

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN EL HIDROCLIMA DE LOS  
ANDES MEDITERRÁNEOS (30° - 37°S) DESDE PRINCIPIOS DEL SIGLO XX**

**ÁLVARO GONZÁLEZ – REYES<sup>1</sup>**  
**JAMES MCPHEE<sup>2</sup>**  
**CARLOS LE QUESNE<sup>3</sup>**  
**DUNCAN CHRISTIE<sup>4</sup>**  
**MARIANO H. MASIOKAS<sup>5</sup>**  
**PAUL SZEJNER<sup>6</sup>**  
**ARIEL MUÑOZ<sup>7</sup>**  
**SEBASTIÁN CRESPO<sup>8</sup>**

**RESUMEN**

En la región de los Andes Mediterráneos (AM; 30°S – 37°S), los principales ríos alimentados por procesos de derretimiento entregan agua a más de 10 millones de personas a ambos flancos de la Cordillera. Los recursos hídricos están bajo una intensa presión debido al fuerte desarrollo de actividades agro-industriales y mineras. Actualmente, los AM están experimentando una de las más severas y extensas sequías registradas en los últimos 150 años. Estudios previos han identificado a ENSO como el principal modulador interanual del hidroclima en la región, sin embargo el rol de la variabilidad decadal y multidecadal permanece aún poco estudiada. En el presente trabajo caracterizamos los patrones espacio temporales del hidroclima de los AM

---

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado. Depto. de Geología y AMTC, FCFM, Universidad de Chile

<sup>2</sup> Profesor asociado, Depto. de Ingeniería Civil y AMTC, FCFM, Universidad de Chile

<sup>3</sup> Profesor Auxiliar, Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Universidad Austral de Chile

<sup>4</sup> Profesor Auxiliar, Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Universidad Austral de Chile y Center for Climate and Resilience Research (CR)<sup>2</sup>

<sup>5</sup> Investigador principal, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza, Argentina

<sup>6</sup> Estudiante de doctorado, Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR), University of Arizona, EEUU.

<sup>7</sup> Profesor auxiliar, Inst. de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile.

<sup>8</sup> Estudiante de doctorado, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT CONICET Mendoza, Argentina

basados en una extensa red de mediciones de caudales, precipitación y acumulación de nieve, que cubre el periodo 1910 – 2011. Los métodos utilizados han sido correlaciones, análisis de componentes principales, análisis espectral, y estimación de intervalos de sequías. Los resultados obtenidos muestran dos sub-regiones, una ubicada al norte de los 34°S y la otra hacia el sur. La señal interanual asociada a ENSO se encuentra en ambas subregiones, sin embargo es más fuerte al norte de los 34°S. En el caso de la señal decadal y multidecadal asociada a la PDO y a IPO, también se encuentra en ambas regiones, pero es más fuerte al sur de los 34°S. La tasa de ocurrencia de sequías muestra un incremento desde el año 1950 en ambas sub-regiones, destaca un abrupto incremento desde el año 1980 en la sub-región sur. Extensos y severos periodos de sequías en los AM estarían asociados a la actividad de la PDO e IPO, particularmente al sur de los 34°S.

## INTRODUCCIÓN

La cordillera de los Andes es la cadena montañosa más larga del hemisferio Sur, y funciona como una “torre de agua” para muchos países de Sudamérica ubicados entre los trópicos y la Patagonia (8°N – 55°S). Dentro de esta cadena, la región de los Andes Mediterráneos (AM; 30°-37°S y 68°-73°O) ha experimentado severos cambios ambientales caracterizados por: un incremento en la temperatura media del aire de 0,25°C por década en las últimas tres décadas (1979 – 2006; Falvey y Garreaud, 2009), una reducción del área glaciar (Bown et al., 2008, Masiokas et al., 2009) , una mayor elevación de la isoterma de 0°C (Carrasco et al., 2008), y una tendencia negativa de las precipitaciones desde comienzos del siglo XX (Vuille y Milana, 2007; Le Quesne et al., 2009; Quintana y Aceituno, 2012). Los ríos de los AM proveen de agua a más de 10 millones de personas considerando ambas vertientes de la cordillera entre Argentina y Chile, y son alimentados por procesos de derretimiento de nieve durante el periodo de deshielo (primavera – verano), siendo la acumulación de nieve la principal fuente de alimentación de los caudales durante dicho periodo (Masiokas et al., 2006).

Geográficamente, los AM se emplazan en el medio de dos importantes regiones macro-climáticas de Sudamérica, hacia el norte se encuentran los Andes desérticos y hacia el Sur los Andes templados (Liboutry, 1998). Los forzantes climáticos de escala global como El Niño Oscilación del Sur (ENSO) muestran una fuerte influencia sobre los AM, donde condiciones El Niño (La Niña) se asocian con años sobre (bajo) el promedio de precipitaciones (Rutllant y Fuenzalida, 1991; Garreaud et al., 2009), una acumulación de nieve positiva (negativa; Masiokas et al. 2006), y un incremento (decrecimiento) de las descargas de ríos (Aceituno y Garreaud, 1995; Cortés et al. 2011). Por otro lado, las fases positivas y negativas de la Oscilación del Pacífico Decadal (PDO) han sido asociadas con variaciones decadales en la precipitación (Garreaud et al., 2009), caudales y acumulación de nieve en los AM (Masiokas et al., 2010).

En los últimos años, la región de los AM ha estado afectada por severas y consecutivas sequías, lo cual ha producido una escasez hídrica y conflictos entre el sector económico, el gobierno y comunidades rurales. En este sentido, investigar sobre la evolución espacial y temporal de sequías en los AM es altamente prioritario en orden de evaluar los intervalos de retorno actuales de sequías extremas y hacer planificaciones de disponibilidad hídrica a futuro, y ayudar a refinar modelos climáticos regionales. Algunos estudios han evaluado espacialmente los intervalos de retorno considerando

reducciones en la precipitación (Nuñez et al., 2011), o la implementación de índices de sequías como el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI; Meza, 2013). Sin embargo, aun no se ha desarrollado un análisis espacio temporal combinando variables hidroclimáticas instrumentales como caudales, precipitación y acumulación de nieve.

