



**Influencia de Eventos de Humedad y Sequía en Lagos de la Patagonia Argentina: el Caso de los Lagos Musters y Colhué Huapí**  
Influence of Wet and Dry Periods Over Argentinean Patagonic Lakes: a Case Study of Musters and Colhué Huapí Lakes

Facundo Scordo<sup>1,2</sup>; María Elizabeth Carbone<sup>1,2</sup>;  
María Cintia Piccolo<sup>1,2</sup> & Gerardo Miguel Eduardo Perillo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>CONICET, Instituto Argentino de Oceanografía,

Florida, 8000, Camino La Carrindanga, km 7,5, Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo,

12 de Octubre and San Juan, Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geología,

San Juan, 670, Bahía Blanca, B8000BFW, Buenos Aires, Argentina.

E-mails: scordo@agro.uba.ar; ecarbone@criba.edu.ar; ofpiccol@criba.edu.ar; gmeperillo@criba.edu.ar

Recibido em: 21/09/2017 Aprobado em: 19/10/2017

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_3\\_170\\_180](http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_170_180)

## Resumen

Se analizaron los períodos secos y húmedos en la cuenca del río Senguer y su influencia sobre las variaciones en el área de los lagos Musters y Colhué Huapí. La cuenca se localiza en el centro de la Patagonia Argentina, es de tipo endorreica y los lagos se encuentran en el sector inferior de la misma. Se aplicó el modelo de Palmer para calcular el Índice de Severidad de Sequía (PDSI) durante enero de 1997 a diciembre de 2012. A su vez, se procesaron imágenes Landsat correspondientes a todos los veranos durante 1998 a 2013 para calcular la variación interanual de la extensión del área de los lagos. Durante el período de estudio, el 37% de los meses se caracterizó por presentar condiciones de sequía de distinta intensidad, el 28% condiciones húmedas y el 35% condiciones normales. Los períodos de sequías más largos (2006-2007; 2011-2012), y los picos de intensidad de sequía ocurridos en junio 1999 (PDSI -2.5) y noviembre 2012 (PDSI -1.9), coincidieron con los períodos de decrecimiento del área de los lagos Musters y Colhué Huapí (1998 a 2001 y 2007 a 2013). El período húmedo más extenso (1997) y los máximos de intensidad de humedad ocurridos en junio 1997 (PDSI 3.4), Marzo 2001 (PDSI 3.4) y Junio 2005 (PDSI 4.6), coincidieron con el período de crecimiento del área de los lagos (1998 y 2001 a 2007). Se concluye que el PDSI es una herramienta útil para analizar las ocurrencias de eventos de sequía y humedad en la Patagonia Argentina. Es de gran importancia poder analizar dichos eventos en regiones semiáridas, donde los recursos hidrológicos son escasos. Además, el PDSI se basa en variables sencillas de medir (precipitación y temperatura). Esto es útil en regiones remotas y extensas, como la Patagonia Argentina, donde el monitoreo de variables meteorológicas es logísticamente costoso y difícil.

**Palabras-claves:** períodos secos; períodos húmedos; lagos; variación del área; Patagonia Argentina

## Abstract

Dry and wet periods in Senguer River basin, and its influences over the variations of the Musters and Colhué Huapí lakes area, located in the Argentinean Patagonia, were analyzed. The catchment is situated in the center of Argentinean Patagonia, it is endorheic, and the lakes are located at its lower sector. Palmer model was applied to calculate the Drought Severity Index (PDSI) from January 1997 to December 2012. Also, Landsat satellite images corresponding to summers from 1998 to 2013 were processed. During this period, 37% of the months were characterized by drought conditions of different intensity, 28% by wet and the remaining 36% under normal conditions. The most extended drought periods (2006 to 2007; 2011 to 2012) and the most intensity of drought occurred in June 1999 (-2.5 ISS) and November 2012 (ISS-2), coincided with the periods of Musters and Colhué Huapí lakes decreasing area (1998 to 2001 and 2007 to 2013). Furthermore, the most extended wet period (1997) and the most intense peaks of moisture occurred in June 1997 (ISS 3.4), March 2001 (ISS 3.4) and June 2005 (ISS 4.6), coinciding with the increasing lakes area (1998 and 2001 to 2007). The PDSI is a useful tool to analyze the occurrences of drought and wet events in the Argentinean Patagonia. It is of great importance to be able to analyze those events in semiarid regions, where hydrological resources are scarce. Also, the PDSI it is based on variables easy to measure (precipitation and temperature). This is useful in remote and extensive regions, such as the Argentinean Patagonia, where the monitoring of meteorological variables is expensive and logistically challenging.

**Keywords:** dry periods; wet periods; lakes; area variations; Argentinean Patagonia

## 1 Introducción

La Patagonia Argentina se localiza al sur del continente Sud Americano y al Oeste de la cordillera de los Andes. Es una región semiárida donde la variabilidad climática impacta de manera crítica sobre los recursos hídricos (Dore, 2005; Compagnucci & Araneo, 2007; Araneo & Compagnucci, 2008). Durante el último siglo, el incremento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones nivales, produjeron recesión de los glaciares de alta montaña (Masiokas *et al.*, 2008; Rabassa, 2010) y cambios en la hidroclimatología regional (Pasquini *et al.*, 2008). En ciertas regiones se ha encontrado una disminución de hasta el 30 % de los cauces permanentes en los últimos 30 años (Scordo *et al.*, 2014). Esto disminuyó la cantidad de los recursos hídricos de la zona y, por tanto, su disponibilidad para el aprovechamiento antrópico. Así mismo, la región Patagónica Argentina, se está poblando en forma significativa debido a nuevos emprendimientos petroleros, mineros e industriales. Estas actividades demandan un gran uso de recursos hídricos asociados a ríos y lagos.

Por otro lado, la escasez de lluvias en la Patagonia Argentina contrasta con la existencia de eventos meteorológicos extraordinarios, de reducida frecuencia, pero que producen descargas superficiales importantes y confieren potencialidad torrencial a las cuencas (Serra, 2004). Esto ha llevado a que los conglomerados urbanos que se ubicaron alrededor de los cursos de agua, impulsados por la escasez de agua, hoy muestren permanentes problemas de inundaciones. En los últimos años, asociado al fenómeno de El Niño, ha aumentado el número de eventos meteorológicos extremos que han producido daños en la infraestructura de la mayoría de las poblaciones patagónicas. Entre estos eventos se destacan las inundaciones urbanas y rurales ocurridas en los años 1992, 1993, 1998 y 2001 de importantes consecuencias económicas y sociales (Serra, 2004).

Identificar la probabilidad de ocurrencia, duración e intensidad de períodos secos y húmedos de una región es importante para planificar el uso y la contingencia del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica (UNEP, 2014). El análisis de largas series de datos en el tiempo y el espacio es fundamental para entender la dinámica de estos períodos.

El Índice de Severidad de Sequía (PDSI) (Palmer, 1965) es un indicador meteorológico que determina condiciones climáticas que han sido anormalmente secas o anormalmente húmedas. Este índice ha sido aplicado en diversas cuencas del mundo. Se utilizó para monitorear sequías hidrológicas en las descargas de los ríos y la humedad del suelo en cuencas con diferentes características geomorfológicas en la región de Tesalia (Grecia, (Vasiliades *et al.*, 2009). En otro estudio se integraron el PDSI, imágenes Landsat y fotografías aéreas para simular mensualmente el agua superficial de la cuenca de Cottonwood Lake (North Dakota, Estados Unidos) (Huang, 2011). En la Argentina el PDSI fue utilizado para determinar períodos de sequías y humedad en distintas localidades de las provincias de Córdoba y Buenos Aires (Ravelo & Pascale, 1997), en la región pampeana (Scian & Donnari, 1997) y en la cuenca del arroyo Claromecó (Carbone *et al.*, 2004). En estos casos se correlacionó el PDSI con la producción agrícola y la destrucción de la infraestructura vial (puentes y caminos).

