

Variabilidad hidrológica en la región del Biobío: los eventos El Niño en zonas templadas de Chile

Marcelo Araya Ojeda*
Federico Ignacio Isla**

Resumen

Los ríos del norte de Chile son particularmente sensibles a los eventos ENSO. Estos ciclos también afectan ríos de sus zonas templadas donde las estadísticas de crecidas están enmascaradas con otras originadas por lluvias locales. A través de registros hidrológicos se lograron identificar eventos ENSO en diferentes cuencas de la región del Biobío, tanto en grandes ríos provenientes de la Cordillera de los Andes (Itata, Biobío) como en pequeñas cuencas de la planicie costera. Se analizaron comparativamente los efectos de las crecidas de los años 1941, 1972, 2002, con especial referencia a los dos mayores ENSO registrados en los últimos años: 1982/83 y 1997/98. En ese sentido se precisaron comportamientos hidrológicos similares en su magnitud que deben considerarse en evaluaciones de riesgo y planificación territorial.

Palabras clave: Crecidas ENSO, Regímenes hidrológicos, Región del Biobío, Chile.

Hydrological variability in the Biobío region: El Niño events in temperate zones of Chile

Abstract

Rivers from Northern Chile are particularly sensitive to ENSO events. These cycles also strike on temperate watersheds where they are masked by other floods caused by local rainfall. Through hydrological records, events at the Biobío Region affecting both, the large watersheds draining the Andes Cordillera and the small watersheds from the coastal plain, were identified. The floods in 1941, 1972 and 2002 were comparatively analyzed with special reference to the major ENSO-triggered floods in 1982/83 and 1997/98. Similar hydrological behaviour was recorded and should be considered in risk assessments and land-use planning.

Key words: ENSO floods, Hydrological regimes, Biobío Region, Chile.

* Magister en Análisis Geográfico, UDEC, Concepción, Chile, e-mail: marayaojeda@hotmail.cl

** Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, CONICET-UNMDP, e-mail: fisla@mdp.edu.ar

Introducción

El fenómeno “El Niño-Oscilación del Sur” (ENSO por sus siglas en inglés) es una perturbación interanual del sistema climático caracterizado por un debilitamiento aperiódico de los vientos alisios y el calentamiento de las capas superficiales en el océano Pacífico Ecuatorial (Castillo Silva, 2003; Collins *et al.*, 2010). Este fenómeno está caracterizado por fuertes anomalías positivas (durante años El Niño) o negativas (durante años La Niña) de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en regiones costeras del océano Pacífico tropical (aunque puede extenderse tanto al norte como al sur) que se prolongan por varios meses. Las anomalías positivas de TSM se asocian al hundimiento de la termoclina y la reducción de la surgencia costera, mientras que las anomalías negativas se asocian a una elevación de la termoclina y al fortalecimiento de la surgencia. El nivel del mar también experimenta anomalías positivas (durante El Niño) y negativas (durante La Niña), en la región del Pacífico tropical y la costa sudamericana (Bello *et al.*, 2004; Maturana *et al.*, 2004).

En cuanto a las precipitaciones, estas disminuyen durante los efectos ENSO en Colombia y en la vertiente pacífica de América Central, noreste de Brasil. En cambio, las precipitaciones aumentan significativamente en Perú, Ecuador, Chile, sur de Colombia y afectan cuencas atlánticas de Paraguay, Brasil y Uruguay. Se evidencia también aumento de precipitación y caudales de ríos en Chile central (Waylen y Caviedes, 1990) e incrementos de caudales de ríos en Perú (Gutiérrez *et al.*, 1998), Argentina central (Werlinger *et al.*, 2004), Paraguay, Uruguay y sur de Brasil (Isla y Toldo, 2013). Estos aumentos de caudales han tenido efectos muy perjudiciales en algunas ciudades importantes como Porto Alegre, Santa Fe, Rosario, Buenos Aires, entre otras más.

En Chile central, las precipitaciones y su relación con la Oscilación del Sur presentan un grado de estacionalidad de las precipitaciones, observándose que la distribución de las mismas asociadas a efectos ENSO aumenta durante los meses de junio, julio y agosto entre los 30° y 35° latitud sur; en tanto que entre los 35° y 38° latitud sur el aumento en precipitaciones es evidenciado entre los meses de octubre y noviembre. Al sur de los 38° S la manifestación del ciclo ENSO es diversa, con características climáticas de tipo cálido/seco y frío/húmedo (Montecinos y Aceituno, 2003). Se ha mencionado que además de los efectos ENSO la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) tiene efecto sobre los ciclos hidrológicos (Nuñez *et al.*, 2013), aunque en Chile central los efectos ENSO son más importantes hacia el norte mientras los PDO son más efectivos hacia el sur (Rubio-Álvarez y McPhee, 2010).

En este contexto, el presente trabajo describe los cambios en los caudales medios mensuales de diversas cuencas de la región del Biobío en función de estadísticas históricas y mediante comparaciones con otras cuencas del norte. Este análisis cobra particular interés si se considera que la región del Biobío presenta un régimen

pluvial con promedios anuales de 1.000 mm con precipitaciones que superan los 3.000 mm/año en áreas cordilleranas.

Área de estudio

La región del Biobío, Chile, ubicada entre 36 y 37° latitud S y entre 71 y 73° longitud W (Fig. 1) presenta una superficie aproximada de 37.068 km². En esta región las precipitaciones que aumentan de norte a sur tienen un incremento muy significativo (Fig. 2).

Se ha explicado que en Chile a partir de 34° S aumentan las lluvias ciclónicas de verano inducidas por los vientos del oeste (Veit, 1996). Esto conlleva insuficiencias en el volumen anual de agua por habitante hacia el norte de Santiago y una disponibilidad de 10.000 m³/hab/año hacia el sur de la capital (Valdés-Pineda *et al.*, 2015). Los ríos del norte de Chile se alimentan de nieve acumulada, los del sur por lluvias y los de la zona central por nevadas y lluvias (Valdés Pineda *et al.*, 2014). Por otro lado, series temporales informan que las lluvias estarían disminuyendo en el último siglo (1901-2005) en Chile (González-Reyes y Muñoz, 2013; Meza, 2013) por lo que las variaciones en el caudal de los ríos se hacen críticas en algunas regiones (Valdés-Pineda *et al.*, 2015).

Algunas cuencas pueden haber sido significativamente afectadas por los cambios en el uso del suelo generados por incrementos en las áreas forestadas (Iroumé y Palacios, 2013) con impactos erosivos muy significativos durante los trabajos de talado (Bathurst *et al.*, 2011). Para este análisis se consideraron 18 estaciones fluviométricas. Las dos cuencas más grandes de la región (Itata y Biobío) están orientadas hacia el NO, condicionadas por las fallas geológicas oblicuas a las cordilleras de Chile, como la falla activa del Biobío que limita los segmentos de Concepción y Arauco (Hackley *et al.*, 2006).

La región posee una población de 2.036.443 habitantes de acuerdo a proyecciones del INE de 2010 (Universidad de Concepción, 2010) 83 % concentrada en ciudades. La provincia de Concepción concentra 912.889 habitantes, mientras que las demás poseen significativamente menor cantidad de habitantes: Ñuble (438.103), Biobío (353.315) y Arauco (157.255). La región tiene 5 puertos y otros 3 de menor importancia. Las intensas explotaciones forestales significan un significativo impacto en el balance hídrico y la erosión de cuencas (Iroumé y Palacios, 2013). Por otro lado, si bien algunas localidades han sido mapeadas como de riesgo de inundación por tsunami como Talcahuano, Santa Clara, Las Salinas o la desembocadura del río Andalién (Falcón *et al.*, 2010), existen otras localidades como Hualpén que han sido impactadas por las inundaciones del río Biobío de 2006.