En el presente estudio, analizamos un extenso y seleccionado grupo de registros instrumentales de caudales, acumulación de nieve invernal y precipitación de los AM con el objetivo de: i) identificar los principales patrones espacio temporales, ii) analizar la relación entre los patrones espacio temporales y forzantes climáticos de escala global como ENSO, PDO y la oscilación interdecadal del Pacífico (IPO), y iii) evaluar la tasa de ocurrencia de eventos de sequías a lo largo de los AM. Debido a que los AM se encuentran influenciados por dos macro regiones, al norte limita con desierto de Atacama y al sur con la ecorregión Valdiviana, esto hace pensar en una respuesta espacio temporal homogénea de los eventos de sequías a lo largo de este gradiente de humedad latitudinal.

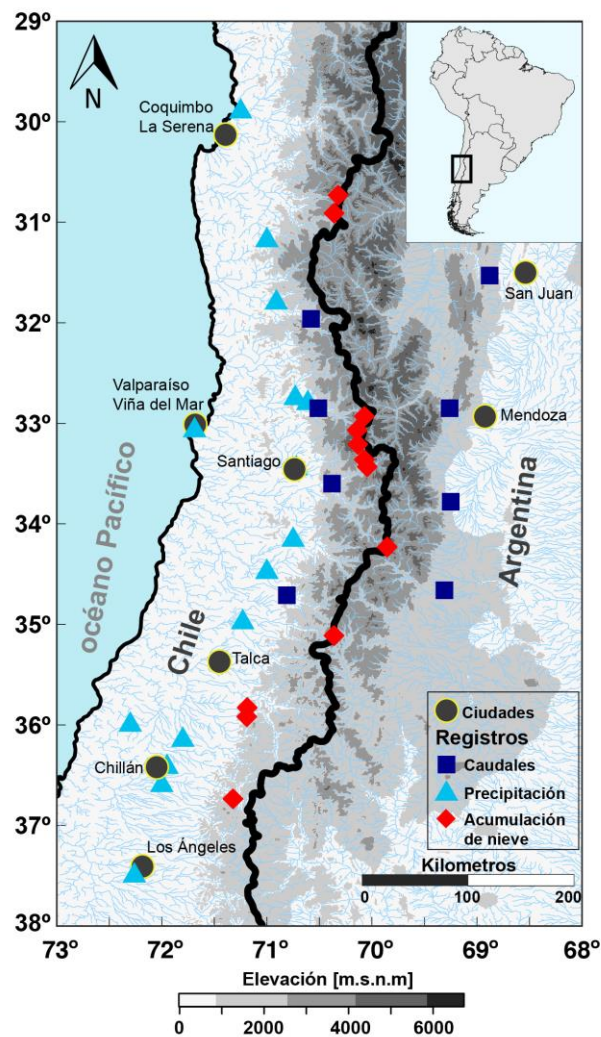
## MÉTODOS

### Área de estudio y configuración climática

Los Andes Mediterráneos se encuentran ubicados entre las latitudes 30° - 37°S y las longitudes 68° - 72°O (figura 1). Los valles están altamente poblados, con ~10.9 millones de habitantes considerando la población de Argentina y Chile. En el caso de Chile, 8.5 millones viven entre estas latitudes y representan más del 55% de la población total nacional (INE, 2003). En esta región, las descargas de los ríos son la principal fuente de agua potable. Por ejemplo, en la vertiente este, los ríos de montaña alimentan de agua a ~2.4 millones de personas, que se concentran en las provincias de Mendoza y San Juan ( INDEC, 2010). La agricultura, minería y actividades industriales son las principales actividades económicas en los AM.

Los AM están bajo la influencia de un clima mediterráneo, con una concentración de más del 70% de las precipitaciones entre los meses de mayo a agosto en la vertiente oeste, seguido de condiciones secas desde octubre. La mayor parte de la humedad es aportada por sistemas frontales provenientes del océano Pacífico, que precipita en forma de lluvia en las partes bajas y en forma de nieve en la cordillera (Miller, 1976; Aceituno, 1988; Garreaud, 2009). La sombra de lluvia producida por la cordillera al este (Argentina), y causada por las altas elevaciones de los Andes en estas latitudes (cumbres sobre 6000 m.s.n.m), hace variar los montos de precipitación y el grado de relación entre la cara oeste y este de los Andes. Por ejemplo, la estación Santiago Quinta Normal y Mendoza aeropuerto tienen una relación de  $r = 0.54$ , calculada entre los años 1960 – 2000. Sin embargo, el máximo anual de las precipitaciones ocurre en verano (diciembre a febrero), e inducida por la entrada de masas de aire húmedas provenientes del noreste y lluvias de origen convectiva (Prohaska, 1976). La diferencia del origen de la precipitación a ambos lados de la cordillera genera una distribución heterogénea de la precipitación a escala mensual. Por ejemplo, la precipitación anual acumulada promedio en la estación meteorológica Los Andes es de 269.5 mm, con un 77.9% concentrado en invierno (mayo a agosto). En la estación Mendoza aeropuerto de Argentina, la precipitación anual acumulada promedio es de 193.7 mm, con un 17.7% de agua caída en invierno y con un 74.6% caída durante primavera y el verano (octubre a marzo).

Ambos valores resultan al considerar del mismo periodo comparativo (1960 – 2000). A pesar de las diferencias en la distribución temporal de las precipitaciones a ambos lados de los Andes, la estacionalidad de las descargas de los ríos es extremadamente coherente, incrementándose durante la primavera - verano, donde ocurre el derretimiento. El resultado de este proceso hace que los ríos de Argentina y Chile presenten una fuerte intercorrelación promedio en el periodo de derretimiento ( $r$  promedio = 0,83;  $P < 0.001$ ; periodo 1954 – 2007).



**Figura 1.** Área de estudio y distribución espacial de las estaciones fluviométricas, precipitación y de acumulación de nieve a través de los AM.