Por otra parte, los lagos son considerados centinelas del cambio climático, ya que presentan una rápida respuesta y alta sensibilidad a la variabilidad climática (Williamson *et al.*, 2008, 2009; Adrian *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2010; Shimoda *et al.*, 2011). La cantidad y calidad de agua de los mismos depende de las condiciones climáticas, hidrológicas y la topografía de las cuencas donde están localizados. Las variaciones en el área de los lagos son un buen indicativo de la cantidad de agua que estos poseen y del balance de agua regional (Shi & Ren, 1990; Scheffer, 2004; Ye *et al.*, 2008; Lijuan & Mianping, 2015). En la Patagonia Argentina se encuentran algunos de los lagos más grandes y profundos de toda Sud América (Quirós & Drago, 1999).

Los lagos Musters y Colhué Huapí son el nivel de base de la cuenca del río Senguer y están localizados en el centro-sur de la Patagonia Argentina (Figura 1). El objetivo de este trabajo es analizar la variación del Índice de Severidad de Sequía en la cuenca del río Senguer para poder identificar los períodos secos y húmedos, caracterizar su intensidad y duración y relacionarlo con el efecto que tienen sobre la extensión areal de los lagos Musters y Colhué Huapí.

## 2 Área de Estudio

La cuenca del río Senguer, se localiza al SO de la provincia de Chubut y N de Santa Cruz entre los 43°36' y 46°27' de latitud Sur y los 66°10' y 72°05' de longitud Oeste. Se caracteriza por emplazarse en sentido O-E en la Patagonia Argentina (Figura 1). Es una cuenca endorreica de régimen hídrico nivopluvial (Bruniard, 1992). Presenta dos máximos de caudales, uno de menor intensidad durante junio y julio, aportado por las precipitaciones invernales y otro de mayor intensidad durante noviembre a diciembre aportado por el derretimiento de nieves.

El río Senguer nace en la cordillera de los Andes a 2000 msnm y desemboca en los lagos Musters (MU) y Colhué Huapí (CH), en el centro de la provincia del Chubut (Figura 1). A pesar de encontrarse sólo a 15 km uno del otro, estos lagos presentan diferencias entre sí. El MU tiene 35 m de profundidad máxima y su origen es tectónico.

Por el contrario, el CH es un lago somero (3 m de profundidad máxima) y si bien su origen es tectónico, posteriormente fue profundizado por acción eólica y fluvial (González Díaz & Di Tomasso, 2014).

Al E del lago CH nacía el río Chico el que, en dirección NE, transportaba el agua del lago hacia el río Chubut y finalmente al Océano Atlántico (Valladares, 2004). Actualmente el río Chico se encuentra seco y desconectado del lago, recibiendo aportes ocasionales de drenajes locales (Tejedo, 2003; Valladares, 2004).

Fluctuaciones en el caudal de los ríos Senguer y Chico y del área del lago CH ya eran detectadas desde finales del siglo XIX (Coronato, 2003). Estudios actuales (Tejedo, 2003; Coronato 2003; Llanos *et al.*, 2016) ha mostrado fluctuaciones en las áreas de los lagos MU y CH especialmente en el área de este último, por ser un lago somero. Sin embargo, no se ha encontrado una explicación clara

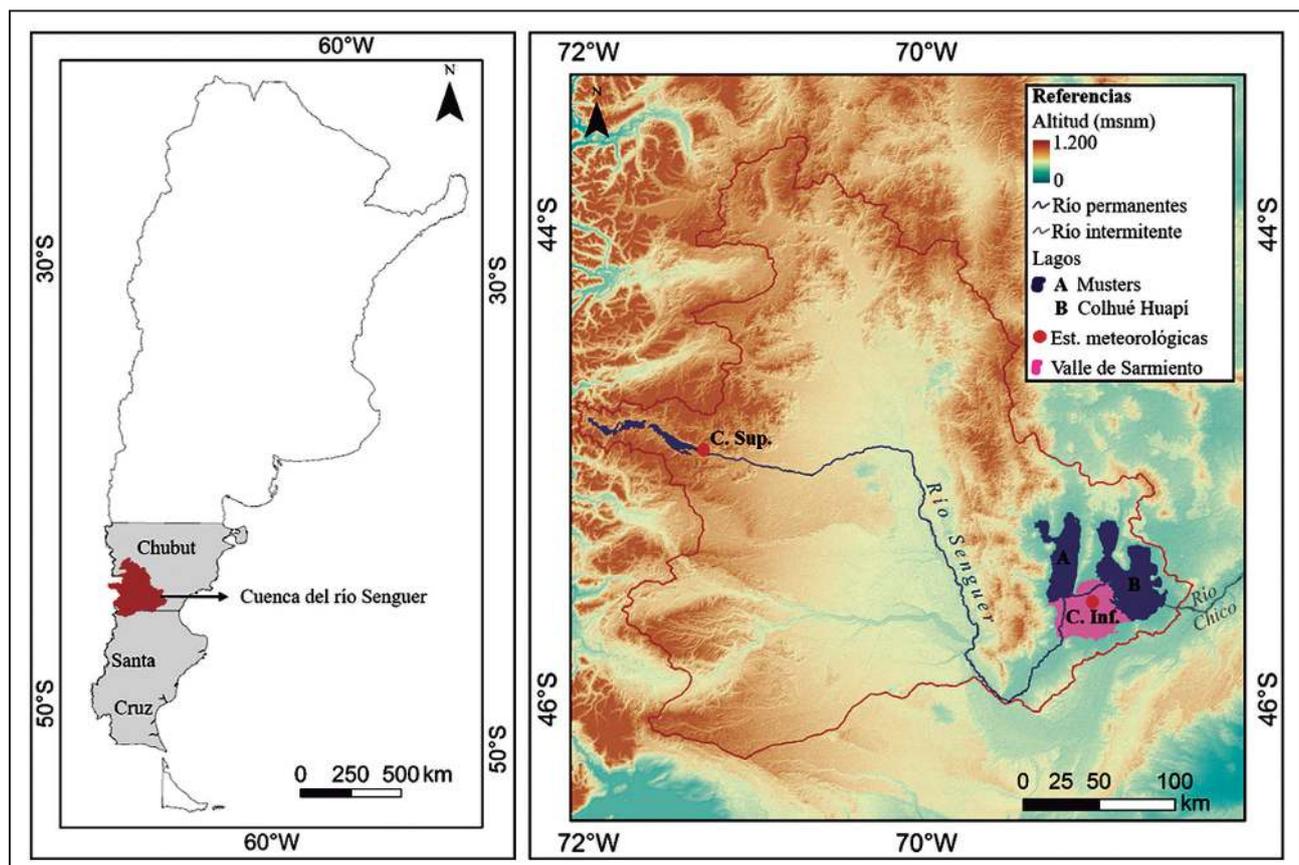


Figura 1 Localización del área de estudio. Lagos Musters (MU) y Colhué Huapí (CH) en la cuenca inferior del río Senguer (Patagonia Argentina). Estaciones meteorológicas Alto Río Senguer localizada en la cuenca superior (C. Sup.) y Aeroclub Sarmiento (C. Inf.) localizada en la cuenca inferior. Localization of the study area. Lakes Musters and Colhué Huapí located in the lower Senguer River basin (Argentinean Patagonia). Meteorological stations: Alto Río Senguer (C. Sup.) located in the upper basin and Aeroclub Sarmiento (C. Inf.) located in the lower basin.

acerca de las causas de los cambios en la extensión areal de los lagos.

