determinar el comportamiento de los caudales permite comparar, de acuerdo con criterios de significancia estadística, los valores máximos probables asociados con distintos periodos de retorno (30, 50 años, etcétera), y que son obtenidos mediante el uso de una FDP que presenta la mejor calidad de ajuste, en este caso, Gumbel. Así, es posible comparar los valores probabilísticos asociados con los periodos de datos dentro de una serie histórica, lo cual es una diferencia respecto de los test de tendencia, los que si bien indican cómo es la tendencia de cada uno de los periodos seleccionados dentro de la serie, no explican los valores asociados con dicho análisis. Sin embargo, el análisis probabilístico comparativo permite detectar incrementos o decrementos porcentuales de los montos anuales de los caudales máximos (Apaydin *et al.*, 2006; Munka *et al.*, 2007; Angulo-Martínez y Beguería, 2009; Lee y Heo, 2011).

Cálculo de la probabilidad de los rangos de cada serie según la función de Gumbel

Con el fin de corroborar lo evidenciado en las gráficas, se calculó la probabilidad y los valores que adoptaría la variable de interés (caudales máximos), para el periodo de retorno de 30 años en cada una de las estaciones analizadas. Para esto se consideró la función de distribución

de probabilidad de Gumbel. Önoz y Bayazit (2001), en su estudio de caudales mínimos en 16 regiones de Europa, determinaron en forma general que la función de distribución de Gumbel es la más recomendable en su uso.

Se mantuvo la división de cada serie en los periodos 1965-1981 y 1982-2006, y los periodos 1970-1981 y 1982-2006, para las estaciones, en donde se contempla menor cantidad de datos. Después se procedió a calcular la probabilidad y los valores que adoptaría la variable para el periodo de retorno nombrado (30 años), para conocer estadísticamente si se corrobora el aumento de los caudales punta en los últimos años.

En el cuadro 6 se presentan los valores de caudales máximos asociados con el periodo de retorno de treinta años, comparados para los periodos 1965-1981 y 1982-2006.

De acuerdo con los resultados presentados en el cuadro 6, en ocho de las nueve estaciones analizadas gráfica y estadísticamente, se observa que para una misma probabilidad se encuentran mayores valores de caudal máximo en el segundo periodo.

Así, se puede decir que la gran mayoría de las estaciones aumenta sus caudales en su segundo periodo entre un 20 y 80% (diferencia porcentual), con respecto al que le precede (cuadro 6).

Existen dos casos particulares, la estación Río Mapocho en Rinconada de Maipú para la Región Metropolitana, y la estación Río Claro en El Valle para la Región de O'Higgins. La estación Río Mapocho en Rinconada de Maipú hace una estimación de los valores de caudal, que supera el primer periodo en cuatro veces aproximadamente, lo que llama la atención, considerando que las demás estaciones no llegan al doble.

La otra estación que se diferencia de las demás es El Valle en la Región de O'Higgins, estación que presentó valores que demuestran una disminución de los caudales entre el primer y segundo periodo considerado, aunque esta disminución es muy pequeña y casi despreciable.

Cuadro 6. Caudales máximos asociados con el periodo de retorno de 30 años para los periodos considerados para las distintas estaciones.

Estación	*Periodo de retorno $P(x \leq X)$	Periodo 1965-1981 (m ³ /s)	Periodo 1982-2006 (m ³ /s)	Diferencia %
El Manzano (Región Metropolitana)	30	776	1 178	52
Hacienda Las Nieves (Región de O'Higgins)	30	333	385	16
Ancoa (Región del Maule)	30	547	791	45
San Alfonso (Región Metropolitana)	30	424	674	59
Quilamuta (Región de O'Higgins)	30	342	613	79
Nirivilo (Región del Maule)	30	223	290	30
Rda. Maipú (Región Metropolitana)	30	179	933	421
El Valle (Región de O'Higgins)	30	584	563	-4
Quiriquina (Región del Maule)	30	2 289	2 742	20

* Probabilidad de excedencia.

Según los resultados presentados en el cálculo de la variable en estudio, para el periodo de retorno de treinta años se corroboraría un aumento de los caudales punta en la última década.

Con base en las interrogantes que surgen acerca de los posibles procesos de cambio climático que se estarían generando en los últimos años, estos resultados podrían ayudar a corroborar lo descrito por algunos autores en la revisión bibliográfica presentada, en donde se ha señalado que existe un aumento de las temperaturas y, por consiguiente, una menor reserva de nieve en la cordillera, además de un posible retroceso glaciar (Vicuña *et al.*, 2011).

Test U Mann-Whitney

Además, y para visualizar si las series provienen de la misma población o son eventos independientes, se realizó la prueba U Mann-Whitney a las seis estaciones graficadas anteriormente, y se sumaron las siguientes series comparativas: 1965-1985/1986-2006 y 1970-1980/1990-2000.