#### Identificación de los patrones hidroclimáticos espacio temporales

Se utilizó una densa red de información instrumental de caudales (Q), precipitación (PP) y acumulación de nieve invernal (Sn) ubicadas a lo largo de los AM (Figura 1). Algunos registros partieron a principios del siglo XX (e.g. Precipitación de Santiago – Quinta Normal, caudal del río Mendoza en Argentina), lo cual permite analizar variaciones espacio temporales en un contexto de largo plazo. Los patrones espacio temporales se determinaron para cada variable usando análisis de componentes principales (ACP). En el caso de los caudales se utilizó la descarga anual promedio considerando el año hidrológico desde julio a junio, la cual incluye el periodo de derretimiento (octubre a

febrero). El cómputo se hizo para el periodo 1954 - 2007. La precipitación anual acumulada fue utilizada para el cómputo considerando el año desde enero a diciembre y el periodo 1960 – 2000. Finalmente, para la acumulación de nieve invernal se usó el periodo 1961 – 1990 debido al corto registro de las estaciones. Una vez identificados los dos primeros componentes principales para cada variable (PC1 y PC2), se seleccionó aquellas estaciones que registraron un factor de carga  $\geq 0.70$  en cada componente. Estas estaciones fueron seleccionadas para construir dos series hidroclimáticas sub regionales, integrando las tres variables (Q, PP y Sn). Se utilizó el periodo 1961 – 1990 para expresar cada variable en una variación porcentual respecto al promedio de dicho periodo, ya que tienen una magnitud física diferente. Las variables de Q, PP y Sn fueron promediadas entre ellas con el objetivo de construir series regionales expresadas en unidades porcentuales, permitiendo cubrir el periodo 1910 – 2011.

#### Relación entre los patrones hidroclimáticos y forzantes climáticos de gran escala

Para evaluar la relación interanual a decadal con los forzantes (ENSO, PDO e IPO), se utilizaron correlaciones de Pearson entre las variables hidroclimáticas y la temperatura superficial del mar (SST) de la región Niño 3,4 (N3.4), el índice de la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO) y el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). El índice N3.4 se basa en las anomalías de la SST de la región tropical Este del océano Pacífico 5°N-5°S, 170°-120°W y es usado como un indicador del comportamiento del fenómeno del Niño (Trenberth, 1997). El índice IPO representa el primer modo de variación de la SST de todo el océano Pacífico, representando una variación multidecadal de ENSO (Zhang et al., 1997; Power et al., 1999). Finalmente, el índice PDO está definido por el primer modo de variación de la SST desde los 20°N hacia el norte (Mantua et al., 1997). El detalle de los índices climáticos utilizados se encuentra resumido en la tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de los forzantes climáticos utilizados en este estudio

Climate index description	Period	Data source	Reference
Índice de Oscilación Interdecadal del Pacífico IPO	1871 – 2007	IGES <a href="http://www.iges.org/c20c/IPO_v2.doc">http://www.iges.org/c20c/IPO_v2.doc</a>	MetOffice, UK
Índice Niño 3,4 De ENSO	1866 - 2011	CPC, NOAA–NCEP <a href="http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/">http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/</a>	Trenberth (1997)
Índice de Oscilación Decadal del Pacífico PDO	1900 - 2011	JISAO <a href="http://jisao.washington.edu/data/pdo">http://jisao.washington.edu/data/pdo</a>	Mantua et al. (1997)

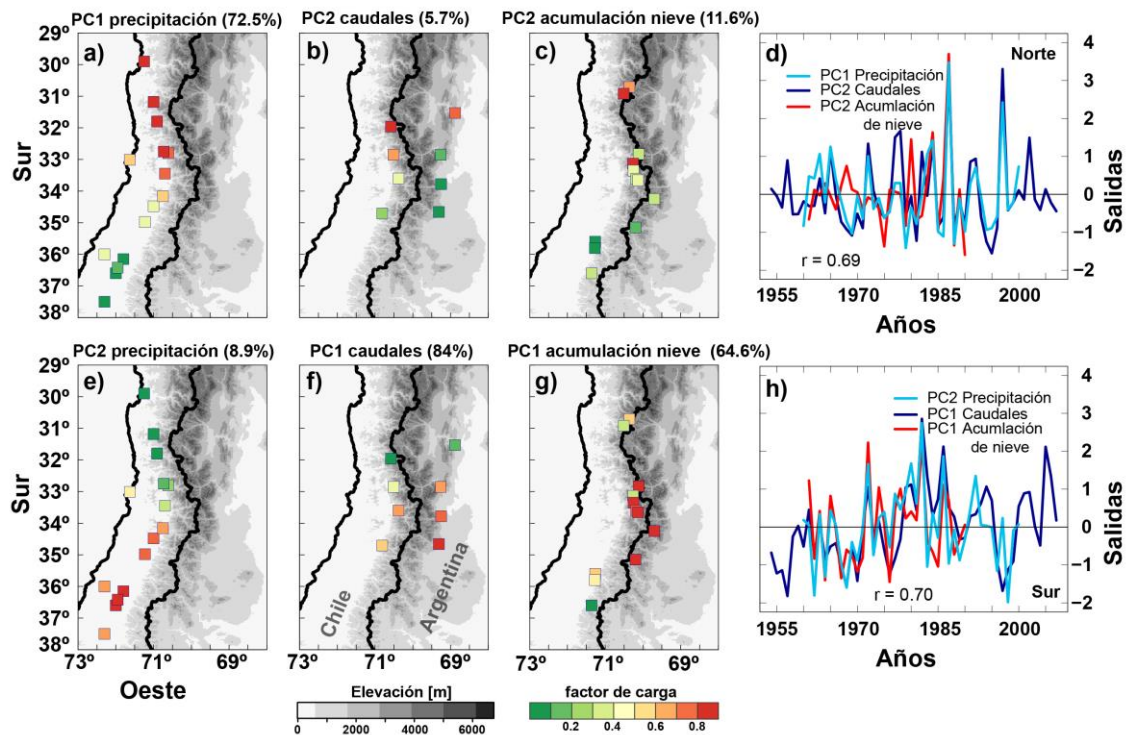
## Estimación de la ocurrencia de sequías