Los efectos de las variaciones climáticas se han incrementado en los últimos 120 años a partir del asentamiento permanente del hombre en el área (Scordo *et al.*, 2017). La utilización del agua para cultivo, junto a la construcción de obras de infraestructura redujo el aporte de agua hacia el lago CH, concentrándola hacia el lago MU.

Al sur de los dos lagos se encuentra el valle productivo más austral de América (Valle de Sarmiento) (Figura 1) donde se cultivan forrajes (alfalfa), frutales y hortalizas (Valladares, 2004). En cercanías del lago CH se ha incrementado en los últimos 10 años el desarrollo de explotaciones petroleras y de plantaciones de frutales. Ambas actividades demandan un importante volumen de agua. Por otra parte el lago MU abastece a más de 250.000 habitantes del centro y sur de la provincia del Chubut y norte de Santa Cruz (Valladares, 2004). Esta condición le otorga importancia estratégica para las comunidades locales y regionales.

### 3 Metodología

Se analizaron los períodos secos y húmedos en la cuenca del río Senguer (1997-2012). Por otro lado se analizó la incidencia de esos períodos sobre la extensión del área de los lagos Musters y Colhué Huapí (1998-2013). Para ello se aplicó el modelo de Palmer para calcular el Índice de Severidad de Sequía (PDSI) (Palmer, 1965). El PDSI es un indicador meteorológico que determina condiciones climáticas que han sido anormalmente secas o anormalmente húmedas a partir del cálculo del balance hídrico (Palmer, 1965). Se utilizó la metodología desarrollada por Ravelo (1990) para calcular el PDSI en Argentina. Las categorías de condiciones de sequía y humedad de acuerdo a los valores de este índice se observan en la Tabla 1.

Para el cálculo de los balances hídricos se utilizaron registros pluviométricos mensuales correspondientes a las estaciones meteorológicas Aero Club Sarmiento (C. Inf.) localizada en la cuenca inferior y Alto Río Senguer (C. Sup.) localizada en la cuenca superior desde enero de 1997 a diciembre de 2012 (Figura 1). Estos datos fueron provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación

PDSI	Clases
> 4.0	Humedad extrema
3.0 a 3.9	Humedad severa
2.0 a 2.9	Humedad moderada
1.0 a 1.9	Ligeramente húmedo
0.5 a 0.9	Humedad incipiente
-0.4 a 0.4	Normal
-0.5 a -0.9	Sequía incipiente
-1.0 a -1.9	Sequía reducida
-2.0 a -2.9	Sequía moderada
-3.0 a -3.9	Sequía severa
< -4.0	Sequía extrema

Tabla 1 Categorías de condiciones de sequía y humedad del PDSI (Palmer, 1965; Ravelo, 1990). Drought and wet categories according to PDSI (Palmer, 1965; Ravelo, 1990).

Argentina (SSRH, 2016). La evapotranspiración fue estimada según Thornthwaite (1948), utilizando datos de precipitación y temperatura media mensual. Se calculó el PDSI en estas dos estaciones para captar posibles modificaciones hidrológicas que hallan afectados los aportes nivopluviales de la cuenca superior así como los aportes pluviales de las precipitaciones locales en la cuenca inferior.

La superficie de los lagos se calculó a través del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 OLI correspondientes a la estación estival de todos los años para el período 1998 – 2013. Se eligió el verano ya que las imágenes de estos meses reflejan el máximo caudal de entrada de agua en los lagos. Las imágenes fueron obtenidas del United States Geological Survey (USGS, 2014) y corresponden al path 229 - row 92. Se realizaron las correcciones radiométricas y atmosféricas correspondientes siguiendo las metodologías de Chander *et al.* (2009) y Chuvieco (2010). Luego se aplicó una clasificación supervisada (método de máxima verosimilitud) a partir de la definición de áreas de interés (ROI) sobre una combinación de bandas RGB 4-5-3 (Landsat 7 ETM+) y RGB 5-6-4 (Landsat 8 OLI). Esta combinación de bandas permite diferenciar agua de tierra (Horning, 2004). El procesamiento de las imágenes se realizó en los programas ENVI 4.7 y ArcGis 10. Finalmente, se compararon las variaciones de las áreas de los lagos con la intensidad y cantidad de meses con condiciones húmedas y secas según el PDSI.

## 4 Resultados

### 4.1 Evolución Espacial y Temporal del PDSI

Analizando los resultados de las dos estaciones en conjunto se observa que, durante el período 1997-2012, el 37% de los meses analizados presentó un PDSI correspondiente a sequía con diferente grado de intensidad. El 35% de los meses presentó condiciones de normalidad, mientras que el 28% tuvieron condiciones húmedas (Figura 2).

Por otro lado, la intensidad de los eventos de humedad fue más extrema que la de los eventos de sequía. Las sequías “incipientes” y “reducidas” fueron las de mayor frecuencia (36%). El 1% correspondió a sequías “moderadas” y no se registraron períodos de sequías “severas” ni “extremas”. Las condiciones de humedad “incipiente” y ligeramente “húmedo” fueron las de mayor frecuencia (23%). Los períodos de humedad “moderada” representaron el 4%, los de humedad “severa” el 0.5% y los de humedad “extrema”, el 0.5%.

La marcha del PDSI presentó algunas diferencias entre el sector superior (C. Sup.) e inferior (C. Inf.) de la cuenca. Los períodos secos fueron más recurrente en la C. Inf. (41%) que en la C. Sup. (33%) (Figura 2). Los períodos húmedos fueron más recurrente en la C. Sup. (33%) que en la C. Inf. (23%) (Figura 2). Los períodos normales se presentaron en igual porcentaje en ambos sectores de la cuenca (34%) (Figura 2). Cabe destacar que en la C. Sup.

el porcentaje de meses secos, húmedos y normales se distribuyó en iguales porcentajes, mientras que en la C. Inf. las sequías se produjeron 18 por ciento más que los períodos de humedad y un 9 % más que los normales. Dentro de la subcategorización del PDSI se puede observar que las sequías de mayor intensidad fueron las “moderadas”, las cuales solo se produjeron en la C. Inf., mientras que se encontraron eventos de humedad “severa” (en ambos sectores de la cuenca) y “extrema” solo en la C. Sup. (Figura 2).

#### 4.1.1 Evolución Temporal del PDSI en la Estación Cuenca Superior

En la estación C. Sup. el PDSI permitió definir al año 1997 como húmedo. El porcentaje de meses húmedos fue de 90% y no presentó meses secos. El año 1998 y 1999 se definen como años secos porque presentaron 80 y 40 %, respectivamente de meses de sequías y ningún evento de humedad. Se destaca el año 1998 porque presentó uno de los valores de sequía más elevados de la serie (PDSI = -1.9). El año 2000 presentó igual porcentaje de meses normales, húmedos y secos (33%).