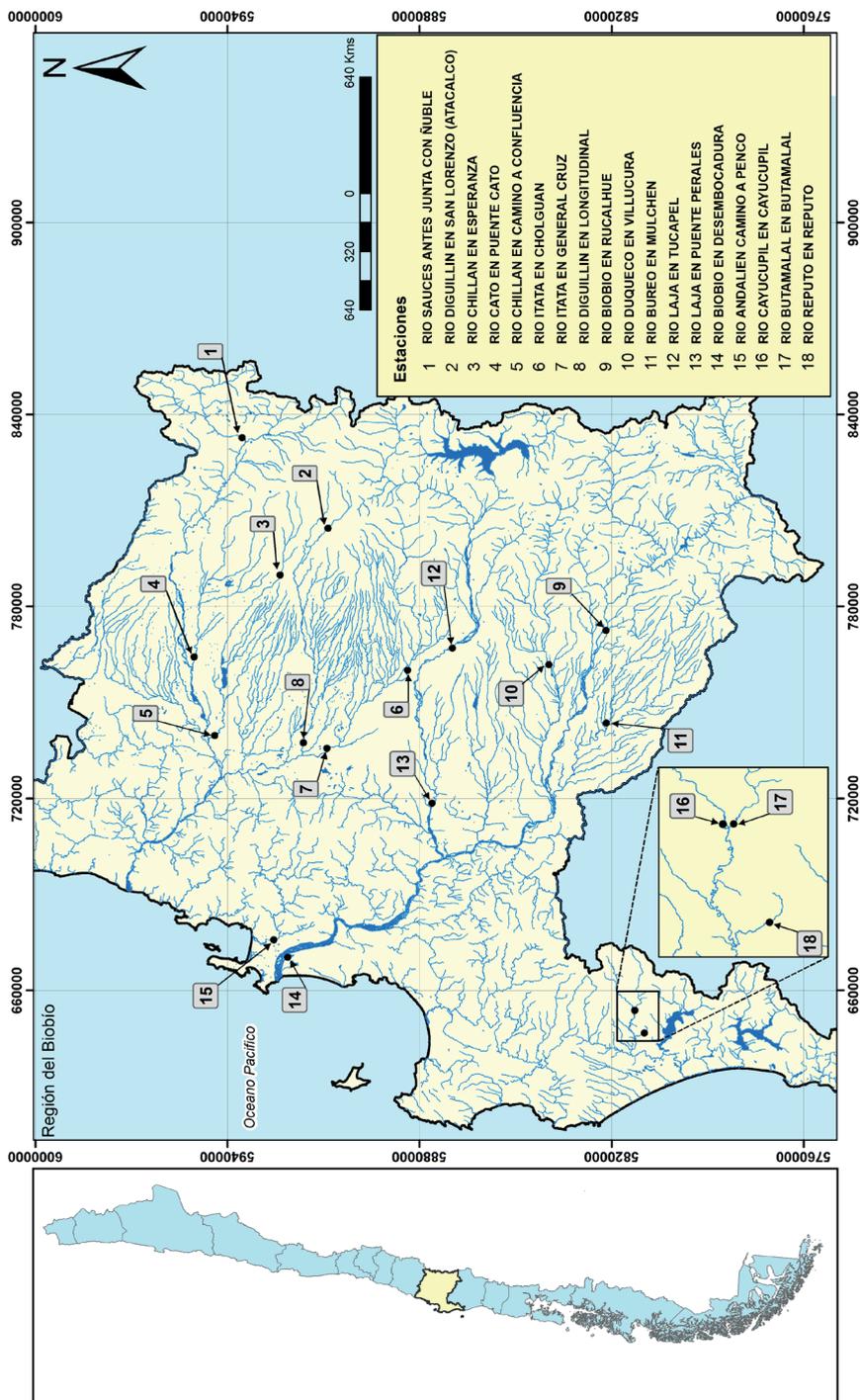


Figura 1. Estaciones de aforo en la región del Biobío, basada en la carta 1:50.000 del IGM, datum WGS 1984, huso 18.
Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

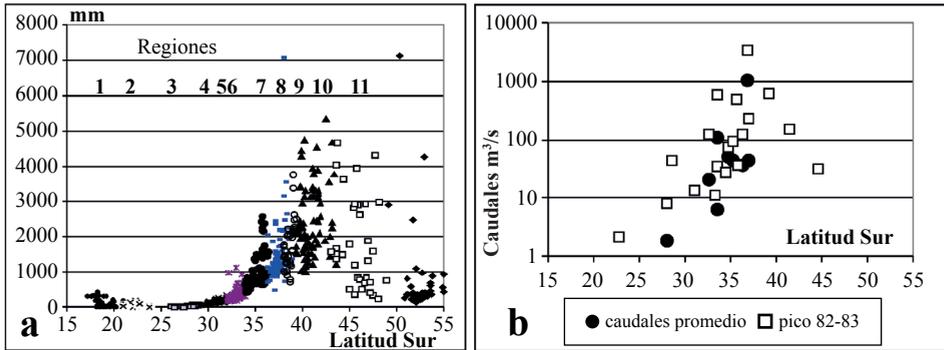


Figura 2. Precipitaciones medias (mm) en relación con la latitud (izquierda). Fuente: Valdés-Pineda *et al.*, 2014. Caudales medios (m³/s; círculos) y máximos (m³/s; cuadrados) durante las crecidas ENSO de 1982-83 (derecha). Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Materiales y métodos

Se recopiló información correspondiente a las estaciones fluviométricas de la región, registradas en el Banco Nacional de Aguas (BNA) de la Dirección General de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas. Se utilizaron datos oficiales de áreas de drenaje y estaciones de aforo de la misma DGA. Se realizó una revisión de estas estaciones para seleccionar las que poseían más de 30 años de aforo. Se seleccionaron estaciones distribuidas homogéneamente con preferencia para las ubicadas en las planicies costeras de modo de evitar sesgos por nevadas ocasionales. Se consideraron los afluentes de los dos grandes ríos de la región, Itata y Biobío, y pequeñas cuencas menores. Como indicador de la recurrencia de eventos ENSO se seleccionó la serie temporal del Índice Oceánico El Niño (ONI), disponible en la *website* de la agencia NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Fig. 3). Conjuntamente con estos datos se utilizó la información histórica recopilada por Quinn (1993) (Tabla I), que considera años con grandes precipitaciones en Chile subtropical (St Chile Ann), indicando además la intensidad de los ciclos registrados (Str).

Los datos de cada estación se procesaron mediante el software FrecWin con el objeto de determinar las probabilidades de ocurrencia de los caudales mensuales estimados durante los eventos ENSO y su intensidad sobre los caudales medios mensuales de cada estación. Los caudales medios mensuales recopilados fueron analizados según su distribución histórica y, en relación con los ciclos ENSO, haciendo distinción estacional de los caudales medidos. Algunos registros no se han logrado medir, particularmente aquellos que correspondieron con eventos extremos. Para la comparación, los caudales estivales y primaverales se consideraron separadamente de los de otoño e invierno.

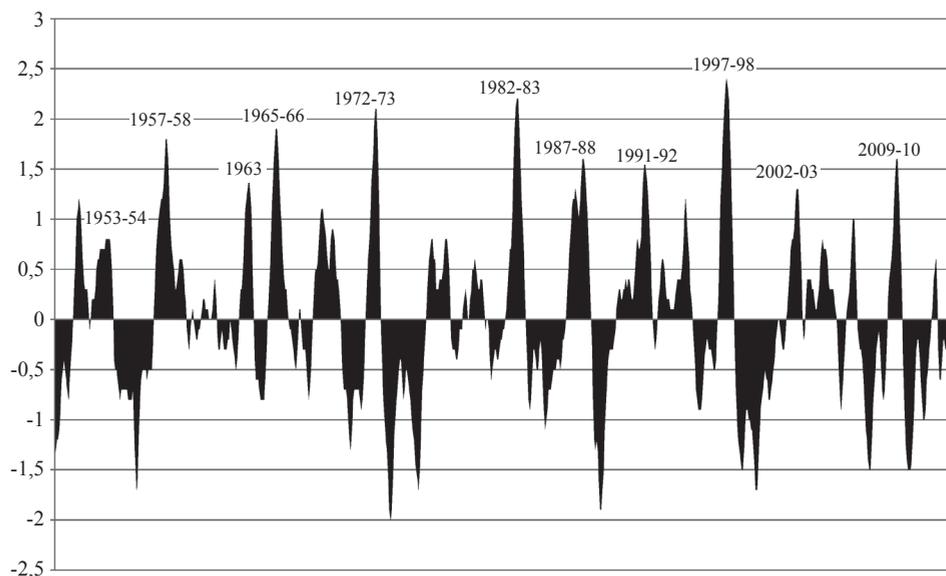


Figura 3. Índice Oceánico El Niño. Fuente: NOAA.