La ocurrencia de sequías fue estimada a través de la definición de un umbral dado por los valores de percentil (técnica POT). Se identificaron una serie de eventos definidos por valores menores o iguales al percentil 40 (P40), 20 (P20) y 10 (P10), los cuales fueron calculados para ambas series hidroclimáticas sub-regionales. Los eventos de sequías identificados bajo cada restricción permitieron estimar la tasa de ocurrencia de sequías usando un Kernel con una función Gaussiana utilizando un ancho de banda de 15 años. El uso de una función Kernel permite detecciones no lineales y no monotónicas y no impone restricciones paramétricas. Además, el uso de un Kernel produce una estimación de la tasa de sequías más realista que otros métodos. Para estimar el error asociado a la tasa de ocurrencia, se calcularon bandas de confianza a un  $P < 0.05$ , obtenidas en base a 1000 simulaciones usando la técnica bootstrap (Cowling et al., 1996). La estimación de la ocurrencia de sequías, y los cálculos anteriormente descritos fueron computados en el software de código abierto R (R core team, 2014).

## RESULTADOS

### Patrones hidroclimáticos espacio temporales

Se identificaron dos patrones espaciales, uno ubicado al norte de los 34° (patrón subregión norte) y el otro al sur de los 34°S (patrón subregión sur). El PC1 de la variable PP registró una concentración del 72,5% de la varianza total, un 84% en el caso de la variable Q, y un 64,6% para Sn. Una menor varianza es explicada por el PC2 de la PP (8,9%), un 5,7% para Q y un 11,2% para Sn. El hidroclima de los AM muestra un primer patrón con una variación temporal interanual y caracterizado por la subregión norte, el cual corresponde al PC1 de PP, el PC2 de Q y Sn (Figura 2a a 2d), y caracterizados por una alta intercorrelación ( $r$  Pearson promedio = 0.69;  $P < 0.001$ ). Espacialmente, el patrón sur está representado por el PC2 de la PP, el PC1 de Q y el PC1 de Sn, y exhibe una variación temporal decadal a multidecadal, con una correlación significativa entre los componentes de las tres variables hidroclimáticas (Figura 2e a 2h;  $r$  Pearson promedio = 0.70;  $P < 0.001$ ).

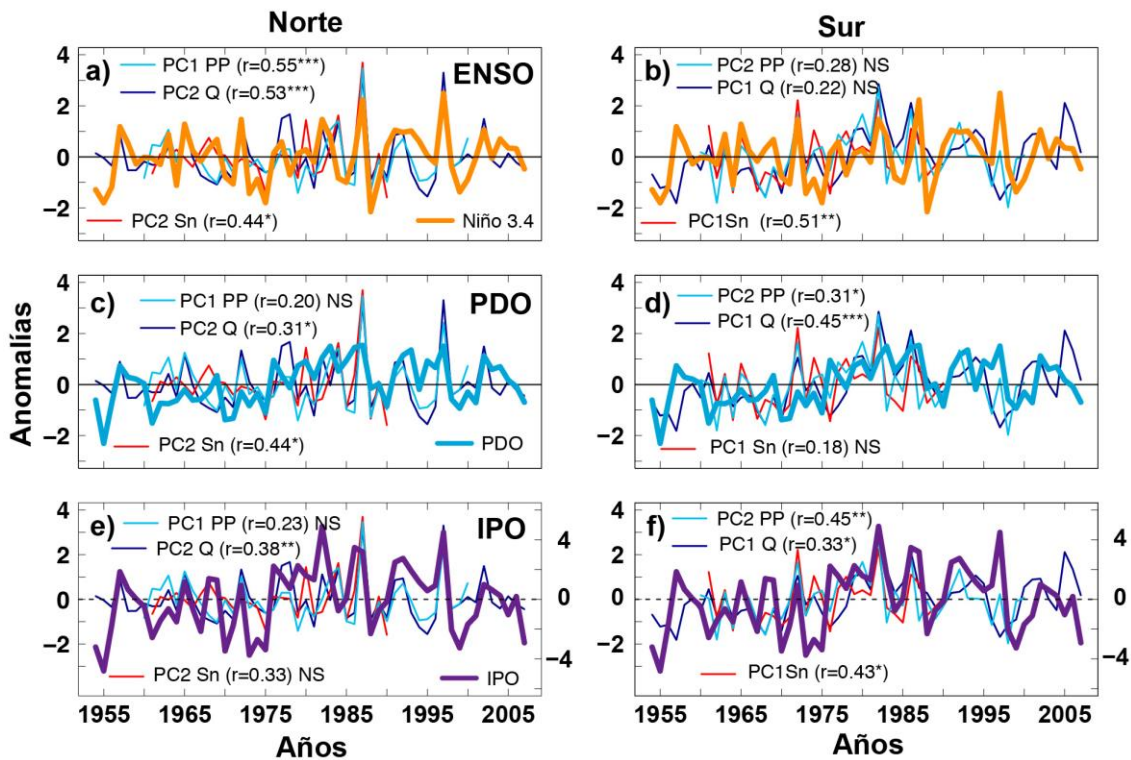


**Figura 2.** a - c) Representación espacial de los factores de carga de las variables PP, Q y Sn obtenido en base al ACP y correspondiente al patrón hidroclimático norte. d) representación temporal del patrón norte. e – g) Representación espacial de los factores de carga de las variables hidroclimáticas correspondiente al patrón sur, y h) representación temporal reproducido por el ACP de las variables estudiadas.

Relaciones interanuales a multidecadales entre los patrones hidroclimáticos y los forzantes climáticos de gran escala.