Entre los años 2001 y 2006 las condiciones húmedas predominaron sobre las de sequía, a excepción del año 2005 donde el porcentaje de meses húmedos, normales y secos fue el mismo (33%) (Figura 3). Sin embargo, cabe destacar que durante el 2005 se produjo el único evento de

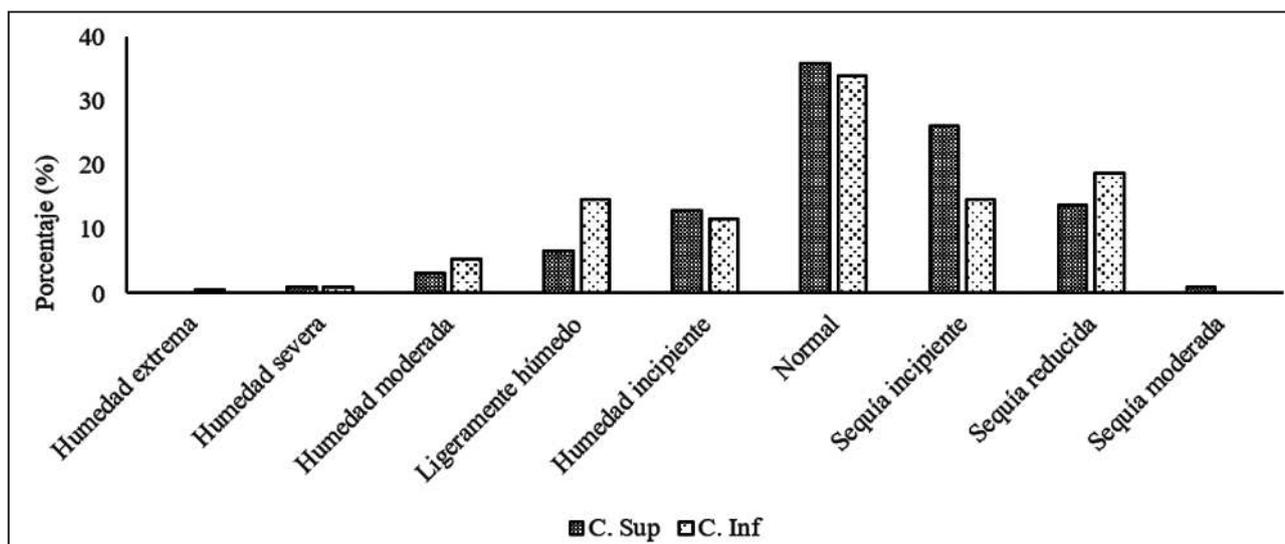


Figura 2 Frecuencias de PDSI en la cuenca superior (C. Sup.) e inferior (C. Inf.) del río Senguer (1997-2012). PDSI frequency in the upper (C. Sup.) and lower (C. Inf.) Senguer River basin (1997-2012).

humedad “extrema” de toda la serie (PDSI = 4.6). Por otro lado, el 2001, presentó eventos húmedos intensos (PDSI = 3.3) y durante el 2006 el 50% de los meses fueron húmedos y no ocurrieron sequías. Alta intensidad de eventos húmedos también se pudo observar durante los años 2003 y 2004 (PDSI = 2.7).

Entre el 2007 y el 2012 se intercalaron períodos húmedos y secos (Figura 3). Sin embargo, durante este tiempo, predominaron las condiciones de sequía (40%) por sobre las de humedad (26%). En este sentido se destacaron los años 2007 y 2011 que presentaron un 50 y 80 % de condiciones de sequía, respectivamente. Además de diversos eventos de sequía “moderada” (PDSI = -1.6). Por otro lado, el 2010 es el único año de este período que presentó mayor porcentaje de eventos húmedos (50%) que secos (30%) (Figura 3).

#### 4.1.2 Evolución temporal del PDSI en la estación Cuenca Inferior

En la estación C. Inf. el PDSI permitió definir al año 1997 como húmedo. El porcentaje de meses húmedos es de 80% y se produjeron los únicos eventos de humedad “severa” (PDSI 3.4 y 3.1) de

esta serie (Figura 4). Durante los años 1998 y 1999 predominaron las condiciones de sequía 40 y 50 %, respectivamente, sobre las de humedad. Además, durante el año 1999, se produjeron los eventos de sequía más intensos de toda esta serie (sequía moderada, PDSI -2.4 y -2) (Figura 4). El año 2000 presentó un porcentaje de meses húmedos levemente más elevado que el de meses secos y alto porcentaje de condiciones normales (50%). Durante el año 2001 se produjo un elevado porcentaje de meses secos (70%) con predominio de sequías “reducidas” (Figura 4).

Los años 2002 y 2003 fueron húmedos, las condiciones de humedad representaron un 40% y no se produjeron eventos de sequía. Los eventos fueron de humedad “incipiente” y “ligera”. Durante el 2004 el porcentaje de sequías (60%) predominó sobre las condiciones de humedad. Los eventos fueron de sequía “incipiente” y “reducida”.

Entre el 2007 y el 2012 predominaron las condiciones de sequía (mayor al 50 % en todos los años) y se produjo un elevado porcentaje (33%) de eventos de sequía “reducida” (2009, 2010, 2011 y 2012) (Figura 4). El año 2007 se destacó por presentar un 70% de meses en condiciones de sequía (Figura 4). La excepción dentro de este período de tiempo

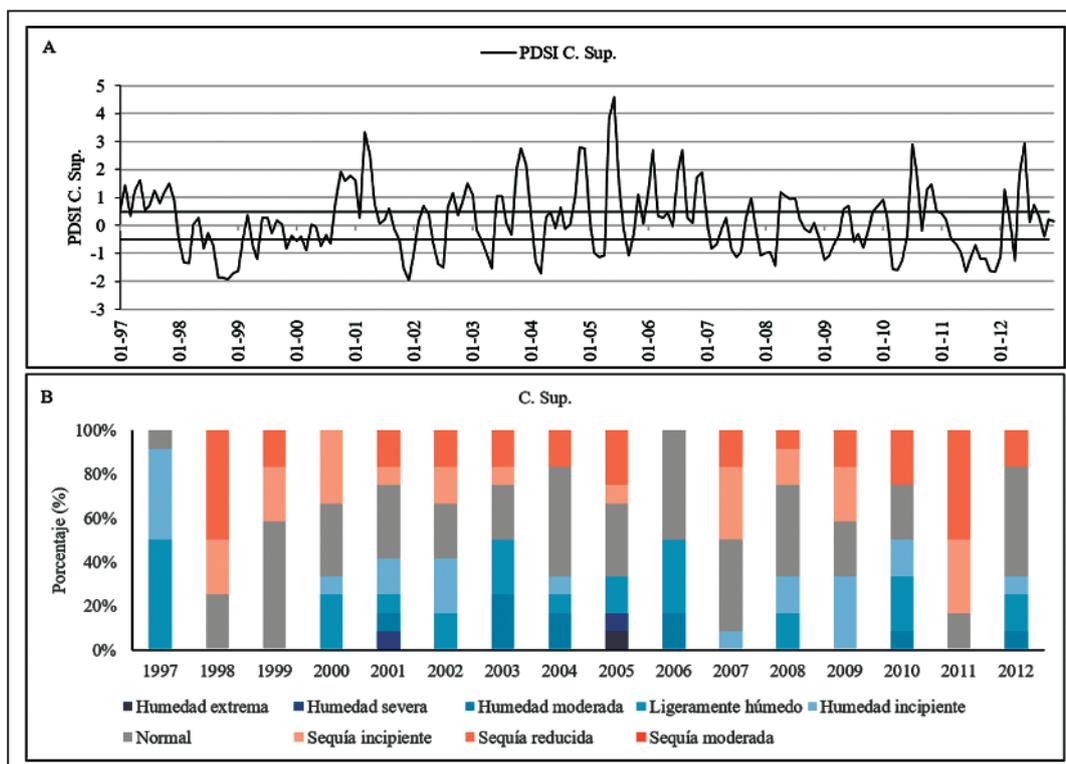


Figura 3 a. Serie de tiempo del PSDI en la cuenca superior del río Senguer (1997-2012). b. Porcentaje de las categorías del PDSI en cada año (1997-2012) en la cuenca superior del río Senguer. a. Time series of the PDSI in the upper Senguer River basin (1997-2012). b. Percentage of PDSI categories by year (1997-2012) in the upper Senguer River basin.