ENSO	Grado de intensidad	El Niño	St Chile Ann (+)
1913-1915	F+	1914-E15	1914
1918-1920	F+	1918-19	1919
1923	M	1923	-
1925-1926	F	1925-26	1926
1929-1931	M+	L1930-E31M	1930
1932	M+	1932	-
1939	M	1939	-
1940-1941	MF	L1940-41	1941
1943-44	M	1943	1944
1951-1952	M+	1951	-
1953	M	1953	1953
1957-58	F	1957-58	-
1965-66	F	1965	1965
1968-69	M-	1969	-
1972-73	F+	1972-E73	1972
1976-77	M	1976	-
1982-83	MF	L1982-M83	1982
1986-87	M	1987	1987
1991-92	F	1992	1991

Tabla I. Eventos ENSO registrados en el siglo XX antes de 1993. Los grados de intensidad se consideran moderado (M) fuerte (F) y muy fuerte (MF) con valores intermedios + o -. Fuente: modificado de Quinn, 1993.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico descriptivo y probabilístico según distribuciones normal, Gumbel, LGamma-3, Lognor, Gamma, para probabilidades de excedencia u ocurrencia (PE) de 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 % a modo de determinar la recurrencia de los caudales observados durante los eventos ENSO. Algunos de estos métodos han sido repetidamente utilizados en la región (Waylen y Caviedes, 1990; Pizarro *et al.*, 2006). En relación con lo anterior, es relevante indicar que la temporada de riego en la región del Biobío se concentra principalmente entre los meses de noviembre a marzo. Fuera de este período las bocatomas de los canales de regadío permanecen cerradas, por lo tanto, los caudales registrados en las estaciones fluviométricas y utilizados en el análisis probabilístico representan mayoritariamente el régimen natural de las cuencas en estudio.

Resultados

Se analizaron los registros de algunas estaciones pluviométricas de la región consignando alturas, áreas de las cuencas, caudales medios y máximos (Tabla II).

Río	Estación	Altura (m)	Área (km ²)	Lapso	Qm (m ³ /s)	Qmáx (m ³ /s)
Ñuble	Sauces	620	595	1967-2013	31,4	160
Cato	Cato	123	868	1956-2013	38,9	290
Chillán	Esperanza	435	224	1939-1944	15,5	70
Chillán	Confluencia	40	674	1957-2013	20,2	310
Diguillin	San Lorenzo	727	162	1946-2013	16,6	90
Diguillin	Longitudinal	80	1.232	1956-2013	46,5	120
Itata	Cholguan	220	852	1924-2013	44,6	210
Laja	Pte. Perales	65	3.425	1957-2013	151	600
Duqueco	Villucura	228	918	1941-2013	54,9	250
Bureo	Mulchén	133	567	1929-2009	45,7	820
Biobío	Rucalhue	261	7.044	1937-2013	454,7	1.600
Biobío	Desembocadura	16	21.217	1970-2013	983,6	4.400
Andalién	Camino a Penco	7	718	1960-2013	12,2	120
Butamalal	Butamalal	51	118	1950-1991	6,1	44
Cayucupil	Cayucupil	47	167	1950-1983	10,2	70
Reputo	Reputo	53	15	1950-1983	0,46	2,2

Tabla II. Alturas, áreas drenadas, caudales medios y máximos de las estaciones pluviométricas consideradas. Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Cuenca del río Itata

Este río posee un caudal medio de 136 m³/s y reúne las cuencas de los ríos Ñuble, Cato y Diguillin (Fig. 1).

▪ Estación río Ñuble en junta con el Sauce

La estación ubicada en cota 620 m cuenta con 44 años de registro (1967-2013), siendo la segunda de mayor altitud de la región (Tabla II). Los caudales medios mensuales registrados durante los ciclos ENSO no presentaron un aumento homogéneo durante los periodos de ocurrencia. De todos modos, se han registrado picos mensuales de 160 m³/s. Sin embargo, en esos años se generan variaciones considerables de los caudales durante los meses de septiembre a diciembre. Esta cuenca registra picos coincidentes con los ENSO de 1972 y 1997, aunque no tuvo registro durante el ENSO 1982-83 (Fig. 4).

▪ Estación río Cato en Puente Cato

La estación ubicada en el río Cato cuenta con un registro de 58 años con algunos vacíos de información mensual, principalmente durante años previos a 1979. Presenta características similares a la ya descrita en Ñuble, con un comportamiento similar en cuanto a su respuesta a los años ENSO. Su caudal medio es de 40 m³/s (Rubio-Álvarez y Mc Phee, 2010), aunque tuvo picos máximos mensuales de 290 m³/s (Tabla II). Los caudales medidos en la estación tuvieron un aumento de caudales mensuales durante los años 1972, 1982-83, 1986-87, 1997 y 2002, aumentos de caudales que se manifiestan principalmente durante los meses de septiembre a noviembre, siendo los de septiembre y octubre los que permiten determinar los efectos del fenómeno de El Niño.

▪ Estación río Chillán en Esperanza

La estación ubicada en cota 435 m cuenta con registros desde 1939 hasta 1994 (56 años). Se evidencia relación entre los caudales medios mensuales y los años ENSO de 1940-41, 1972 y 1982. Sus valores máximos mensuales alcanzaron 70 m³/s. En esta cuenca un porcentaje de su precipitación es retenida como nieve, condición que se verifica para los años 1940-41 y 1991-92, ya que en el primero de los ciclos (40-41) hubo un desfase en el aumento de los caudales (Fig. 4).

▪ Estación río Chillán en camino a Confluencia

Esta estación de 48 años de registro (1957 al 2013) tuvo varios años sin mediciones por lo que su análisis se realiza solo en términos referenciales. Se confirmó aumento de los caudales medios mensuales durante los años 1972, 1982, 1997 y 2002 (Fig. 4) con valores máximos de 310 m³/s. Los caudales medios durante

los años 1972 y 1997 presentaron caudales pico inferiores a los observados para el resto de los años; no obstante, durante esos dos años hubo mayor cantidad de meses con caudales elevados.

▪ *Estación río Diguillin en San Lorenzo*

Esta estación ubicada en cota 727 m cuenta con 68 años de registro (1946-2013) y corresponde al punto de mayor altura de la cuenca del río Itata. Posee un caudal medio de 17 m³/s (Rubio-Álvarez y Mc Phee, 2010). Un aspecto a considerar de esta estación es que un porcentaje de su precipitación queda retenida como nieve en los sectores altos, condición que probablemente genera retardos en las crecidas. La cuenca ha sido objeto de estudios de detalle y simulación (Zuñiga *et al.*, 2012). Se pudo constatar en los registros de septiembre a diciembre aumentos de caudal en los años 1972, 1977 y 1982. En el año 1997 no hubo caudales elevados como se esperaría para un ENSO fuerte (Fig. 3) aunque en 1970 alcanzó valores mensuales de 90 m³/s. De manera similar a lo observado en la estación río Sauce de la cuenca del Ñuble, los caudales estivales no permitieron relacionar el comportamiento del cauce con los ciclos Niño. De igual manera, los caudales de otoño-invierno presentaron una alta variabilidad de sus mediciones. Sin embargo, fue posible apreciar algún grado de correspondencia entre los años ENSO con el mes de agosto.

▪ *Estación río Diguillin en Longitudinal*

La cuenca del río Diguillin ha sido objeto de estudios específicos que han procurado simular su comportamiento (Zuñiga *et al.*, 2012). Como se encuentra aguas abajo de la estación de San Lorenzo presenta características geomorfológicas disímiles. Su área de drenaje es 7,6 veces mayor y se ubica en cota de 80 m por debajo de la anterior. La estación cuenta con un registro de 53 años, con datos faltantes anteriores a 1981. Posee un comportamiento similar a la cuenca del río Itata. Los caudales medidos en esta estación indican un aumento de su régimen durante los años Niño de 1972, 1982, 1987, 1997 y 2002 (Fig. 4) con valores máximos mensuales de 120 m³/s.

▪ *Estación río Itata en Cholguan*

Corresponde a una de las estaciones de la región con registro más largo y con información más completa (1924 a la actualidad). Su registro permitió identificar las crecidas de al menos 6 eventos ENSO observándose el aumento del caudal durante los eventos 1926 (para el año 1925 solo cuenta con datos en septiembre), 1944, 1953, 1972, 1982 y 2002, destacándose los caudales aforados en 1972, 1982 y 2002 (Fig. 4). El máximo caudal mensual alcanzó 210 m³/s (Tabla II). El evento ENSO de 1941 no tuvo efecto en esta estación aunque es considerado el segundo en importancia del siglo pasado (Quinn, 1993).