Las variables hidroclimáticas del patrón norte registran una correlación significativa con la actividad ENSO, usando el índice N3.4 de mayo a agosto. El PC1 de PP obtuvo la más alta correlación ( $r = 0.55$ ;  $P < 0.001$ , periodo 1960 – 2000), seguido por el PC2 de los caudales ( $r = 0.53$ ;  $P < 0.001$ ; periodo 1954 – 2007), y el PC2 de Sn ( $r = 0.44$ ;  $P < 0.05$ ; periodo 1961 – 1990; Figura 3a). En el caso del patrón Sur, sólo el PC1 de Sn obtuvo una correlación significativa con dicho índice de ENSO ( $r = 0.51$ ;  $P < 0.01$ ; Figura 3b).

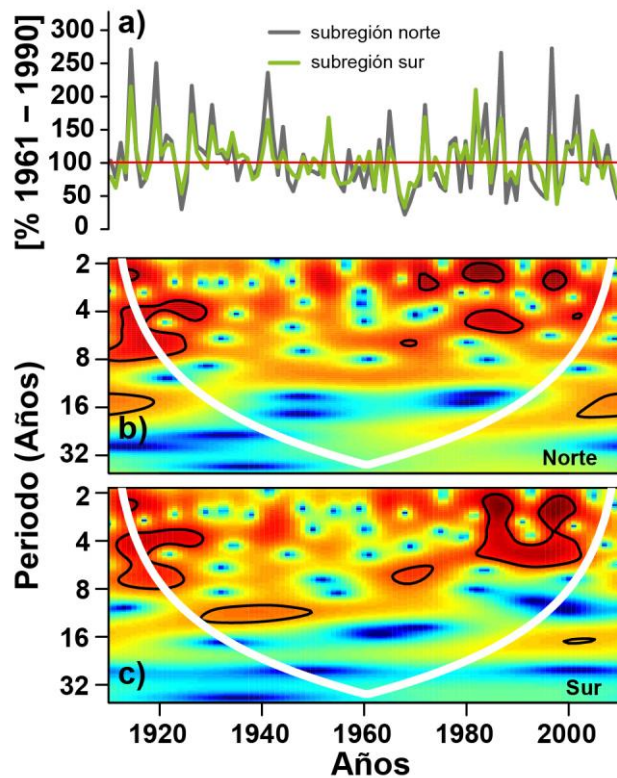
El forzante decadal PDO registró correlaciones significantes con el PC2 de Q ( $r = 0.31$ ;  $P < 0.05$ ) y el PC2 de Sn ( $r = 0.44$ ;  $P < 0.05$ ; Figura 3c), correspondiente a la subregión Norte. En la subregión Sur, las correlaciones fueron significantes con el PC1 de Q ( $r = 0.45$ ;  $P < 0.05$ ) y el PC2 de PP ( $r = 0.31$ ;  $P < 0.05$ ; Figura 3d). El forzante interdecadal IPO sólo ha registrado una correlación significativa con el PC2 de Q de la subregión Norte ( $r = 0.38$ ;  $P < 0.05$ ; figura 3e). Sin embargo, el forzante IPO obtuvo una mejor relación con las variables hidroclimáticas de la subregión Sur en contraste a la subregión Norte. Los valores de correlación fueron de  $r = 0.33$  entre el PC1 de Q e IPO, de  $r = 0.45$  con el PC2 de PP, y de  $r = 0.43$  con el PC1 de Sn (Figura 3f). Todas estas correlaciones son estadísticamente significantes ( $P < 0.05$ ).



**Figura 3.** a) Patrones temporales de PP, Q y Sn de la subregión norte y b) de la subregión sur contrastados con el índice Niño 3,4 de mayo a agosto. c) patrones temporales de la subregión norte y d) de la subregión sur, contrastados con el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico PDO. e) patrones temporales de la subregión norte y f) de la subregión sur contrastados con el índice de la Oscilación Interdecadal del Pacífico IPO. Los niveles de significancia son: \* $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , \*\*\*  $P < 0,001$ , and NS = no significativo.

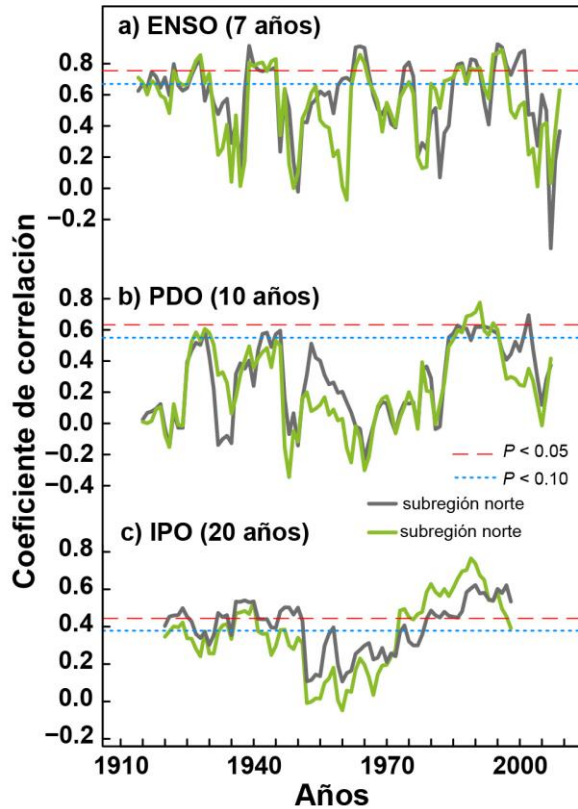
La Figura 4a representa los patrones hidroclimáticos subregionales norte y sur construidos en base al resultado del ACP mostrado en la figura 2. Ambas series cubren el periodo 1910 – 2011 y conservan las mismas propiedades capturadas por ambos patrones espacio temporales (modo de variabilidad interanual en la subregión Norte y modo de variabilidad decadal a multidecadal en la subregión Sur). Usando una onda Wavelet de transformada continua (WT; Torrence y Compo, 1998), el patrón Norte muestra una actividad significativa entre las bandas de aproximadamente 2 - 7 años, durante los periodos : 1920 – 1930 y 1970 – 2011 (Figura 4b). El patrón Sur muestra una similar señal espectral de alta frecuencia durante los mismos intervalos temporales como la captada por el patrón norte, y además una señal significativa de entre 12 – 14 años detectada entre 1930 – 1950 y de 8 – 10 años entre los años 1960 – 1970 (figura 4c).