fue el año 2008 que presentó mayor porcentaje de condiciones húmedas (40%) y eventos de humedad “moderada” (PDSI = 2.3) (Figura 4).

#### 4.2 Evolución de las Áreas de los Lagos Musters y Colhué Huapi

El área de los lagos MU y CH presentó variaciones interanuales durante el período de estudio, las cuales fueron más evidentes en el CH, dado su carácter somero. El valor medio del área del CH, durante el período de estudio, fue de 566 km<sup>2</sup>, con una desviación standard de 197 km<sup>2</sup>. Su mínima extensión la alcanzó en el 2001 y fue de 105 km<sup>2</sup>, su máxima extensión la alcanzó en el 2007 y fue de 797 km<sup>2</sup> (Figura 5 a y b). El valor medio del área del MU fue 438 km<sup>2</sup>, con una desviación standard de 11 km<sup>2</sup>. Su mínima extensión la alcanzó en el 2000 y fue de 407 km<sup>2</sup>, su máxima extensión la alcanzó en el 2003 y fue de 554 km<sup>2</sup> (Figura 5 a y b).

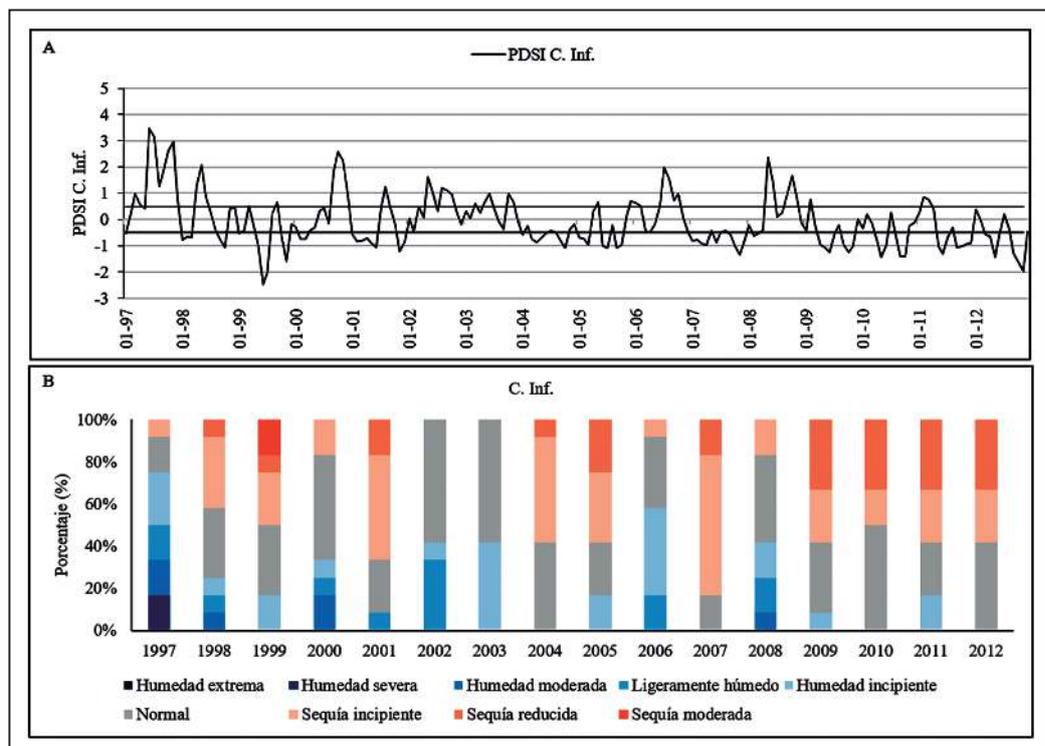
Se observan tres períodos distintos en el comportamiento del área del lago CH. El primero de decrecimiento (D1) que transcurre entre 1998 y 2001. En 1998 el lago ocupaba un área correspondiente al 115% (651 km<sup>2</sup>) de su extensión media, y decreció un 97% hasta ocupar en 2001 un 18% (105 km<sup>2</sup>) de su extensión media (Tabla 2; Figura 5 a y b). Luego

ocurrió un período de crecimiento del área (C1) desde 2001 a 2007. Durante estos años el área del lago aumentó un 123% hasta alcanzar su máxima extensión 141% (797 km<sup>2</sup>) de su extensión media (Tabla 2; Figura 5 a y b). Desde 2007 al 2013 el lago decreció (D2) un 81% hasta alcanzar el 60% (338 km<sup>2</sup>) de su extensión promedio (Tabla 2; Figura 5 a-b). Para estos tres períodos el área del lago MU presentó la misma tendencia que la del CH (decreció durante 1998-2001, creció durante 2001-2007 y volvió a decrecer durante 2007-2013), pero en todos los casos su porcentaje de variación fue menor al 5%.

Período		Área MU (%)	Área CH (%)
D1	Inicio (1998)	101	115
	Final (2001)	98	18
	Variación	-3	-97
C1	Inicio (2001)	98	18
	Final (2007)	101	141
	Variación	+3	+123
D2	Inicio (2007)	101	141
	Final (2013)	97	60
	Variación	-4	-81

Tabla 2 Área (%) cubierta por los lagos respecto de su valor medio, y su variación en los períodos de crecimiento (C1) y decrecimiento (D1 y D2). Area (%) covered by the lakes respect from its mean value, and its variation during period of lakes area increase (C1) and decrease (D1 and D2).