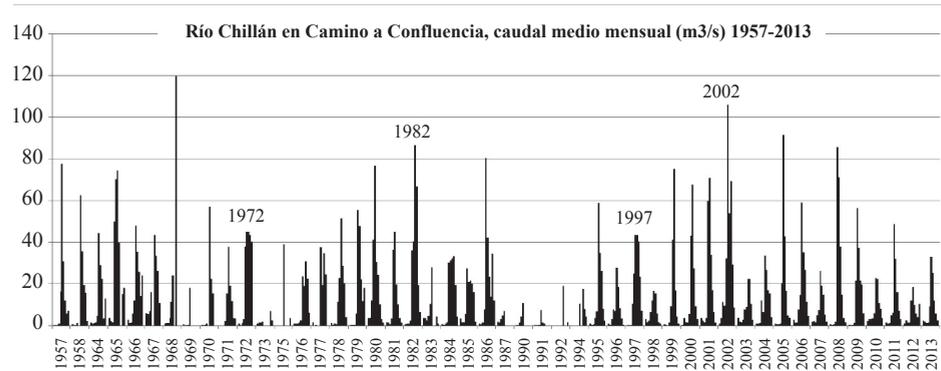
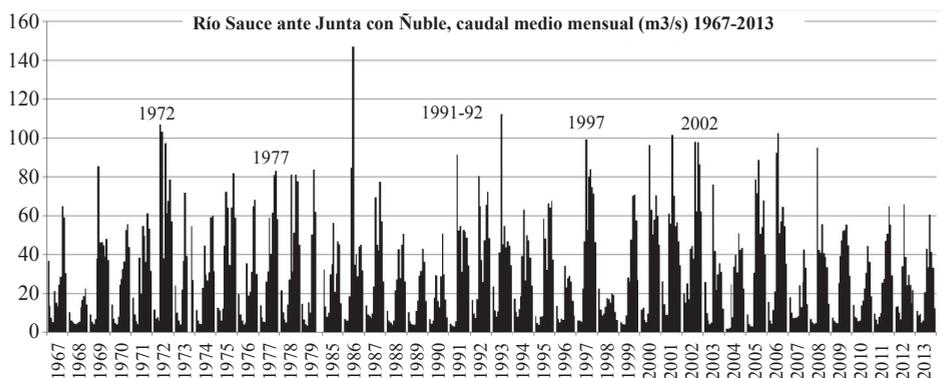
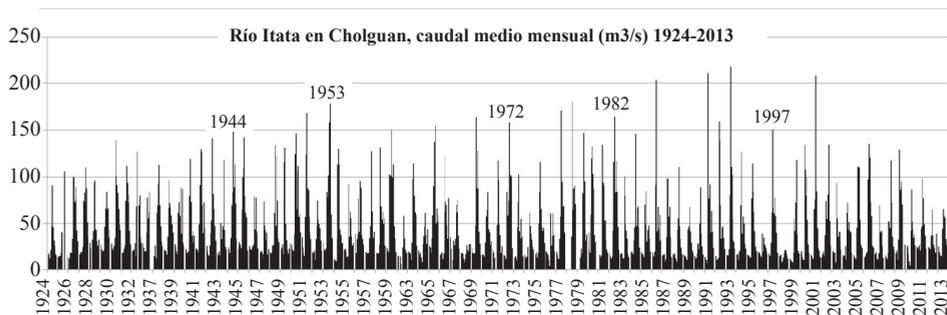


Figura 4. Máximos de descargas mensuales de la cuenca del río Itata.
Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Estaciones del río Biobío

Para esta cuenca se consideraron las estaciones en sus afluentes: Laja, Duqueco y Bureo (Fig. 1).

▪ Estación río Laja

Esta estación cuenta con un registro de 54 años efectivos de medición (aunque con solo dos meses de registro en el intervalo 1973-1974) y posee un área de drenaje de 3.425 km². Un porcentaje importante de esta superficie se encuentra en el valle central de la región, que en términos de generación de escorrentía es considerablemente inferior a la observada en el sector cordillerano. La cuenca está altamente intervenida por sistemas productivos agrícolas. Existe una serie de canales que extraen grandes volúmenes para riego, las extracciones inician normalmente entre los meses de noviembre a abril. En el sector alto de esta zona se encuentra la laguna Laja, reservorio con una capacidad actual de aproximadamente 7500 millones de metros cúbicos. De acuerdo con los estudios palinológicos, esta laguna tiene registros sedimentarios de los eventos ENSO durante los últimos 2.800 años (Torres *et al.*, 2008). La porción alta de esta cuenca fue muy afectada por los materiales aportados por el volcán Antuco cuya última erupción ocurrió en 1911 (Thiele *et al.*, 1998). Los resultados obtenidos del análisis de los caudales medios de la estación indicaron solo dos fluctuaciones positivas claramente identificables y atribuibles a los eventos ENSO de 1982 y 2002. El evento de 1972 de estrecha relación con los caudales de la mayoría de las cuencas analizadas precedentemente, en esta estación no presentó una diferencia considerable en la escorrentía normal del cauce, aunque es superior a la escorrentía media. Una leve distinción en los caudales se registró durante los eventos de 1965-66 y 1976-77 (Fig. 5). Esta situación probablemente fue causada por el efecto de las extracciones de agua para riego, toda vez que al comparar los caudales de la estación “Laja en Puente Perales” con los de la estación “Laja en Tucapel”, estos últimos evidencian claramente la influencia del evento de 1972-73. Esta situación se produce debido a que la estación de Tucapel se encuentra ubicada 55 km aguas arriba, de los principales canales de riego. Adicionalmente, la estación del río Laja en Tucapel, permite constatar eventos Niño antiguos como los de 1921 y 1972. Así fue posible identificar el incremento de caudales durante los eventos ENSO de 1926, 1930, 1941 y 1953 (Fig. 5) con valores máximos de 550 a 600 m³/s.

▪ Estación río Duqueco en Villucura

Se encuentra ubicada en uno de los afluentes más importantes del Biobío, con una superficie de drenaje de aproximadamente 918 km² y un registro de 73 años. Posee un caudal medio mensual de 56 m³/s (Rubio-Álvarez y McPhee, 2010) aunque los caudales de verano han disminuido significativamente en los últimos años por

aumento de los sectores con forestaciones artificiales (Iroumé y Palacios, 2013). La alta variabilidad de los datos en los meses de primavera es especialmente evidente para septiembre y en menor medida para octubre. En esta cuenca durante años Niña se registraron caudales máximos muy altos, incluso superiores a los observados durante los años Niño. No obstante, es posible identificar el efecto ENSO en la cuenca en función de la consistencia de las mediciones para cada año. Es decir, durante los años Niño se registran caudales elevados por un periodo mayor que el registrado durante los años Niña. De esta manera, es posible identificar variaciones positivas en los caudales del río Duqueco durante los eventos de 1941, 1944, 1972, 1982, 1997 y 2002 siendo los de 1941 y 2002 los de mayor productividad hídrica alcanzando valores $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 5).

▪ *Estación río Bureo en Mulchén*

La estación Bureo en Mulchén se encuentra en una cuenca que presenta un régimen de tipo pluvial, con una superficie aproximada de drenaje de 567 km^2 y un caudal medio de $42 \text{ m}^3/\text{s}$. La estación acumula 73 años de registro con un 15 % de datos faltantes. Esta cuenca es otra de las consideradas alteradas por un aumento del 50 % de los sectores forestados (Iroumé y Palacios, 2013). Las mediciones permitieron distinguir los caudales generados los años Niño de los caudales generados en años Niña o neutro. De esta manera, es posible apreciar un aumento de los caudales durante los meses de septiembre a diciembre de los años 1941, 1944, 1972, 1982, 2002 (Fig. 5). Existe un pico de 1953 que no corresponde a un año Niño (Quinn, 1993) y presenta además un caudal medio mensual en septiembre de prácticamente el doble de los caudales registrados para este mes en toda la estadística. No es posible establecer si efectivamente este elevado caudal responde a la influencia del fenómeno sobre la cuenca, toda vez que los meses de octubre a diciembre presentan crecidas normalmente. La alta variabilidad de datos durante los registros de septiembre pueden enmascarar los efectos ENSO en algunas cuencas. No obstante, los meses de octubre y noviembre logran correlacionarse con los eventos de oscilación del sur.