**Figura 4.** a) Patrones hidroclimáticos de la subregión norte y sur expresado en valores de porcentaje respecto al periodo 1961 - 1990. b) y c) Señal espectral del patrón norte y sur, respectivamente utilizando un análisis espectral wavelet. En ambos paneles, las señales espectrales con el contorno negro son estadísticamente significantes a un valor de  $P < 0.10$ .

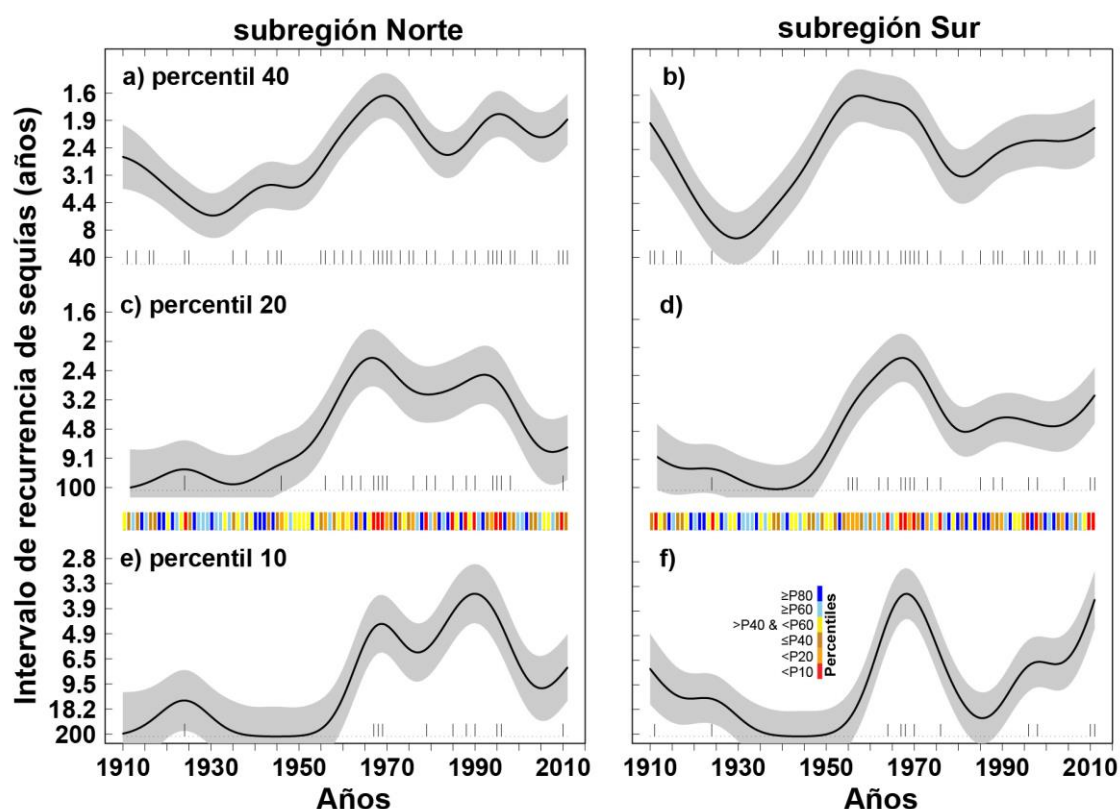
Si se contrastan ambas subregiones, en términos de correlaciones de Pearson con el índice Niño 3,4 usando una ventana móvil de 7 años, los valores de correlación son significantes entre los intervalos: 1973 – 1976, 1980 – 1990, y 1995 – 1997 (Figura 5a). Dentro de estos intervalos, varios eventos El Niño (e.g. 1982/1983, 1986/1987, 1997) y La Niña (e.g. 1975/1976, 1988/1989) de ENSO han sido registrados (Trenberth, 1997). Ambos patrones además muestran una coherencia con la fases positiva y negativa de la PDO, y similares valores de correlación entre los años 1910 – 2011, usando correlaciones móviles con una ventana de 10 años. Por otra parte los valores de correlación son significantes entre el patrón Sur y la PDO durante los años 1985 – 1995 (Figura 5b). Cabe destacar que los valores de correlación presentan una mayor variación en el patrón norte en comparación al patrón sur. El forzante IPO también ha registrado una variación temporal coherente con ambos patrones subregionales entre los años 1910 – 2011 utilizando una ventana móvil de 20 años. Este forzante ha registrado correlaciones significantes con el patrón Sur, especialmente entre los periodos: 1930 – 1950 y 1975 – 2000 (Figura 5c).



**Figura 5.** a) Correlaciones móviles de 7 años entre el patrón de las subregiones norte y sur y el índice Niño 3,4 de mayo a agosto. b) Correlaciones móviles de 10 años entre los patrones sur y norte y la Oscilación Decadal del Pacífico PDO, y c) correlaciones móviles de 20 años con la Oscilación Interdecadal del Pacífico IPO. Las líneas de color azul y rojo representan valores de correlación significantes a un valor  $P < 0,10$  y  $P < 0,05$ , respectivamente.