Esta prueba no paramétrica, que no requiere de los supuestos de normalidad

e igualdad de varianzas, determina si dos muestras independientes provienen de la misma población (Montgomery y Runger, 1996; Mendenhall y Sincich, 1997) (cuadro 7).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el cuadro 7, se puede observar que, en general, y entre un 80 y 90%, las series de datos no tienen diferencias significativas. Esto podría explicarse por la fuerte influencia glaciar en dichas estaciones, pertenecientes a la Región Metropolitana, lo que contrastaría con el resto de las estaciones que, en general, son eminentemente nivopluviales y podrían explicar el fenómeno expuesto. Sin embargo, cabe destacar el comportamiento de la estación Río Mapocho en Rinconada de Maipú, en donde todas sus series son significativamente diferentes. Esto podría deberse a que en la última década se ha dado un explosivo aumento urbano en la zona, sumado a situaciones meteorológicas, como lo es la concentración de las precipitaciones. Estas situaciones incidirían de forma directa en el comportamiento de los caudales máximos, además de que dicha estación se encuentra a la salida de la cuenca (Hawley y Bledsoe, 2011).

Cuadro 7. Resultados test U Mann-Whitney, para tres estaciones de las regiones Metropolitana, O'Higgins y del Maule.

Región	Estación	Serie			
		1965-1981/1982-2006	1970-1980/1990-2000	1965-1985/1986-2006	1975-1990/1991-2006
		Resultado			
Metropolitana	Río Maipo en El Manzano	Acepta H_1	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Maipo en San Alfonso	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Mapocho en Rinconada de Maipú	Acepta H_1	Acepta H_1	Acepta H_1	Acepta H_1
O'Higgins	Estero Alhué en Quilamuta	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Claro en Hacienda Las Nieves	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Claro en El Valle	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
Maule	Río Ancoa en El Morro	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Purapel en Nirivilo	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0
	Río Longaví en Quiriquina	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_1

Donde:

H_0 : las medianas de ambas poblaciones son idénticas.

H_1 : las medianas de ambas poblaciones son diferentes.

Conclusiones

Según el análisis realizado en el presente estudio, se concluye que los caudales presentan una tendencia a registrar mayores valores en las últimas dos décadas (1982-2006).

El aumento de estos caudales varía desde un 100% hasta un 14%, llegando incluso a diferencias del 900%, al compararse las series 1965-1981 y 1982-2006.

Por otro lado, el aumento de los caudales máximos anuales podría confirmar, desde el punto de vista hidrológico, procesos de cambio climático, lo que ha generado un mayor aporte de caudales, debido a que no se observan otros fenómenos que afecten mayormente a los caudales.

Por tanto, la situación descrita podría explicarse por el aumento de las temperaturas y se observaría un cambio en el comportamiento nival y glaciar. Esta situación corrobora lo descrito en los estudios de Carrasco *et al.* (2005 y 2008), quienes señalan el incremento de la isoterma 0° en la zona central de Chile.

Recibido: 22/05/12
Aceptado: 03/08/2012

Referencias

- APARICIO, F. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 11 ed. México, D.F.: Editorial Limusa S.A., 1997, 303 pp.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M. and BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*. Vol. 379, No. 1-2, 2009, pp. 111-121.
- APAYDIN, H., ERPUL, G., BAYRAMIN, I., and GABRIELS, D. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*. Vol. 328, No. 3-4, 2006, pp. 726-732.
- CARRASCO, J., OSORIO, R., and CASASSA, G. Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*. Vol. 54, No. 13, 2008, pp. 538-550.
- CARRASCO, J., CASASSA, G., and QUINTANA, J. Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 50, No. 6, 2005, pp. 933-948.