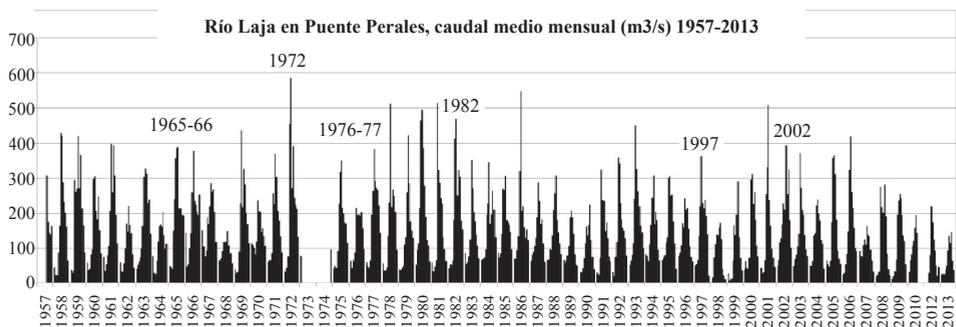
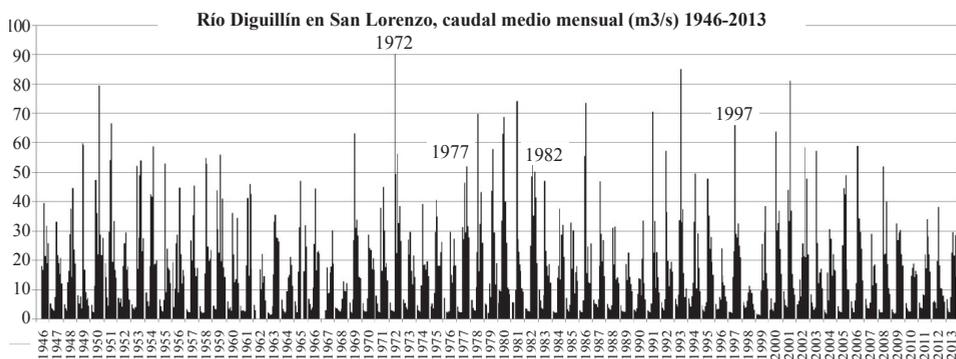
▪ *Río Biobío en Rucalhue*

Esta estación mide los caudales de la segunda área de drenaje de mayor tamaño de la región, con una superficie de 7.044 km^2 , captando las aguas principalmente del sector alto de la cuenca. Su productividad hídrica contempla efectos pluviales como nivales y posee uno de los registros más completos de la región, con un total de 75 años de medición. Dadas las características de la estación, los caudales medios mensuales muestran una gran variabilidad de sus datos, principalmente durante los meses invernales. Sin embargo, fue posible detectar aumentos durante los meses de septiembre a diciembre en los años 1941, 1943, 1953, 1976-77, 1982 y 2002 aunque no se registró el significativo ENSO de 1997. Los caudales

máximos alcanzaron valores de 1600 m³/s (Fig. 5). En esta cuenca, a diferencia de las descritas anteriormente, fue posible observar algún grado de correspondencia entre los años Niño y los caudales medios de los meses estivales de la temporada siguiente de ocurrido el fenómeno, condición similar a la descrita en la cuenca del río Aconcagua (Martínez *et al.*, 2012).

▪ *Estación Biobío en su desembocadura*

Corresponde a la estación que mide los caudales de la cuenca más grande de la región y una de las mayores de Chile, con un área aportante de 21.217 km². Los caudales medios durante los meses de septiembre a diciembre son relativamente homogéneos y no permiten evidenciar con claridad los caudales asociados a los eventos Niño. Durante los eventos de los años 1972, 1982 y 1997 fue posible apreciar caudales mayores al resto de los años y una mayor consistencia en cuanto a la cantidad de meses con caudales relativamente elevados (Fig. 5). Los valores mensuales máximos registrados alcanzaron 4.400 m³/s.



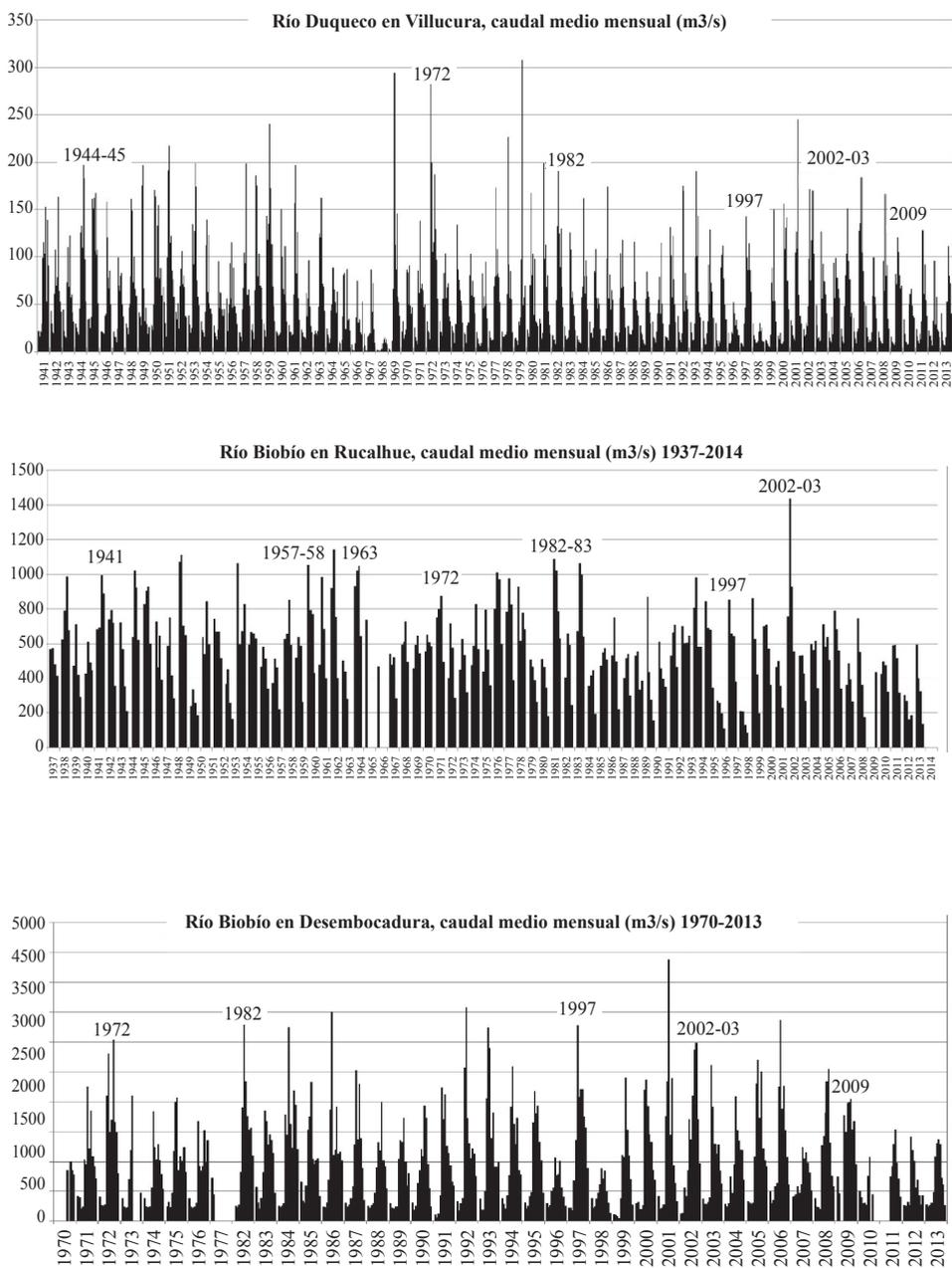
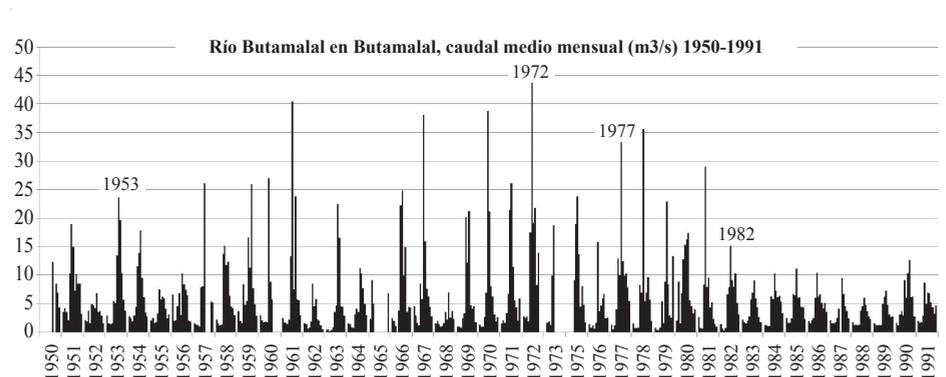
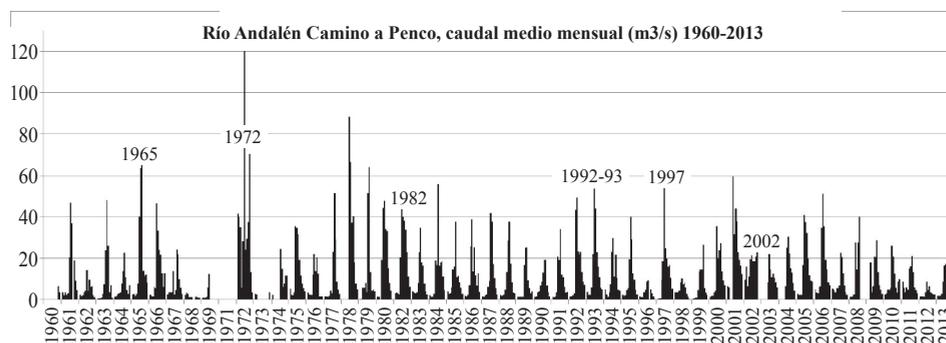