#### Recurrencia de sequías en los Andes Mediterráneos

La recurrencia de sequías muestran un comportamiento diferente al norte y sur de los 34°S. Para un umbral P40 (sequía moderada), cuatro eventos fueron registrados entre los años 1910 – 1925 en la subregión Norte, con un valor de ocurrencia de entre 3 – 5 años. Desde el año 1960 se ha observado un incremento en la ocurrencia de sequías moderadas, con una tasa de 1,6 años entre los años 1960 – 1970 (Figura 6a). La subregión Sur muestra una similar tasa de ocurrencia, que la subregión Norte entre 1910 a 1925, y una alta concentración de eventos de sequía moderada (19 eventos), entre los años 1945 – 1975 (Figura 6b). En adición, tres periodos son distinguidos entre los años: 1910 – 1925 (húmedo), 1930 – 1980 (seco), y 1980 – 2011 (húmedo a seco). La ocurrencia de eventos de sequias para un P20 (sequía severa) muestran un incremento desde el año 1950 en ambas subregiones, y con una recurrencia de eventos secos entre 2 a 5 años entre el periodo 1955 – 1970 (Figura 6c y 6d). Los eventos de sequias para un umbral P10 (sequía extrema), muestra un distribución temporal de las sequías similar al P20 en ambas subregiones. Un incremento de recurrencia de sequías es observado desde el año 1985 hacia el presente, con una recurrencia de 20 años en 1980, llegando a 3,5 años el 2011. En general, los tres valores umbrales utilizados muestran un incremento en la segunda mitad del siglo XX en todo los AM.



**Figura 6.** Tasa de ocurrencia de sequías (líneas negras) calculados en base a valores  $\leq$  al percentil 40 (P40; a - b),  $\leq$  al percentil 20 (P20; c - d), y  $\leq$  al percentil 10 (P10; e - f), calculados a través de una estimación utilizando una función Kernel con un ancho de banda de 15 años. Las bandas grises representan los intervalos de confianza para un valor  $P < 0.05$  obtenidos en base a 1000 simulaciones usando bootstrap. La banda de colores representa la distribución de valores  $\leq$  al percentil 10 hasta valores  $\geq$  percentil 80 obtenidos de las series subregionales norte y sur mostradas en la Figura 4a.

## DISCUSIÓN

El primer patrón hidroclimático de variabilidad interanual, reproducido espacialmente por la subregión Norte estaría estrechamente vinculado con la variabilidad producida por la actividad ENSO. Este resultado es congruente con estudios previos acerca de la relevancia que tiene ENSO sobre la precipitación de Chile Central (Escobar y Aceituno, 1998; Montecinos y Aceituno, 2003; Garreaud et al., 2009), la variabilidad de los caudales en Chile (Aceituno y Vidal, 1990; Aceituno y Garreaud, 1995), y en Argentina (Compagnucci et al., 2000), y la variación en la acumulación de nieve en invierno (Masiokas et al., 2006). Además, la fuerte influencia de ENSO sobre el hidroclima documentada en este trabajo, particularmente sobre la precipitación, apoyaría estudios como el de Carrasco et al. (2005), que sugiere una actividad de ENSO más fuerte al norte de los 34°S.

La relación entre las variables hidroclimáticas y la PDO son en general más estrechas en la subregión Sur en comparación a la subregión Norte. Sin embargo, variables como  $S_n$  muestran relaciones significantes con la PDO al norte de los 34°S. Nosotros pensamos que este resultado se debe al periodo de comparación entre  $S_n$  y la PDO (1961 - 1990), donde la PDO ha registrado una de sus fases positivas (húmedas) entre 1976 - 1990.

Además, dos importantes eventos de ENSO en su fase cálida (El Niño) han acontecido en los años 1982/1983 y 1986/1987. Los valores de acumulación de nieve y los caudales estuvieron sobre la media. Las bajas correlaciones entre el PC1 de Sn y la PDO en la subregión Sur podrían ser explicadas por otros factores climáticos, como la posición del Anticiclón del Pacífico (SPA). La acumulación de nieve está estrechamente relacionada con la precipitación, mientras que el régimen anual de precipitación está fuertemente afectado por la actividad de SPA (Aceituno, 1988; Montecinos and Aceituno, 2003). Sin embargo, existen otros procesos físicos y químicos relacionados con el derretimiento de nieve y hielo en la cordillera los cuales no son cuantificados en este estudio que pueden ser importantes de considerar en estudios futuros (e.g. balance de energía en glaciares, isotopía de nieve y hielo, tasas de infiltración de la escorrentía superficial, entre otros)

La ocurrencia de sequías muestra que bajo distintos umbrales, ambas subregiones tienen un comportamiento diferente. Sin embargo, en el caso de la ocurrencia de sequías moderadas, por ejemplo para un valor P40, ambas subregiones han respondido de forma similar en los AM. Esta respuesta similar puede deberse a la variabilidad interanual producida por la actividad ENSO sobre las variables hidroclimáticas analizadas a lo largo de los AM, y en la cual, la subregión norte estaría mayormente influenciada. La mayor variabilidad interanual, y la relación estrecha con ENSO que presenta la subregión Norte podría explicar que la ocurrencia de sequías sea del orden de 2 años, y que para sequías extremas, la subregión no muestre un incremento. En el caso de la recurrencia de sequías severas a extremas, la subregión Sur registra altas tasas de recurrencia concordantes con las fases positivas y negativas de la PDO e IPO. En el caso de la PDO, Mantua y Hare (2002) señalan una fase fría (condiciones secas) entre los años 1947 – 1976, y periodos cálidos (condiciones húmedas) entre los periodos 1925 – 1946 y 1977 – 1990. Un similar comportamiento temporal es observado en el forzante IPO. Rubio y McPhee (2010) registraron relaciones significantes entre los caudales invernales entre los 35,5° - 36,5°S y la actividad de la PDO. Apoyados en los resultados antes expuestos, y en los trabajos comentados, extensos y severos periodos de sequías severas y extremas en la subregión Sur estarían conectadas con la variabilidad decadal y multidecadal producida por la PDO e IPO.

Las estimaciones de las tasas de ocurrencia de sequías presentadas en este estudio son además congruentes con otros estudios. Nuñez et al. (2011), ha encontrado que, bajo una reducción del 40% de las precipitaciones normales al norte de los 34°S (subregión Norte), los intervalos de retorno de una sequía toma valores de entre 3 a 10 años, mientras que hacia el sur de los 34°S la recurrencia toma valores de 22 años. En nuestro caso, atribuimos estos resultados a la mayor conexión que muestra la subregión Norte con la actividad ENSO, y a una mayor conexión de la subregión Sur con la actividad decadal y multidecadal que tienen los forzantes PDO e IPO.