Figura 4 a. Serie de tiempo del PSDI en la cuenca inferior del río Senguer (1997-2012). b. Porcentaje de las categorías del PSDI en cada año (1997-2012) en la cuenca inferior del río Senguer. a. Time series of the PSDI in the lower Senguer River basin (1997-2012). b. Percentage of PSDI categories by year (1997-2012) in the lower Senguer River basin



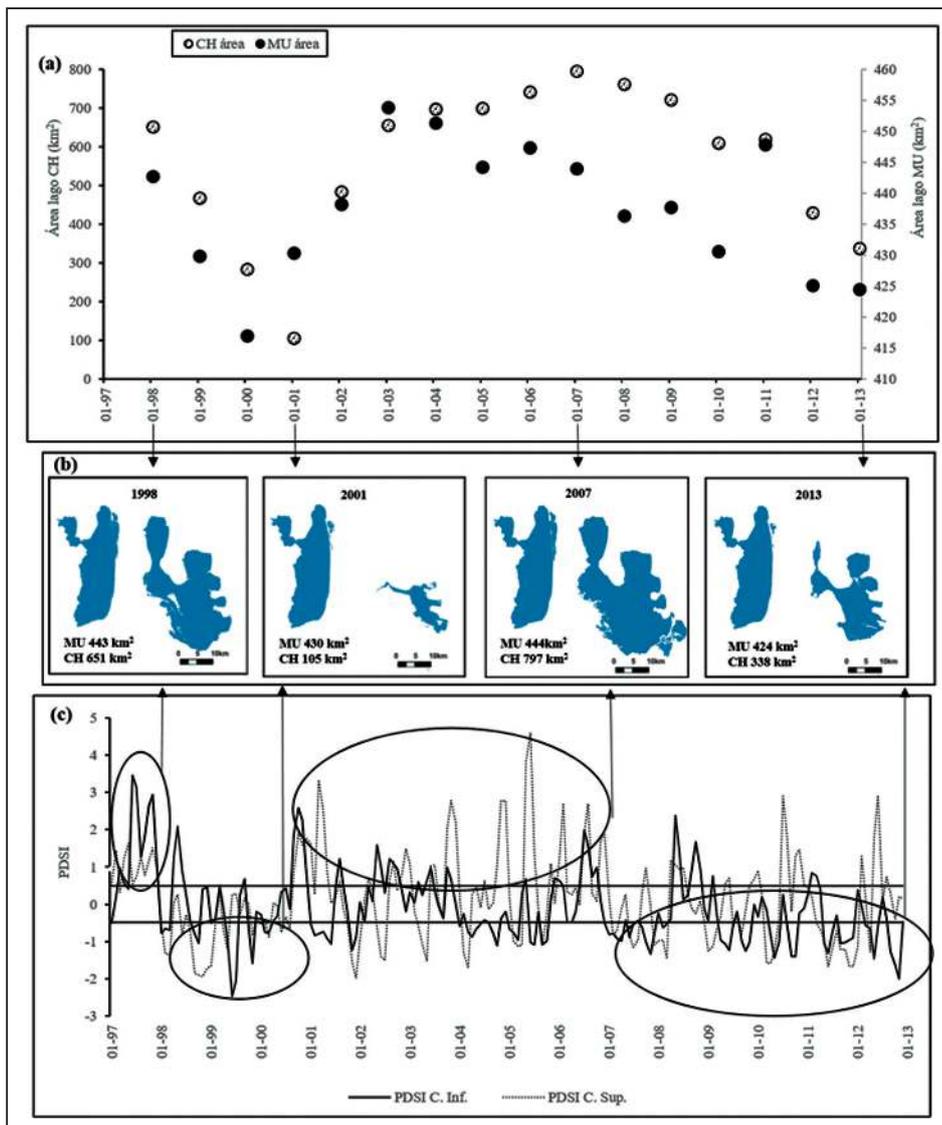


Figura 5 Efecto de los eventos de sequía y humedad sobre el área de los lagos Musters y Colhué Huapí: a. Evolución temporal del área de los lagos Musters y Colhué Huapí. Los valores corresponden a los veranos de cada año entre 1998-2013. b. Área de los lagos Musters y Colhué Huapí al inicio y final de los períodos de crecimiento (C1) y de decrecimiento (D1 y D2). c. Evolución temporal del PDSI en los dos sectores de la cuenca (C. Inf. y C. Sup.). Se destaca que durante los períodos de decrecimiento del área de los lagos hubo una mayor ocurrencia de eventos de sequía ( $PDSI < 0.5$ ) y durante los períodos de crecimiento del área predominaron los eventos húmedos ( $PDSI > 0.5$ ). Impacts of drought and wet events on Musters and Colhué Huapí lakes areas: a. Temporal evolution of Musters and Colhué Huapí lakes area. Values correspond to summers during 1998-2013. b. Musters and Colhué Huapí lakes area at the start and end of increasing (C1) and decreasing periods (D1 and D2). Temporal evolution of the PDSI in both basin sectors (C. Sup. and C. Inf.). During periods of decreasing lakes area, drought events ( $PDSI < 0.5$ ) prevail, during periods of increasing lakes area, wet events ( $PDSI > 0.5$ ) prevail.

### 4.3 Efecto de los Eventos de Sequía y Humedad en el Área de los Lagos

El porcentaje de meses húmedos, normales y secos (calculado a partir de los resultados del PDSI de la C. Sup. y los de la C. Inf.) obtenidos con el PDSI para cada período de crecimiento y decrecimiento del área de los lagos puede ser observado en la figura 6. En los períodos de decrecimiento del área el porcentaje de meses secos fue mayor a los húmedos, mientras que en el período de crecimiento del área el porcentaje de meses húmedos fue mayor a los secos. En cuanto al análisis de intensidad del PDSI, si bien los máximos de humedad siempre superaron a los de sequías en los tres períodos, los máximos de sequía en D1 ( $PDSI = -2.5$ ) y D2 ( $PDSI = -1.9$ ) son

mayores a los de C1 ( $PDSI = -1.9$ ) y los máximos de humedad en D1 ( $PDSI = 2.6$ ) y D2 ( $PDSI = 2.9$ ) fueron menores a los de C1 ( $PDSI = 4.6$ ).

Se destaca un intervalo largo de humedad. Se produjo entre marzo de 1997 y diciembre de 1997 tanto en la C. Sup. como en la C. Inf., 10 meses con un PDSI máximo de 3.5. Este período precedió al verano de 1998 donde el área del CH ocupaba un 115 % de su extensión promedio. Por otro lado el período 2001-2006 prevalecieron las condiciones húmedas en la C. Sup. y durante el 2002, 2003 y 2006 las condiciones húmedas prevalecieron sobre las secas en la C. Inf. Durante este período el área del lago CH creció un 123 %. Los picos de intensidad de humedad ocurrieron en junio 1997 (C. Inf.,  $PDSI =$

3.4), marzo 2001 (C. Sup., PDSI = 3.4), junio 2005 (C. Sup., PDSI = 4.6) y julio 2010 (C. Sup., PDSI = 2.9). A excepción del pico de 2010 todos los otros coincidieron con los períodos de crecimiento del área del lago.

Por otro lado, los períodos de sequías más extensas correspondieron a diciembre 2006 - diciembre 2007 y marzo 2011-enero 2012. La primera de estas sequías tuvo una duración de 13 meses y un valor extremo de PDSI  $-1.3$ . Ocurrió en la estación C. Inf. (en el mismo período en la estación C. Sup. predominaron meses de sequías). La segunda tuvo una duración de 11 meses y una intensidad máxima de  $-1.7$ . Ocurrió en la estación C. Sup. (en el mismo período en la estación C. Inf. predominaron meses de sequías). Ambos períodos transcurrieron durante D2, donde el área del lago CH decreció un 81%. Así mismo, los años 1998 y 1999 fueron secos en ambos sectores de la cuenca. Cuatro de los cinco valores máximos de intensidad de sequía en la C. Sup. y tres de los cinco valores máximos de intensidad de sequía en la C. Inf. ocurrieron durante 1998 y 1999, período en el cual el área del lago disminuyó en un 123% (D1). Los picos de intensidad de sequía ocurrieron en noviembre de 1998 (C. Sup. 1998), junio 1999 (C. Inf., PDSI =  $-2.5$ ), diciembre 2001 (C. Sup. PDSI =  $-1.9$ ) y noviembre 2012 (C. Inf., PDSI =  $-1.9$ ). A excepción del pico de 2001 todos los otros coincidieron con períodos de decrecimiento del área de los lagos.