Figura 5. Máximos de descargas de la cuenca del río Biobío.

Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Río Andalién, Penco

Esta estación cuenta con registros de 1960 a la fecha, drena una superficie de 775 km² de una planicie costera hacia la Bahía de Concepción (Jaque Castillo *et al.*, 2004). Presenta un régimen tipo pluvial, con importante influencia del clima costero, encontrándose la estación a solo 7 m s.n.m. De manera similar a lo observado en las estaciones anteriormente descritas, los caudales estivales no reflejan los efectos de los eventos Niño sobre la escorrentía normal del cauce. De igual manera, los caudales de otoño-invierno dada su alta variabilidad y dispersión en general enmascaran las posibles influencia de los años ENSO. Los caudales medios mensuales para los meses de septiembre a diciembre entre los años 1960 a 2013 dejan de manifiesto el aumento de la escorrentía del río durante la ocurrencia de los eventos ENSO (Fig. 6). Durante el año 1972 existió un aumento de caudal (máximo de 120 m³/s), específicamente durante los meses de septiembre y octubre; menos abultados fueron los caudales medidos durante los eventos de 1982, 1992, 1997 y 2002. Los caudales del año 1997, a pesar de corresponder a un evento Niño de gran intensidad, no superaron los valores normales del río. Sin embargo, es posible diferenciar este período del resto en relación con la persistencia de los caudales en el tiempo.



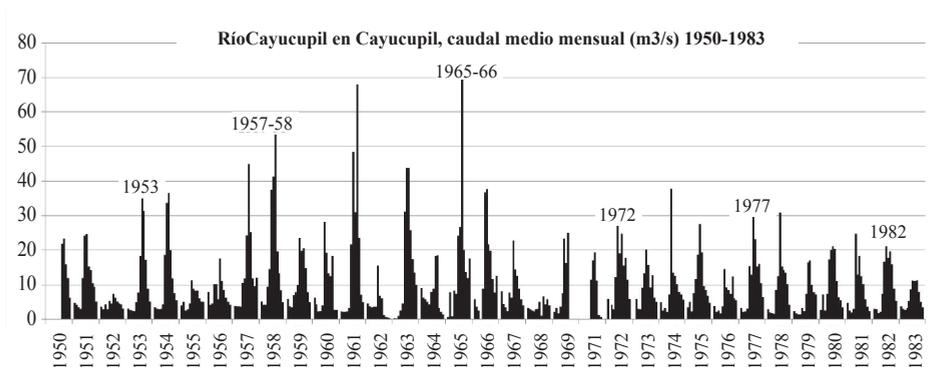


Figura 6. Máximos de descargas mensuales de las cuencas de los ríos Andalién, Butamalal y Cayucupil. Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Río Butamalal

Las estaciones de los ríos Butamalal, Cayucupil y Reputo se encuentran ubicadas entre la cordillera de Nahuelbuta y el océano Pacífico. Son cuencas costeras de régimen predominantemente pluvial. La cuenca del río Reputo posee extracciones para riego, pero a un nivel no muy significativo. A pesar de que las tres estaciones se encuentran ubicadas en la subcuenca del Río Cayucupil y por lo tanto, bajo condiciones climáticas muy similares, son analizadas en el presente estudio en virtud de ser representativas de las provincias de Arauco y Concepción. Solo las tres estaciones mencionadas anteriormente cuentan con información suficiente que permita entender la influencia de los eventos El Niño sobre las cuencas costeras del sureste de la región del Biobío.

La estación Butamalal cuenta con información fluviométrica de 41 años (1950-1991), con un 92 % de información mensual completa. Los resultados indican alta variabilidad de caudales especialmente durante septiembre. Se destacan al menos cuatro eventos Niño registrados como caudales medios mensuales y correspondientes a los eventos de 1953, 1972, 1977 y 1982. El de 1977 presenta mayor consistencia o relación con el evento oceánico; aunque para el año 1972 solo se contó con registro durante los meses de septiembre y octubre (Fig. 6) con máximos mensuales registrados de 44 m³/s.

Río Cayucupil

Esta estación sirve de validación de la anterior, ya que el cauce del río Cayucupil es paralelo al Butamalal (Fig. 1). Como además posee un área de drenaje similar (167 km²) su comportamiento hidrológico es también similar. El registro de la estación

es de solo 33 años, con un 95 % de la información mensual completa, comenzado sus mediciones en 1950 pero discontinuada en 1983. La estación presenta comportamiento similar en su respuesta a eventos ENSO, pero agregando dos oscilaciones positivas de sus caudales correspondientes a los años Niño de 1957 y 1965-66 (máximo valor de 70 m³/s), no observado en la estación de Butamalal (Fig. 6).

Río Reputo

El río Reputo (al igual que el río Butamalal) forma parte de la cuenca del Río Cayucupil y presenta una superficie de drenaje considerablemente inferior a las cuencas antes descritas, de solo 15 km² y un caudal medio anual que no supera los 0,45 m³/s (Tabla II). La estadística con la que cuenta la estación es similar a la del río Cayucupil, con 34 años de registro, comenzando las mediciones en 1950 y discontinuada en 1983. Hay tres fluctuaciones positivas de los caudales medios mensuales de la estación, que pueden ser relacionadas con el fenómeno oceánico del Niño, siendo estos los ocurridos en los años 1953, 1965 y 1972. Por otra parte, el evento de 1982 no generó variaciones en los caudales medios debido probablemente a las características geomorfológicas de la cuenca: reducidos tiempos de concentración y de su capacidad de retención de aguas precipitadas durante eventos de alta intensidad.

Comparación entre cuencas

Los eventos ENSO de 1941, 1972 y 1982 fueron los de mayor importancia en la región (Tabla I). Las cuencas costeras presentaron mayores crecidas durante el evento de 1972, en tanto las cuencas de montaña presentaron mayor relevancia durante el evento de 1982. Los efectos ENSO se registran con mayor precisión en las cuencas del norte de Chile (Magilligan *et al.*, 2008), siendo prácticamente las principales fuentes de crecida (Fig. 7).

En cambio en las cuencas de la región del Biobío (Itata, Biobío) los eventos ENSO están enmascarados por otras crecidas de dominio local y efectos retardados de la acumulación nival. Comparando los picos logrados en las crecidas ENSO más importantes -1982-83 y 1997-98- se reconoce una correlación que se ha registrado tanto para cuencas grandes y pequeñas de todo Chile (Fig. 8). Esta correlación entre máximos mensuales se puede considerar como una alternativa empírica para prever las crecidas mensuales máximas y de este modo planificar obras de defensa para otros eventos máximos esperables.