## CONCLUSIONES

- La región de los Andes Mediterráneos exhibe dos subregiones hidroclimáticas ubicadas aproximadamente al norte y al sur de los 34°S. La subregión Norte está mayormente conectada con la actividad ENSO, mientras que la subregión Sur responde a variaciones decadales y multidecadales relacionadas con los forzantes PDO e IPO.
- Las sequías moderadas en la subregión norte presentan una alta tasa de recurrencia, con una persistencia de condiciones secas desde 1950 hacia el presente. Los eventos de sequía extrema no muestran un incremento, particularmente en la última década.
- La subregión sur presenta extensos y severos periodos de sequías, con una alta tasa de recurrencia. Algunos de estos intervalos fueron registrados en la década del 1960 – 1970. Los eventos de sequía severos han aumentado, particularmente desde 1980 hacia el presente.
- Una mayor condición de sequía ha sido registrada particularmente en los últimos 50 años en toda la región de los Andes Mediterráneos.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el proyecto FONDECYT 1121106. Alvaro Gonzalez – Reyes quiere agradecer a Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. De Chile por su beca doctoral.

## REFERENCIAS

- Aceituno, P. 1988. On the functioning of southern oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Mon. Weather Rev.*, 116, 505–524
- Aceituno, P., F. Vidal. 1990. Variabilidad en el caudal interanual en ríos andinos en Chile Central en relación con la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Central. *Revista Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5, 7-19.
- Aceituno, P., R. Garreaud. 1995. Impactos de los fenómenos El Niño y La Niña en regímenes fluviométricos andinos. *Revista Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 10, 33- 43.
- Allan, R. 1992. *El Niño and the Southern Oscillation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bown, F., A. Rivera y C. Acuña . 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, 43–48.
- Carrasco, JF., G. Casassa y J. Quintana. 2005. 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* ,50, 933–948.

- Carrasco, JF., R. Osorio y G. Casassa. 2008. Secular trend of the equilibrium- line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations, *Journal of Glaciology*, 54, 538–550.
- Christie, D.A., J. Boninsegna, M. Cleaveland, A. Lara, C. Le Quesne, M. Morales, M. Mudelsee, D. Stahle y R. Villalba. 2011. Aridity changes in the Temperate-Mediterranean transition of the Andes since AD 1346 reconstructed from tree-rings. *Climate Dynamics*, 36, 1505–1521.
- Compagnucci, R.H., y S.A. Blanco. 2000. Variability in subtropical Andean Argentinean Auel river; a wavelet approach. *Environmetrics*, 11, 251 – 269.
- Cortés, G., X. Vargas, J. McPhee. 2011. Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*, 405, 93–109.
- Cowling, A., P. Hall, M.J. Phillips. 1996. Bootstrap confidence regions for the intensity of a Poisson point process. *J Am Stat Assoc*, 91, 1516–1524.
- Escobar, F., y P. Aceituno. 1998. ENSO influence on Andean winter snowfall in central Chile (in Spanish). *Bull. Inst. fr. étud. Andines*, 27, 753–759.
- Falvey, M., y R. Garreaud R. 2009. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, 1-16.
- Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 7, 1–9.
- Garreaud, R., M. Vuille, R. Compagnucci, y J. Marengo. 2009. Present day South American climate. *PALAEO*, 281, 180–195.
- INDEC, 2010: National census, 2010 (in Spanish). Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina.
- INE, 2003: National census, 2002 (in Spanish). Instituto Nacional de Estadísticas, Chile.
- LeQuesne, C., D. Stahle, M. Cleaveland, M.D. Therrell, J.C. Aravena, J. Barichivich. 2006. Ancient Austrocedrus tree-ring chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from a.d. 1200 to 2000. *Journal of Climate*, 19, 5731–5744.
- LeQuesne, C., C. Acuña, J. Boninsegna, A. Rivera, J. Barichivich. 2009. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *PALAEO*, 281, 334-344.
- Lliboutry, L. 1998. *Glaciers of South America*. USGS, Estados Unidos.
- Mantua, N. J., S.R Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, R.C Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069–1079.
- Mantua, N.J., y S.R. Hare. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
- Masiokas, M.H., R. Villalba, B.H. Luckman, C. LeQuesne, J.C. Aravena. 2006. Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J Clim*, 19, 6334– 6352.
- Masiokas, M. H., R. Villalba, B. H. Luckman, and S. Mauget. 2010. Intra - to multidecadal variations of snowpack and streamflow records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S, *J. Hydrometeorol.*, 11, 822–831.

- Meza, F. 2013. Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, 51 – 58.
- Miller, A. 1976. World survey of climatology. *Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam.
- Montecinos, A., y P. Aceituno. 2003. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. *J Clim*, 16, 281–296.
- Núñez, J.H., K. Verbist, J.R. Wallis, M.G. Schaefer, L. Morales, W.M. Cornelis. 2011. Regional frequency analysis for mapping drought events in north-central Chile. *Journal of Hydrology*, 405, 352 – 366.
- Power, S., T. Casey, C. Folland, A. Colman, y V. Mehta. 1999. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia, *Clim. Dyn.*, 15, 319–324
- Prohaska, F. 1976. World survey of climatology. *Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Quintana, J.M., y P. Aceituno. 2012. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43°S. *Atmosfera*, 25, 1 – 22.
- Rubio-Álvarez, E., y J. McPhee. 2010. Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003. *Water Resources Research*, 46, doi:10.1029/2009WR007982
- Rutland, J., y H. Fuenzalida. 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 11, 63–76.
- Torrence, C., y G.P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 78, 61–79.
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771–2777.
- Vuille. M., y J.P. Milana. 2007. High-latitude forcing of regional aridification along the subtropical west coast of South America. *Geophys Res Lett* 34:L23703. doi:10.1029/2007GL031899
- Zhang, Y., y J. M. Wallace, D.S. Battisti .1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *Journal of Climate* 10, 1004–1020.