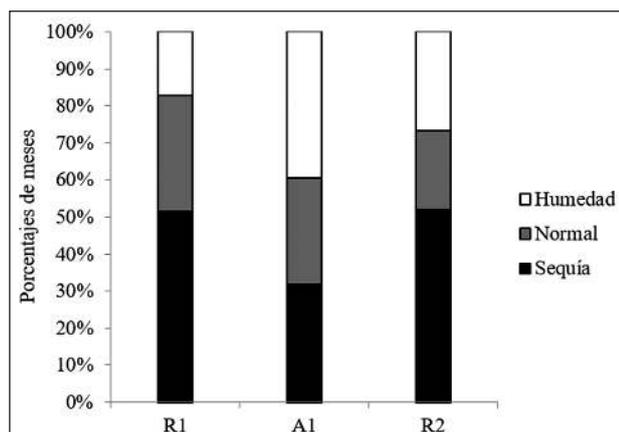


Figura 6 Porcentaje de meses húmedos, secos y normales en los períodos de crecimiento y decrecimiento del área de los lagos. Percentage of wet, drought and normal months, during periods of increasing and decreasing lakes area.

## 5 Discusión

El análisis del PDSI permitió identificar que durante el período 1997 - 2012, el 37% de los

meses presentó valores correspondiente a sequía con diferente grado de intensidad. El 35% de los meses presentó condiciones de normalidad, mientras que el 28% tuvieron condiciones húmedas de distinta intensidad. La duración de los períodos de sequías (11-13 meses) fue mayor a la experimentada por los períodos de humedad (9-10 meses). El mayor porcentaje de meses de sequías respecto de meses de humedad coincidió con otros trabajos realizados en la región patagónica donde se observó que las precipitaciones han disminuido y las temperaturas han aumentado provocando cambios en la hidroclimatología regional (Masiokas *et al.*, 2008; Pasquini *et al.*, 2008; Scordo *et al.*, 2014, 2017).

Por otro lado, los máximos de sequía fueron de menor intensidad (PDSI =  $-2.7$ ) que los de humedad (PDSI = 5.6). Esto se relaciona con la ocurrencia de eventos excepcionales de exceso hídrico que generan inundaciones en una región que se caracteriza por la escasez de lluvia. Este tipo de eventos afectan a poblaciones localizadas cerca de cuerpos de agua (ríos y lagos) y han sido descritos en diversos trabajos realizados en la Patagonia Argentina (Serra, 2004; Isla *et al.*, 2013)

La estación C. Inf., ubicada en la cuenca inferior, presentó mayor cantidad e intensidad de meses secos y menor ocurrencia e intensidad de meses húmedos que la estación C. Sup. ubicada en la cuenca superior. Esto refleja el menor aporte local de agua en la cuenca inferior (localizada a más de 200 km de la cordillera de los Andes) en comparación con el aporte nivo-pluvial de la cuenca superior (localizada en la cordillera de los Andes) (Bruniard, 1992).

Por otra parte, se observó que entre 1998 y 2013, la superficie de los lagos MU y Colhué Huapí presentó modificaciones en su extensión areal. Decreció durante 1998-2001, creció durante 2001-2007 y decreció nuevamente durante 2007-2013. En los períodos de decrecimiento de las áreas se observó que el porcentaje de meses que presentaron sequías es mayor que el de los meses húmedos. Mientras que en el período de aumento del área de los lagos, el porcentaje de meses húmedos fue mayor a los de sequía. Además se observó cómo los períodos de sequías más largos (2006-2007) y (2011-2012), así como los picos de intensidad de sequía ocurridos en junio 1999 (PDSI =  $-2.5$ ) y noviembre del 2012

(PDSI = -1.9), se produjeron en los períodos de retroceso del área de los lagos. Por otro lado, el período húmedo más extenso (1997) y los máximos de mayor intensidad de humedad ocurridos en junio 1997 (PDSI = 3.4), marzo 2001 (PDSI = 3.4) y junio 2005 (PDSI = 4.6), se produjeron durante el período de aumento del área de los lagos.

Las variaciones en el área de los lagos Musters y Colhué Huapí, así como la máxima y mínima extensión alcanzada por los mismos, coincidió con los resultados hallados en otros estudios (Coronato, 2003; Tejedo, 2003; Llanos *et al.*, 2016). Estos diferentes autores, hallaron relación entre la precipitación y la temperatura (variables que se incorporan en el cálculo del PDSI) con las variaciones en el área de los lagos. Por otro lado, Tejedo (2003) concluyó que la desaparición del 80% del lago Colhué Huapí en el año 2001 se debió a la presencia de un período de déficit hídrico, lo cual coincide con la prevalencia de condiciones de sequías y los máximos de intensidad de sequías encontrados en este estudio para ese período. Este tipo de relación entre la prevalencia de períodos de sequía y humedad y el decrecimiento y crecimiento, respectivamente, de las áreas de los lagos han sido encontrados en otras regiones del mundo como en lagos del plateau Tibetano (Ye *et al.*, 2008; Lijuan & Mianping, 2015) y lagos en la Península de Tuktoyaktuk en el Ártico canadiense (Plug *et al.*, 2008).

## 6 Conclusiones

El PDSI es un indicador de interés para analizar la ocurrencia de eventos de sequías y humedad en la cuenca del río Senguer (Patagonia Argentina). Esto es importante ya que el PDSI ha sido aplicado en el estudio de eventos de sequía y humedad en diversas regiones del mundo pero nunca en la Patagonia previo a este trabajo. A su vez, el PDSI se basa en variables sencillas de medir (precipitación y temperatura). Esto es útil en regiones remotas y extensas, como la Patagonia Argentina, donde el monitoreo de variables meteorológicas es en términos de logística y equipamiento costoso y difícil.

Se observó que la intensidad y frecuencia de los períodos de sequía y humedad tanto en la cuenca superior como en la cuenca inferior del río Senguer estaban relacionados con las variaciones en el área

de los lagos Musters y Colhué Huapí, especialmente en este último por ser un lago somero.

Conocer la dinámica de estos eventos es importante ya que en épocas de sequías y decrecimiento de los lagos, la economía de la región se ve afectada. Esto se debe principalmente a la escasez de agua para riego en el Valle de Sarmiento y a la disminución de la actividad pesquera en los lagos (Tejedo, 2003). Por otro lado, especialmente en la zona del Colhué Huapí, decrece la flora y disminuye la biodiversidad asociada al lago. La erosión eólica aumenta y genera voladuras de suelos y nubes de sedimento que afectan la calidad de vida de la población. En caso de extrema sequía podría verse afectado el suministro de agua a los 250.000 habitantes del centro de la Patagonia Argentina.

## 7 Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3038 que es financiado por la US National Science Foundation (Grant GEO-1128040). PIP del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y PGI de la Universidad Nacional del Sur.

## 8 Referencias

- Adrian, R.; O'Reilly, C.M.; Zagarese, H.; Baines, S.B.; Hessen, D.O.; Keller, W.; Livingstone, D.M.; Sommaruga, R.; Straile, D.; Donk, E.V.; Weyhenmeyer, G.A. & Winderl, M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6, part 2): 2283-2297.
- Araneo, D.C. & Compagnucci, R.H. 2008. Atmospheric circulation features associated to Argentinean Andean rivers discharge variability. *Geophysical Research Letters*, 35 (1): L01805.
- Bruniard, E.D. 1992. *Hidrografía: Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. Buenos Aires, Editorial Ceyne, 124p.
- Carbone, M.E.; Scian, B.V. & Piccolo, M.C. 2004. Análisis de los períodos secos y húmedos en la cuenca del Arroyo Claromecó, Argentina. *Papeles de Geografía*, 40: 25-35.
- Chander, G.; Markham, B.L. & Helder, D.L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 11(3): 893-903.
- Chuvieco, E. 2010. *Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona, Editorial Planeta S.A., 585p.
- Compagnucci, R.H. & Araneo, D.C. 2007. Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(3): 23-35.
- Coronato, F. 2003. El problema de la desecación del lago Colhué Huapí desde la Geografía Histórica. *Contribuciones científicas GAEA*, 15: 165-170.
- Dore, M.H.I. 2005. Climate change and changes in global precipitation

- patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8): 1167-1181.
- González Díaz, E.F. & Di Tommaso, I. 2014. Paleogeofomas lacustres en los lagos Musters y Colhué Huapí, su relación genética con un paleolago Sarmiento previo, centro sur del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (3): 416-426.
- Horning, N. 2004. Selecting the appropriate band combination for an RGB image using Landsat imagery Version 1.0. In: TECHNICAL REPORT OF THE AMERICAN MUSEUM OF NATURAL HISTORY. New York, Center for Biodiversity and Conservation, p. 1-14.
- Huang, S.; Dahal, D.; Young, C.; Chander, G. & Liu, S. 2011. Integration of Palmer Drought Severity Index and remote sensing data to simulate wetland water surface from 1910 to 2009 in Cottonwood Lake area, North Dakota. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3377-3389.
- Isla, F.I. & Toldo, E.E. 2013. ENSO impacts on Atlantic watersheds of South America. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 4(1-2): 34-41.
- Llanos, E.; Behr, S.; Gonzalez, J.; Colombani, E.; Buono, G. & Escobar, J.M. 2016. Informe de las Variaciones del Lago Colhué Huapí mediante sensores remotos y su relación con las precipitaciones (Informe técnico.) *Instituto nacional de tecnología agropecuaria, sede Trelew*, 1: 1-8.
- Lijuan, Y. & Mianping, Z. 2015. The response of lake variations to climate change in the past forty years: A case study of the northeastern Tibetan Plateau and adjacent areas, China. *Quaternary International*, 371: 31-48.
- Masiokas, M.; Villalba, R.; Luckman, B.; Lascano, M.; Delgado, S. & Stepanek, P. 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global Planetary Change*, 60(1-2): 85-100.
- Palmer, W.C. 1965. *Meteorological drought*. Washington D.C., U.S. Weather Bureau, 58 p.
- Park, J.H.; Duan, L.; Kim, B.; Mitchel, M.J. & Shibata, H. 2010. Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. *Environment International*, 36(2): 212-225.
- Pasquini, A.I.; Lecomte, K.L. & Depetris, P.J. 2008. Climate change and recent water level variability in Patagonian proglacial lakes, Argentina. *Global Planet Change*, 63(4): 290-298.
- Plug, L.J.; Walls, C. & Scott, B.M. 2008. Tundra lake changes from 1978 to 2001 on the Tuktoyaktuk Peninsula, western Canadian Arctic. *Geophysical Research Letters*, 35: L03502.
- Quirós, R. & Drago, E. 1999. The environmental state of Argentinean lakes: An overview. *Lakes and Reservoirs Research and Management*, 4(1-2): 55-64.
- Rabassa, J. 2010. El cambio climático global en la Patagonia desde el viaje de Charles Darwin hasta nuestros días. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67(1): 139-156.
- Ravelo, A.C. 1990. Manual Teórico Operativo del Índice de Sequía de Palmer. *Revista Geofísica*, 39: 85-99.
- Ravelo, A.C. & Pascale, A.J. 1997. Identificación de ocurrencia de sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre. *Revista de la Facultad de Agronomía de la UBA*, 17(1): 101-105.
- Scheffer, M. 2004. *The Ecology of Shallow Lakes*. Norwell, Kluwer Academic, 357 p.
- Scian, B. & Donnari, M. 1997. Aplicación del índice Z de Palmer para la comparación de sequías en las regiones trigueras II, IV y V Sur de Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía de la UBA*, 17(1): 41-46.
- Scordo F.; Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. 2014. Modificación del curso de los ríos en la cuenca del Senguer: período 1994-2013. In: UBOLDI, J.A., ANGELES, G.R., GENTILI, J.O., GERALDI, A.M., MELO, W.D., CARBONE, M.E. (Eds.), *Geotecnologías del sur argentino. Casos de estudio*. Bahía Blanca, EdiUNS, p. 487-494.
- Scordo, F.; Zilio, M.; Seitz, C.; Melo, W.D.; Piccolo, M.C. & Perillo, G.M.E. 2017. Evolución de los recursos hídricos en el “Bajo de Sarmiento” (Patagonia extra andina). Análisis integrado de los procesos naturales y del impacto antrópico. *Anuario do Instituto de Geociências*, 40(2): 106-117.
- Serra, J.J. 2004. Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica. *Global Water Partnership*, 6: 155-196.
- Shi, Y.F. & Ren, J.W. 1990. Glacier Recession and Lake Shrinkage Indicating a Climatic Warming and Drying Trend in Central Asia. *Annals of Glaciology*, 14: 261-265.
- Shimoda, Y.; Azim, M.E.; Perhar, G.; Ramin, M.; Kenney, M.A.; Sadraddini, S.; Gudimov, A. & Arhonditsis, G.B. 2011. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? *Journal of Great Lakes Research*, 37(1): 173-193.
- SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina). 2016. Base de datos hidrológica integrada. Datos meteorológicos de la Estación Alto Río Senguer y Aeroclub Sarmiento. [http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso\\_bd.php](http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php). Acceso en 20 nov 2016.
- Tejedo, A.G. 2003. Degradación de suelos en los alrededores del lago Colhué Huapí, Escalante, provincia de Chubut. In: CONGRESO DE LA CIENCIA CARTOGRAFICA Y VII SEMANA NACIONAL DE LA CARTOGRAFIA, 1, 2003, Buenos Aires, Argentina, p. 10.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2014. *Towards Integrated Water Resources Management. International experience in development of river basin organisations*. Khartoum, Sudan. 32p.
- USGS (United States Geological Survey). 2014. Imágenes Landsat, Path 229 - Row 92. <http://glovis.usgs.gov>. Acceso en 16 nov 2014.
- Valladares, A. 2004. Cuenca de los ríos Senguer y Chico (cuenca N° 66) (Informe Técnico). *Subsecretaría De Recursos Hídricos De La Nación Argentina*, 1: 1-6.
- Vasiliades, L. & Loukas, A. 2009. Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece. *Desalination*, 237: 3-21.
- Williamson, C.E.; Dodds, W.; Kratz, T.K. & Palmer, M.A. 2008. Lakes and streams as sentinels of environmental change in terrestrial and atmospheric processes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(5): 247-254.
- Williamson, C. E.; Saros, J.E.; Vincent, W.F. & Smol, J.P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6): 2273-2282.
- Ye, Q.; Yao, T.; Chen, F.; Shichang, K.; Xueqin, Z. & Yi, W. 2008. Response of Glacier and Lake Covariations to Climate Change in Mapam Yumco Basin on Tibetan Plateau during 1974-2003. *Journal of China University of Geosciences*, 19(2): 135-145.