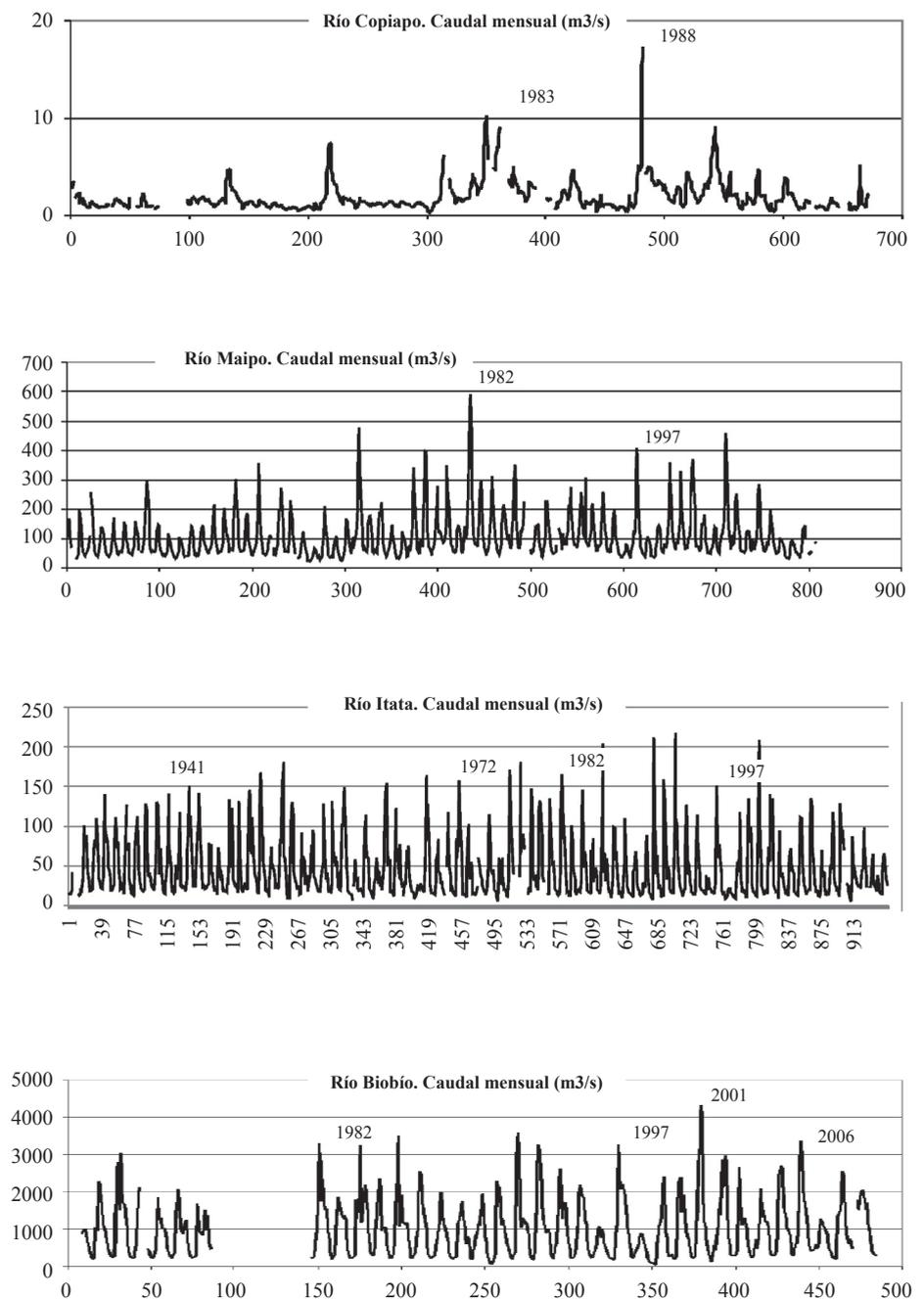


Figura 7. Caudales mensuales comparados de importantes ríos de Chile: Copiapó (aprox. 28° S), Maipo (33° S), Itata (36° S) y Biobío (37° S). Todas las escalas verticales en m³/s. Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

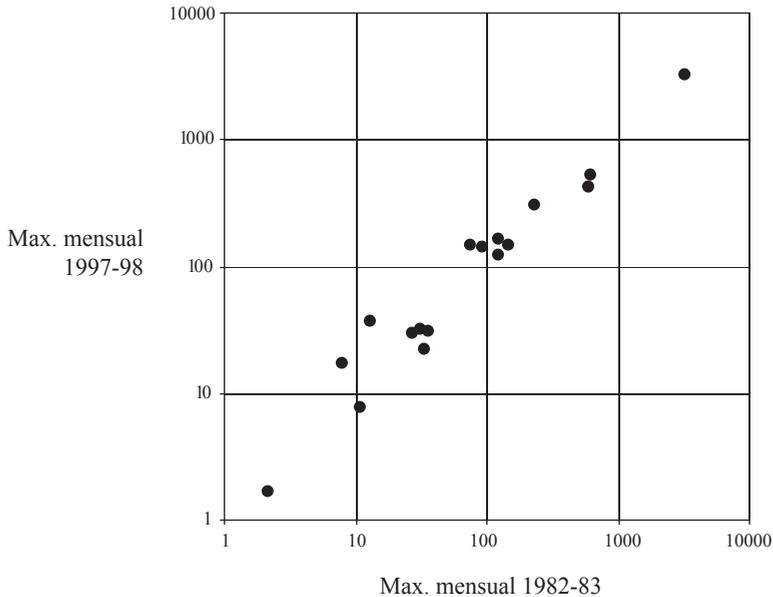


Figura 8. Correlación entre los máximos mensuales de las crecidas de 1982-83 y 1997-98 en diferentes cuencas chilenas. Fuente: elaborado por Ojeda e Isla.

Discusión y conclusiones

Existen referencias a los efectos ENSO sobre los ríos de Chile, fundamentalmente de las cuencas hidrográficas de Chile Central: Aconcagua (Waylen y Caviedes, 1990 y Martínez *et al.*, 2012) o Maipo (Meza, 2005). Para el sector entre los 35 y 42° S, se ha identificado al paralelo 38° S separando cuencas con mayor coeficiente de variabilidad hacia el norte y de menor variabilidad hacia el sur (Rubio-Álvarez y McPhee, 2010). No obstante, algunas de las cuencas del sur han tenido alteraciones significativas en el uso del suelo inducidas por incremento de las áreas forestadas (Iroumé y Palacios, 2013) que seguramente aumentan el riesgo de erosión de laderas durante eventos máximos.

De acuerdo con referencias previas (Quinn, 1993; Ortlieb y Macharé, 1993; Martínez *et al.*, 2012; Werlinger *et al.*, 2004), los eventos ENSO de mayor intensidad ocurrieron durante los años 1925-26, 1940-41, 1972-73, 1982-83, siendo el evento de mayor relevancia del siglo pasado el ocurrido entre mayo de 1997 y abril de 1998 (Tabla I). Sin embargo, los resultados hidrológicos de la región del Biobío indican que los eventos ocurridos durante el año 1972 y, en menor medida, los de 1982-83 y 2002 fueron los que tuvieron mayor efecto sobre sus caudales. Debe quedar claro que durante el ENSO de 1925-26 no existía la red fluviométrica actual.

Por otro lado, resulta necesario contrastar las diferentes respuestas de los eventos ENSO según las cuencas sean originarias de precordillera o cordillera, de aquellas integradas en el ámbito de la planicie costera. En estas últimas el evento de 1972 fue más importante que el ocurrido en 1982. Por el contrario las cuencas de sectores montañosos tuvieron mayores caudales durante el evento de 1982. Para las cuencas cordilleranas, los caudales de verano, otoño e invierno no identifican años ENSO; en cambio los caudales mensuales medios de primavera (septiembre-diciembre) son más susceptibles a lluvias ENSO. Las cuencas de la planicie costera, en cambio, son menos susceptibles a estas lluvias de septiembre con mayor dispersión de sus valores. La estación Biobío en Rucalhue a diferencia del resto de las estaciones presentó evidencias de la influencia del fenómeno El Niño en algunos años durante los meses estivales siguientes a la ocurrencia del fenómeno, y que ha sido atribuida a acumulaciones de nieve en la alta montaña derretidas durante el verano.

La identificación de los efectos del fenómeno El Niño sobre el registro de caudales de las distintas estaciones fluviométricas presenta una especial dificultad si se establece como factor de caracterización solo los caudales de cada mes, debido a un significativo grado de variabilidad en la región. Se han registrado caudales medios mensuales generados durante años Niña o normales (neutros) que superan a los observados durante la ocurrencia de un Niño. No obstante, fue posible discriminar el efecto de la variabilidad climática normal de la región al detectar que durante los años ENSO la variación positiva de los caudales presenta una mayor persistencia, aunque con solo 2 a 3 meses de caudales elevados. Gran parte de esta variabilidad se debe a la disponibilidad de agua en esta vertiente de los Andes. Ríos de la vertiente Atlántica como el río Colorado (Argentina), que drena una región desértica entre 37 y 39° S, fue sistemáticamente sensible a los eventos ENSO de 1919, 1941, 1953, 1972 y 1983 como único mecanismo de aporte de volúmenes de agua por encima de los valores medios (Isla y Toldo, 2013).