- CHOW, V., MAIDMENT, D. y MAYS, L. *Hidrología aplicada*. Bogotá: Editorial McGraw-Hill, Interamericana, S.A., 1994, 584 pp.
- COMBES, S., PRENTICE, M., HANSEN, L., and ROSENTRATER, L. Going, Going, Gone! *Climate change and global glacier decline* [en línea]. Gland, Switzerland, 2003 (consultado el 6 de diciembre de 2011). Disponible para *World Wide Web*: <http://www.wwf.fi/wwf/www/uploads/pdf/glaciersraportti.pdf>.
- FUENZALIDA, H., VILLAGRÁN, C., BERNAL, P., FUENTES, E., SANTIBÁÑEZ, F., PEÑA, H., MONTECINO, V., HAJEK, E., y RUTLLANT, J. Cambio climático global y eventuales procesos en Chile. *Revista Ambiente y Desarrollo*. Vol. V, núm. 2, Centro de Investigación y Planificación del Medio Ambiente, CIPMA, Chile, 1989, pp. 37-42.
- HAWLEY, R. and BLEDSOE, B. How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study. *Journal of Hydrology*. Vol. 4051, No. 2, 2011, pp. 69-82.
- HEUSSER, C., STREETER, S., and STUIVER, M. Temperature and precipitation record in Southern Chile extend to 43000 yr. ago. *Nature*. Vol. 294, 1981, pp. 65-67.
- IVANOVA, Y. y CORREDOR, J. Evaluación de la sensibilidad de los caudales máximos de diseño ante la influencia del cambio climático. *Avances en Recursos Hidráulicos*. Vol. 13, 2006, pp. 89-98.
- KROLL, C. and VOGEL, R. The probability distribution of low streamflow series in the Unit United States. *Journal of Hydrologic Engineering*. EEUU. ASCE. Vol. 7, No. 2, 2002, pp. 137-146.
- LEE, J.H. and HEO, J.H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*. Vol. 409, No. 1-2, 2011, pp. 30-48.
- MILLER, N., BASHFORD, K., and STREM, E. Potential Impacts of Climate Change on California hydrology. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 39, No. 4, 2003, pp. 771-784.
- MENDENHALL, W. y SINCICH, T. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 4a. ed. México, D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997, 1176 pp.
- MONTGOMERY, D. y RUNGER, G. *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México, D.F.: Editorial McGraw-Hill, 1996, 895 pp.
- MUNKA, C., CRUZ, G., and CAFFERA, R. Long term variation in rainfall erosivity in Uruguay: a preliminary Fournier approach. *GeoJournal*. Vol. 70, No. 4, 2007, pp. 257-262.
- OLLERO, A. *El curso medio del Ebro: geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Aragón: Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, 1996, 311 pp.
- ÖNOZ, B. and BAYAZIT, M.T. Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates. *Journal of hydrology*. Vol. 224. No. 1-2, 2001, pp. 86-96 (consultado el 6 de abril de 2008). Disponible en base de datos *Sicence Direct*.
- PAOLI C., CACIK P. y BOLZICCO J. Análisis de riesgo conjunto en la determinación de crecidas de proyectos de regímenes complejos. *Ingeniería del Agua*. Vol. 5, núm. 2, 1998, pp. 13-22.
- ROSENBLUTH, B., FUENZALIDA, H. y ACEITUNO, P. Recent temperatura variations in southern South America. *International Journal of Climatology*. Vol. 17, 1997, pp. 67-85.
- SULLIVAN, A., TERNAN, J. y WILLIAMS, A. Land use change and hydrological response in the Camel catchment, Cornwall. *Applied Geography*. Vol. 24, núm. 2, 2007, pp. 119-137.
- VICUÑA, S.R. GARREAUD, and MCPHEE, J. Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*. Vol. 105, No. 3-4, 2011, pp. 469-488.
- WAYLEN, P. and WOO, M. Prediction of Annual Floods Generated by Mixed Processes. *Water Resources Research*. Vol.18, No. 4, 2008, pp. 1283-1286.
- WHITAKER, A., YOUNES, A., BECKERS, J., and TOEWS, D. Evaluating peak flow sensitivity to clear-cutting in different elevation bands of a snowmelt-dominated mountainous catchment. *Water Resources Research*. Vol. 38, No. 9, 2002, pp. 1172.
- YUE, S., OUARDA, T., BOBÉE, B., LEGENDRE, P., and BRUNEAU, P. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis. *Journal of hydrology*. Vol. 226, No. 1-2, 2006, pp. 88-100.

Abstract

PIZARRO, R., BALOCCHI, F., VERA, M., AGUILERA, A., MORALES, C., VALDÉS, R., SANGÜESA, C., VALLEJOS, C., FUENTES, R., ABARZA, A. & OLIVARES, C. *Influence of climate change on peak flow behavior in central Chile*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 5-19.

This study analyzed the influence of climate change on peak flow behavior in the metropolitan region, Libertador Bernardo O'Higgins region and the area of Maule, central Chile. To this end, the Gumbel's PDF was applied, with which the best results for fitting peak flows were obtained, considering return periods of 10, 20, 30, 40, and 50 years. Thanks to the time-series segmentation of data, we concluded that the flow values tended to increase during the most recent periods. This is illustrated with mean values, trend charts and fitting of probability distribution functions. Finally, it was graphically and statistically shown that during recent years there has been an increase in maximum annual flows, which could be confirmed through hydrological climate change processes which have increasingly contributed to the flows through decreased snowpacks and glacial retreat from increased temperatures.

Keywords: *peak flows, climate change, probability density function, Mediterranean zone.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Roberto Pizarro
Ing. Francisco Balocchi
Ing. Mauricio Vera
Ing. Alejandra Aguilera
Ing. Carolina Morales
Ing. Rodrigo Valdés
M.C. Claudia Sangüesa
Ing. Carlos Vallejos
Ing. Roberto Fuentes
Ing. Alejandro Abarza
Ing. Claudio Olivares

Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental
Universidad de Talca
Avenida Lircay s/n, CHILE
Teléfonos: +56 (71) 200 375, 200 440, 200 442
Fax: +56 (71) 200 428, 200 455
rpizarro@utalca.cl
fbalocchi@utalca.cl
mvera@utalca.cl
maguil60@bancoestado.cl
camorales@utalca.cl
rodrigovaldes@utalca.cl
csanguesa@utalca.cl
cvallejos@utalca.cl
rob fuentes@utalca.cl
alabarza@utalca.cl
clolivares@utalca.cl