No obstante los progresos realizados y considerando el limitado registro de apenas 400 (histórico) o 50 años de registro (pluviométrico, fluviométrico), aún no es posible predecir si la actividad relacionada con los ENSO va a aumentar o disminuir, ni siquiera si cambiará la frecuencia de estos eventos (Collins *et al.*, 2010; Capotondi *et al.*, 2013).

Así y todo, podemos concluir que:

Las distintas respuestas de las cuencas expuestas a un mismo fenómeno ENSO dependen del tamaño y tipo de cuenca: cordillerana o costera. Mientras en el norte de Chile los eventos ENSO son prácticamente el único origen de crecidas, en las cuencas de los grandes ríos de la región del Biobío estos eventos están presentes aunque sus caudales máximos no están vinculados únicamente a estos ciclos interanuales.

Los eventos ENSO de mayor intensidad registrados en los últimos años (1982-83 y 1997-98) están correlacionados en sus máximos mensuales en cuencas de diferente caudal.

No obstante ello, las crecidas de 1972 fueron las de mayor significación en la región costera del Biobío.

Agradecimientos

Los trabajos fueron realizados en el seno de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción. Luis Cortizo colaboró con algunas figuras. Dos árbitros anónimos efectuaron útiles aportes al manuscrito original.

Referencias

Bathurst, J. C., Iroume, A., Cisneros, F., Fallas, J., Iturraspe, R., Gaviño Novillo, M., Urciuolo, A., De Bievre, B., Guerrero Borges, V., Coello, C., Cisneros, P., Gayoso, J., Mirando, M. & Ramirez, M. (2011). Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American Environments 1: Field data analysis. *Journal of Hydrology*, 400, (2011) 281-291. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.044

Bello, M., Castillo, M., Maturana, J., Valenzuela, C. & Barbieri, M. A. (2004). Featuring ENSO 1997-2000 in Central Chile. *Gayana (Concepción)*, 68 (2), 48-53. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071765382004000200008&lng=es&tlng=en. 10.4067/S0717-65382004000200008

Capotondi, A., Guilyardi, E. & Kirtman, B. (2013). Challenges in understanding and modelling ENSO. *Pages News*, 21 (2), 58-59. Recuperado de [http://www.pages-igbp.org/download/docs/newsletter/2013-2/PAGESnews_2013\(2\)_58-59_Capotondi.pdf](http://www.pages-igbp.org/download/docs/newsletter/2013-2/PAGESnews_2013(2)_58-59_Capotondi.pdf)

Castillo Silva, M. (2003). *Ciclos El Niño / La Niña s.l.* (Anuario SHOA Tomo 55). Recuperado del sitio de Internet del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile: http://www.shoa.cl/servicios/enos/pdf/2003_ciclos.pdf

Collins, M., An, S., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F. F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A., Vecchi, G. & Wittenberg, A. (2010). The impact of global warming on the Tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geoscience*, 3, (2010) 391-397. doi:10.1038/ngeo868

Falcón, M. F., Ramírez, P., Marín, M. & Arenas, M. (2012). Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante, Región del Biobío. Mapa 12-4: Peligro de inundación por tsunamis. En: *Geología*

para la reconstrucción y la gestión del riesgo, I. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago (Informe Registrado IR-10-43).

González-Reyes, A. & Muñoz, A. A (2013). Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque (Valdivia)*, 34 (2), 191-200. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071792002013000200008&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0717-92002013000200008.

Gutierrez, F., Piechota, T., & Dracup, J. (1998). Conexiones entre caudales de algunos ríos de la costa norte y central del Perú y El Niño. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*. 27, 829-838.

Hackney A, R. I., Etchler, H. P., Franz, G., Götze, H. J., Lucassen, F., Marchenko, D., Melnick, D., Meyers, U., Schmidt, S., Tasarova, Z, Tassara, A. & Wienecker, S. (2006). The Segmented Overriding Plate and Coupling at the South-Central Chilean Margin (36-42° S). En Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H. J., Ramos, V. A., Strecker, M. R. & Wigger, P. (Eds.), *The Andes* (pp. 355-373). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Iroumé, A, & Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 505 (2013) 113-125. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.031

Isla, F. I. & Toldo, E. E. (2013), ENSO impacts on Atlantic watersheds of South America. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 4 (1-2), 34-41. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v4i1-2.33032>

Jaque Castillo, E. C., Mardones Flores, M. & Rovira Pinto, A. (2004). Planificación ecológica aplicada a una cuenca costera de la Octava Región. La cuenca del Río Andalién. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 35, 141-154.

Magilligan, F. J., Goldstein, P. S., Fisher, G. B., Bostick, B. C. & Manners, R. B. (2008). Late Quaternary hydroclimatology of a hyper-arid Andean watershed: Climate change, floods, and hydrologic responses to the El Niño-Southern Oscillation in the Atacama Desert. *Geomorphology*, 101, (2008) 14-32. doi:10.1016/j.geomorph.2008.05.025

Martínez, C., Fernández, A. & Rubio, P. (2012). Caudales y variabilidad climática en una cuenca de latitudes medias en Sudamerica: Río Aconcagua, Chile central (33°S). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, 227-248.

Maturana, J., Bello, M. & Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. En Avaria, S., Carrasco, J., Rutllant, J. & Yáñez, E. (Eds.). *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile* (pp. 13-27). Valparaíso, Chile: Comité Oceanográfico Nacional.

- Meza, F. J. (2005). Variability of reference evapotranspiration and water demands: Association to ENSO in the Maipo river basin, Chile. *Global and Planetary Change*, 47, (2005) 212-220. doi:10.1016/j.gloplacha.2004.10.013
- Meza, F. J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, (2013) 51-58. doi:10.1016/j.wace.2013.07.002
- Montecinos, A. & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. *American Meteorological Society*, 16, (2003) 281-296. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0281:SOTERR>2.0.CO;2)
- National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service Climate Prediction Center (2014). Recuperado de: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>
- Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R. & Arumí, J. L. (2013). Influence of Pacific Ocean multidecadal variability on the distributional properties of hydrological variables in north-central Chile. *Journal of Hydrology*, 501, (2013) 227-240. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.035
- Ortlieb, L. & Machare, J. (1993). Former El Niño events: records from western South America. *Global and Planetary Change*, 7, 181-202.
- Pizarro, R., Araya, S., Farías, C., Flores, J. P. & Bro, P. B. (2006). The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology*, 327 (2006), 249-257. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.020
- Quinn, W. H. (1993). The large-scale ENSO event the El Niño and other important regional feature. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 1, 13-34.
- Rubio-Alvarez, E. & McPhee, J. (2010). Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, 46, (2010) W05514, doi:10.1029/2009WR007982.
- Thiele, R., Moreno, H., Elgueta, S., Lahsen, A., Rebolledo, S. & Petit-Breuilh, M. E. (1998). Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. *Revista Geológica de Chile*, 25 (2), 229-253.
- Torres, L., Parra, O., Araneda, A., Urrutia, R., Cruces, F. & Chirinos, L. (2008). Vegetational and climatic history during the late Holocene in Lake Laja basin (central Chile) inferred from sedimentary pollen record. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 149, (2008) 18-28. doi:10.1016/j.revpalbo.2007.10.001
- Universidad de Concepción (2010). Propuestas para la reconstrucción de la región del Bio Bío. Chile: Martinic, F. (Ed.).

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Perez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A. & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, (2014), p. 2538-2567. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.016

Veit, H. (1996). Southern westerlies during the Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in the Norte Chico, Northern Chile (27-33°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123, (1996) 107-119. doi:10.1016/0031-0182(95)00118-2

Waylen, P. R. & Caviedes, C. N. (1990). Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, Chile. *Journal of Hydrology*, 120, (1990) 79-102. doi:10.1016/0022-1694(90)90143-L

Werlinger, C., Alveal, V., K. & Romo, H. (2004). El Niño y la Oscilación del Sur. En Werlinger, C. (Ed.). *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos, Volumen I*. Concepción: Gobierno de Chile, Consejo Nacional del Libro y la Lectura.

Zúñiga, R., Muñoz, E. & Arumí, J.L. (2012). Estudio de los Procesos Hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y Proyectos*, 11, 69-78. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132012000100007>

Fecha de recepción: 18 de septiembre 2015

Fecha de aprobación: 23 de octubre de 2015

© 2016 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR