

APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTANDARIZADA (SPEI) PARA IDENTIFICAR PERÍODOS HÚMEDOS Y SECOS EN LA PATAGONIA ANDINA Y EXTRA ANDINA ARGENTINA

APPLICATION OF THE STANDARDIZED PRECIPITATION EVAPOTRANSPIRATION INDEX (SPEI) TO IDENTIFY WET AND DROUGHT PERIODS IN THE ANDEAN AND EXTRA ANDEAN ARGENTINEAN PATAGONIA

Facundo SCORDO^{1,2}, María Cintia PICCOLO^{1,2}, Gerardo Miguel Eduardo PERILLO^{1,3}

¹CONICET - Instituto Argentino de Oceanografía, Buenos Aires, Argentina, Email: scordo@agro.uba.ar; mcpiccol@gmail.com

²Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina

³Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina. Email: gmeperillo@criba.edu.ar

Introducción
Materiales y Métodos
Resultados
Evolución espacial y temporal del SPEI
Evolución temporal del SPEI a escala 3 Meses en la estación C.Sup
Discusión
Evolución temporal del SPEI a escala 3 Meses en la estación C.Inf
Evolución temporal de la variación mensual de la profundidad del lago Musters
Relación entre el SPEI y la profundidad del lago
Análisis de la transformada rápida de Fourier
Análisis de la transformada continúa wavelet
Conclusión
Agradecimientos
Referencias

RESUMIO - El objetivo de la presente investigación es identificar y caracterizar los períodos de sequía y humedad en la región andina y extra andina de la cuenca del río Senguer en la Patagonia Argentina y relacionarlos con las fluctuaciones en la profundidad del lago Musters. Al estar localizado en la cuenca baja el lago reflejan los cambios hidrológicos producidos tanto en el sector andino como en el extra andino. Para el estudio de los períodos de sequía y humedad se utilizó el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI). Se analizaron las series de tiempo mensuales (período 1998-2015; 216 meses) del SPEI 3M en una estación ubicada en la cordillera (C.Sup.), otra en el sector extra andino (C.Inf.) y la profundidad del lago Musters. Se calculó la correlación y desfase entre el SPEI 3M de cada estación y la variación en la profundidad del lago. En ambas estaciones el porcentaje de meses secos (C.Inf = 38%; C.Sup = 36%) superó al de los meses húmedos (C.Inf = 29%; C.Sup = 15%). En el mismo período la profundidad del lago tuvo una tendencia decreciente (-0,7m). La correlación entre la serie de tiempo del SPEI 3M de ambas estaciones y la variación en la profundidad del lago es elevada (coherencia cuadrada $\geq 0,83$) a escala anual. Un período de humedad o sequía en la región andina tarda tres meses, y en la extra andina medio mes, en verse reflejados en la profundidad del lago.

Palabras-chave: Períodos húmedos y secos; SPEI; Profundidad del lago; Patagonia Argentina; Región andina y extra andina.

ABSTRACT - The objective of this study was to identify and characterize wet and drought periods in the andean and extra andean regions of the Senguer river basin located in the Argentinean Patagonia. The effects of those events over the fluctuations in the depth of the Musters lake was also studied. The lake is localized in the lower basin, thus changes in its depth reflects hydrological changes produced by drought and humid events in both andean and extra andean region. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was analyzed to identify wet and drought periods. Monthly time series (1998-2015; 216 months) of the SPEI 3M in a station located in the andean sector (C.Sup.), another station in the extra andean sector (C.Inf.) and the Musters lake depth were analyzed. The correlation and phase shift between the time series of the SPEI 3M of each station and the variations in the depth of the lake was calculated. The percentage of drought months (C.Inf = 38%; C.Sup = 36%) were higher than humid months (C.Inf = 29%; C.Sup = 15%) for both stations. During the same period, lake depth decreased -0.7m. Cross-spectra showed high squared coherence (>0.83) over annual period between lake depth and the SPEI 3M of both stations. A drought or humid periods in the andean region and the extra andean region takes three months and half a month, respectively, to produce changes in the lake depth.

Keywords: Drought and wet periods; SPEI; Lake depth; Argentinean Patagonia; Andean and extra andean region.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática se produce por la combinación de eventos meteorológicos que acontecen a diferentes escalas espaciales y temporales (Piccolo et al., 2002). La Patagonia Argentina, localizada al sur del continente Sudamericano y al Oeste de la cordillera de los Andes, es una región semiárida, que presenta alta sensibilidad a la variabilidad climática. Esto impacta de manera crítica sobre los recursos hídricos de la región (Dore, 2005;

Compagnucci & Araneo, 2007; Araneo & Compagnucci, 2008, Scordo et al., 2014). Por ejemplo, el incremento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones nivales durante los últimos 120 años, 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 algunas cuencas los cauces permanentes han disminuido hasta un 30 % en los últimos 30 años

(Scordo et al., 2014). Esto redujo la cantidad de los recursos hídricos de la zona y por tanto su disponibilidad para el aprovechamiento antrópico.

Por otro lado, la escasez de lluvias en la Patagonia contrasta con la existencia de eventos de precipitaciones extremas (de reducida frecuencia) que producen importantes descargas confirmando potencial torrencial a las cuencas (Serra, 2004). Aquellas localidades que, debido a la escasez de agua, se asentaron cerca de ríos y lagos, durante estos eventos extremos muestran en la actualidad problemas de inundaciones. En este sentido se destacan las inundaciones sufridas por diversas poblaciones patagónicas en los años 1992, 1998 y 2001 de importantes consecuencias económicas y sociales (Serra, 2004).

Identificar la probabilidad de ocurrencia, duración e intensidad de períodos secos y húmedos es importante para planificar el uso y la contingencia del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica (UNEP, 2014). A su vez, 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. Por este motivo el estudio de los períodos secos y húmedos y sus efectos sobre los cuerpos de agua de la región es de gran importancia. El análisis de largas series de datos en el tiempo y el espacio es fundamental para entender la dinámica de estos eventos.

La aplicación de índices multivariados de sequías basados en el estudio de distintos componentes del ciclo hidrológico (Brown et al., 2008; Hao & Aghakouchak, 2014) es útil para el estudio de períodos de sequía y humedad (Wang et al., 2015). Sin embargo la aplicación de este tipo de índices es limitada especialmente en zonas remotas como la Patagonia Argentina, donde algunos de los datos que los modelos necesitan son difíciles de obtener. Es por eso que la aplicación de índices basado en variables sencillas de medir, como la precipitación y la temperatura, y que permiten realizar comparaciones de resultados en distintas regiones del mundo, son de gran utilidad (Wang et al., 2015). El Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010), es un

indicador meteorológico que determina condiciones climáticas que han sido anormalmente secas o anormalmente húmedas. Para su cálculo se utiliza solamente la precipitación y la evapotranspiración. Es un índice que ha tenido gran aceptación y se ha utilizado en estudios de sequía a diversas escalas espaciales y temporales (Vicente-Serrano et al., 2014; Blauhut et al., 2015; Wang et al., 2015; Bhon et al., 2016; Meresa et al., 2016; Das et al., 2016; Peña Gallardo et al., 2016; Yang et al., 2016). Particularmente en la Argentina se ha visto que el estado de la vegetación así como también las extensiones cubiertas por los cuerpos de agua varían de acuerdo a los períodos de sequía y humedad que fueron definidos usando el SPEI en cuencas de clima templado (Bhon, et al., 2016; Brendel et al., 2016).

En el presente trabajo se estudian los períodos de sequía y humedad en la región andina y extra andina de la Cuenca del Río Senguer (43° 36' y 46° 27' de Latitud Sur y 66° 10' y 72° 05' de Longitud Oeste). Así mismo se relaciona estos períodos con las variaciones en la profundidad del lago Musters. Este lago (45° 32' Latitud Sur - 69° 10' Longitud Oeste), es el nivel de base de la cuenca y uno de los mayores cuerpos de agua dulce de toda la Patagonia extra andina Argentina (Quirós y Drago 1999). El régimen hidrológico de la cuenca es nivopluvial (Bruniard, 1992). Dicho régimen implica que los mayores caudales dentro de la cuenca se producen al final de la primavera, cuando las nieves acumuladas durante el invierno son derretidas. Este proceso dura aproximadamente 3 meses.

El lago Musters tiene un origen tectónico (González Díaz & Di Tommaso, 2014), está rodeado por el Oeste por elevaciones que alcanzan los 900 m y su costa Sur forma parte del abanico aluvial del río Senguer (Scordo et al., 2016). Tiene una profundidad máxima de 35 m y una superficie de 420 km². Este lago es la principal fuente de agua dulce de la Patagonia extra andina, de él se extrae agua para el consumo de 350.000 habitantes de la región.

El balance hídrico del lago depende de tres flujos principales: caudal, precipitación sobre el lago y evaporación desde el lago (Scordo et al., 2015). Debido a la morfología y litología del

lecho lacustre, los ingresos por agua subterránea y los egresos por percolación profunda son limitados (Coronato, 1996; Scordo, 2015). El caudal proviene del río Senguer cuya naciente se origina en el lago Fontana, en la cordillera de los Andes y desagua en el lago Musters por su costa sur (Figura 1). El caudal de este río tiene una alta correlación (> 0.7) a escala anual e interanual (3-5 años) con dos eventos climáticos. Uno generado sobre el Océano Pacífico y conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y el otro deriva de la Corriente Circumpolar Antártica (AAO) (Compagnucci & Araneo, 2007; Scordo et al., 2015). La precipitación y evaporación sobre el lago dependen de las condiciones climáticas típicas de la Patagonia extra andina donde se localiza el lago. La

precipitación está altamente correlacionada con eventos ENSO a escala interanual (3-7 años) (Aceituno, 1988; Aravena & Luckman, 2009) y en menor medida con las corrientes provenientes del Océano Atlántico (Coronato, 1996). La evaporación es influenciada principalmente por la continentalidad y condiciones locales producidas por la gran extensión del lago (Coronato, 1996). Los vientos predominantes tienen dirección O y SO, con velocidades promedio de 30 km/h y ráfagas de 100 km/h (Valladares 2004), lo que favorece la evaporación. Además el efecto atemperante del Océano Atlántico aunque limitado por la gran altura y extensión de las mesetas patagónicas hacia el Oeste, también afecta a la evaporación del lago (Cuello 1980; Coronato, 1996).

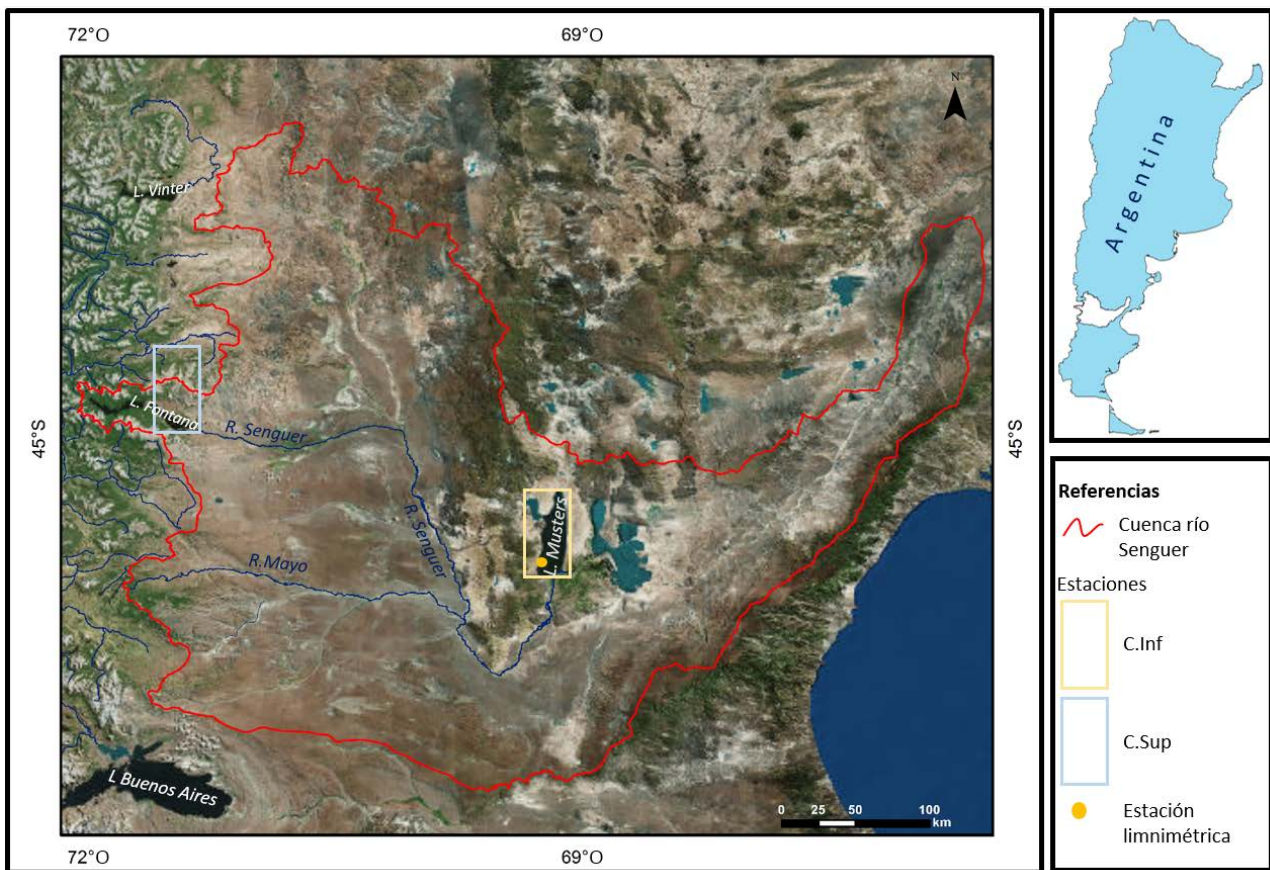


Figura 1 - Localización del área de estudio. Lago Musters en la cuenca baja del río Senguer (Patagonia extra andina). Celdas correspondientes a las estaciones del SPEI en la cuenca superior (C. Sup) y cuenca inferior (C. Inf). Localización de la estación limnimétrica en el lago Musters.

El objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar los eventos de sequía y humedad en la región andina y extra andina de la cuenca del río Senguer en la Patagonia Argentina y relacionarlos con las fluctuaciones en la profundidad del lago Musters durante el

período 1998-2015. Para identificar y caracterizar la intensidad y duración de los eventos de sequía y humedad se analizó la variación del Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI). La hipótesis de este trabajo plantea que la

variabilidad climática en la Patagonia Argentina se debe a múltiples factores meteorológicos provenientes tanto desde el océano Pacífico, la Antártida, el océano Atlántico y el propio continente, motivo por el cual los eventos de sequía y humedad difieren

espacialmente entre la cordillera y la Patagonia extra andina. El SPEI permitiría estudiar los eventos de humedad y sequía, cuyos efectos se ven reflejados en las fluctuaciones de la profundidad del lago Musters.

MATERIALES Y MÉTODOS

El SPEI es un índice climático mensual calculado a partir de la diferencia entre la precipitación acumulada en un período de tiempo y la evapotranspiración de referencia. Puede ser calculado a diferentes escalas espaciales y temporales (1 a 48 meses). Se descargaron los datos a una escala de 3 meses (SPEI 3M), con una resolución espacial de 0,5° para el período 1998-2015 del modelo global SPEI Global Drought Monitor, disponible en la página oficial del SPEI (<http://sac.csic.es/spei/home.html>) (Vicente-Serrano & Beguería, 2016). El SPEI Global Drought Monitor utiliza datos de temperatura media mensual obtenidos del modelo global NOAA NCEP CPC GHCN_CAMS (ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51yf/GHCN_CAMS/), y datos de precipitación mensual acumulada del modelo global Global Precipitation Climatology Centre (ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/first_guess/). El SPEI Global Drought Monitor estima la evapotranspiración de referencia utilizando la metodología de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

Se analizaron las series de tiempo del SPEI para dos estaciones, una ubicada en la cordillera de los Andes (cuenca superior; 44°45' S - 71° 15' O) y la otra en el sector extra andino (cuenca inferior; 45°15' S - 69° 15' O) de la cuenca hidrográfica del río Senguer (Figura 1). El SPEI fue aplicado a una escala temporal intermedia (3 meses; SPEI 3M). El SPEI calculado a esta escala está relacionado con la descarga de ríos y el volumen de agua en cuerpos de agua (Lorenzo-Lacruz et al., 2010; Vicente-Serrano et al., 2010). La categorización del SPEI considera húmedos a los registros con valores mayores a 0.5, y secos a los registros con valores menores a -0.5. Los períodos para los que el valor del SPEI se encuentra entre -0.5 y 0.5 son considerados normales (Tabla 1) (Wang et al., 2015), Vicente-Serrano et al. (2010).

La evolución temporal del índice en cada una de las estaciones y las diferencias y similitudes espaciales del SPEI 3M entre las estaciones

localizadas en la cuenca superior y la cuenca inferior fueron estudiadas. Se definió como años húmedos, aquellos donde el porcentaje de meses de húmedos fue mayor al porcentaje de meses secos. Se definió como años secos, aquellos donde el porcentaje de meses secos fue mayor al porcentaje de meses húmedos.

Tabla 1 - Categorías de SPEI.

Categorías	Valores del SPEI
Extremadamente húmedo	≥ 2
Muy húmedo	(1.50,2.00]
Moderadamente húmedo	(1.00,1.50]
Humedad incipiente	(0.50,1.00]
Normal	[0.50,-0.50]
Sequía incipiente	(-0.50,-1.00]
Moderadamente seco	(-1.00,-1.50]
Muy seco	(-1.50,-2.00]
Extremadamente seco	≤ -2

Se analizó la variación mensual, para el período 1998-2015, de la profundidad del lago Musters utilizando los datos correspondientes a la estación limnimétrica El Fortín (45° 34' 36" S) (Figura 1) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (SSRH, 2016). La estación está ubicada dentro del lago cercana a la superficie y muestras las fluctuaciones en los primeros metros del mismo.

Finalmente se profundizó en el estudio de la respuesta de la profundidad del lago a los períodos húmedos y secos. Para ello se calculó la correlación y desfase de la serie de tiempo del SPEI 3M para cada una de las dos estaciones con la variación en la profundidad del lago Musters. Esto se consiguió aplicando dos procedimientos espectrales a las series de datos mensuales (216 meses): Transformada Rápida de Fourier (Método de Welch con ventana Hamming) (TRF) y Transformada Continua Wavelet (TCW).

El análisis de TRF permitió calcular la periodicidad de las tres series de tiempo, así como la coherencia y el desfase entre las series del SPEI 3M y la profundidad del lago. En el análisis de TRF la periodicidad no contiene ninguna

dependencia temporal, por este motivo se complementa dicho análisis con la TCW. Este método permite identificar las periodicidades de mayor relevancia dentro del espectro y cuando se manifiestan con mayor o menor energía dentro

del período de estudio. La combinación de estos dos métodos espectrales ha demostrado ofrecer importantes ventajas en el estudio de variables hidrológicas (Pasquini & Depetris, 2007; Bhon et al., 2016).

RESULTADOS

Evolución Espacial y Temporal Del SPEI

La marcha del SPEI a escala 3 meses presentó diferencias espaciales y temporales entre las estaciones de la cuenca superior (C. Sup) e inferior (C. Inf). Los períodos secos (sequías incipiente + moderadamente seco + muy seco + extremadamente seco) tuvieron similares porcentajes en ambas estaciones (C. Inf = 38%; C. Sup = 36%).

Las mayores diferencias se presentaron en los períodos normales (C. Inf = 33%; C. Sup = 49%) y en los períodos húmedos (humedad incipiente + moderadamente húmedo + muy húmedo + extremadamente húmedo) C. Inf =

29% y C. Sup = 15%. Dentro de la subcategorización del SPEI se hallaron variaciones de menos del 2% para todos los eventos secos y para la categoría “muy húmedos”.

Las mayores diferencias se presentaron en el porcentaje de eventos “moderadamente húmedos” (C. Inf = 10 %; C. Sup = 4%) y “humedad incipiente” (C. Inf = 13 %; C. Sup = 8 %) (Figura 2).

Tanto los eventos “extremadamente húmedos” como “extremadamente secos” fueron más recurrentes en la cuenca baja que en la cuenca alta (C. Inf = 2 y 3 %; C. Sup = 0 y 1 % respectivamente).

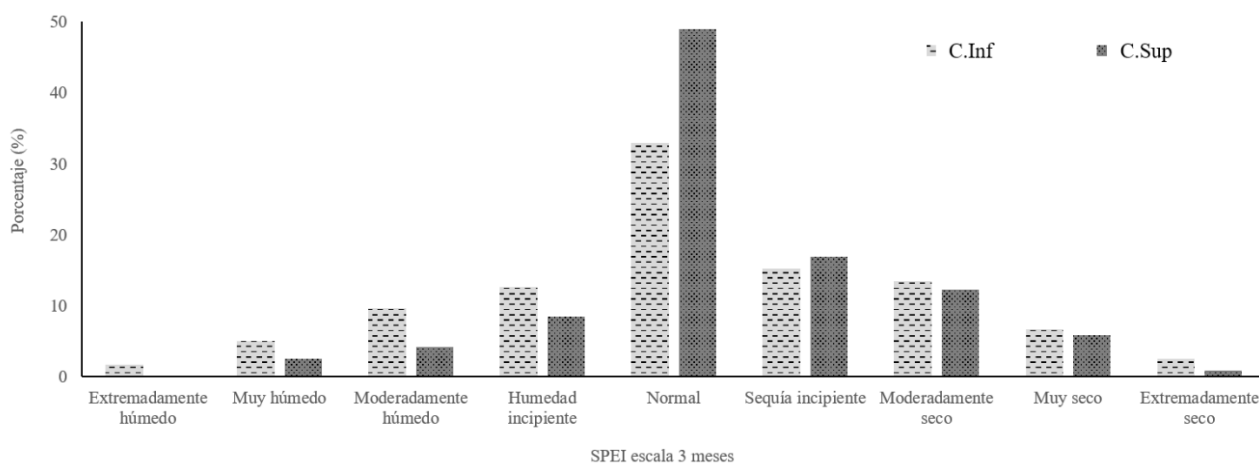


Figura 2 - Porcentaje de categorías de SPEI (escala 3 meses) para la estación cuenca inferior (C. Inf) y superior (C. Sup). Período 1998-2015.

Evolución temporal del SPEI a escala 3 Meses en la estación C. Sup.

Durante el período estudiado para la estación de cuenca superior el índice permite definir a los años 1998, 1999 y 2000 como años secos (Figura 3). En todos la diferencia entre porcentaje de meses secos ($\geq 42\%$) y porcentajes de meses húmedos ($\leq 17\%$) fue entre 50 a 25 %. Se destaca el año 1998 por presentar un 50 % de meses secos y uno de los valores más extremos de sequía (-2,1) de toda la serie.

Los años 2001, 2002 y 2003, se definen como húmedos para el período de estudio. Esto se debe a que en todos los casos la diferencia entre porcentaje de meses húmedos (≥ 33) y porcentaje de meses secos (≤ 17) fue entre 17 a

33%. Se destacan el año 2002 por presentar la mayor diferencia entre meses secos y húmedos (33%) y el valor más extremos de humedad (1,9) de toda la serie (Figura 3).

El año 2004 vuelve a ser seco, presentando una diferencia entre meses secos y húmedos del 25 %, con predominio de “sequías incipientes” (Figura 3).

Durante los años 2005 y 2006 las condiciones de humedad son un 8 % mayor a las de sequía (Figura 3). Durante los años 2007 y 2008 predominan marcadas condiciones de sequía (Figura 3). No se presentan meses con condiciones de humedad en ninguno de los dos años, mientras que el porcentaje de meses de sequía es de 58% en el 2007 y 50% en el 2008.

Si bien predominan condiciones “moderadamente seco” para los dos años, durante el 2007 se produce un evento “extremadamente seco” (-2.1).

El año 2009 presentó igual cantidad de meses

secos y húmedos, aunque difieren en intensidad (Figura 3). Los meses secos corresponden todos a condiciones de “sequía incipiente” mientras que dentro de los húmedos se presentan condiciones de “moderadamente húmedo”. Por

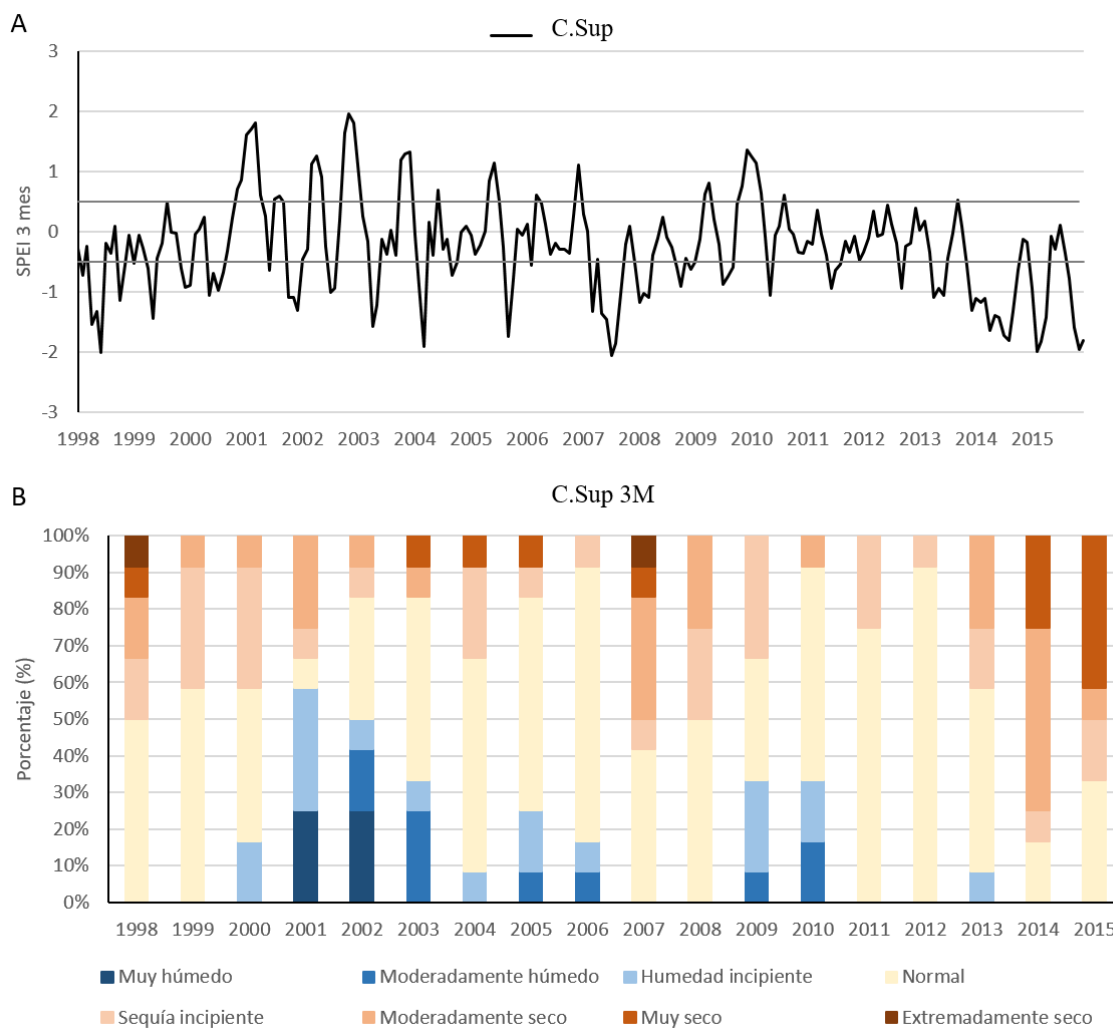


Figura 3 - SPEI en la estación C.Sup (escala temporal: 3 mes, período 1998-2015). Evolución mensual del índice (a). Porcentajes de meses con distintas categorías del SPEI para los distintos años (b). Se destaca los años 1998, 1999, 2007, 2014 y 2015 como años secos (por presentar la mayor diferencia entre meses de sequía y meses de humedad y los mayores valores de sequías). También se destacan los años 2001, 2002, 2003 y 2010 como años húmedos (por presentar la mayor diferencia entre meses de humedad y meses de sequía y los mayores valores de humedad).

otro lado el 2010 es el último de la serie (C. Sup) donde las condiciones de humedad (33%) superan a las de sequía (8%). En este caso ocurrieron igual cantidad de meses de “humedad incipiente” y “moderadamente húmedo” (Figura 3). Desde el año 2011 al 2015 no se produce condiciones de humedad a excepción del año 2013 (Figura 3). Durante los años 2011, 2012 y 2013 predominan las condiciones de normalidad sobre las de sequía, que a su vez son principalmente de “sequías incipientes”, razón por la cual no se consideran

años netamente secos. Los años 2014 y 2015 presentan el mayor porcentaje de meses secos (83% y 67% respectivamente). Sin embargo no presentan condiciones de “extremadamente seco” sino de “muy seco”.

Evolución temporal del SPEI a escala 3 Meses en la estación C.Inf.

En la cuenca inferior, los resultados del índice definen a los años 1998 y 1999 como años secos (Figura 4). En ambos la diferencia entre porcentaje de meses secos ($\geq 52\%$) y porcentajes de meses húmedos ($\leq 33\%$) osciló

entre 42 y 33 %. Se destaca el año 1998 por presentar un 67% de meses secos y uno de los valores más extremos de sequía (-2,1) de toda la serie. En cambio el año 1999 presentó el porcentaje más bajo de meses húmedos y de baja intensidad.

Los años 2000, 2002 y 2003, se definen como húmedos para el período de estudio (Figura 4). Esto se debe a que en todos los casos la diferencia entre porcentaje de meses húmedos (≥ 25) y porcentaje de meses secos

(≤ 25) varió entre 8 y 42%. Se destacan los años 2000 y 2002 por presentar la mayor diferencia entre meses húmedos y secos (42%) y los valores más extremos de humedad (2.1 y 2.2) de toda la serie. Este período solo se ve interrumpido por el año 2001, el cual es un año donde predominan las sequías sobre los períodos de humedad, sin embargo al igual que en el año 2003, estas diferencias son escasas, con lo cual pueden ser llamados años normales.

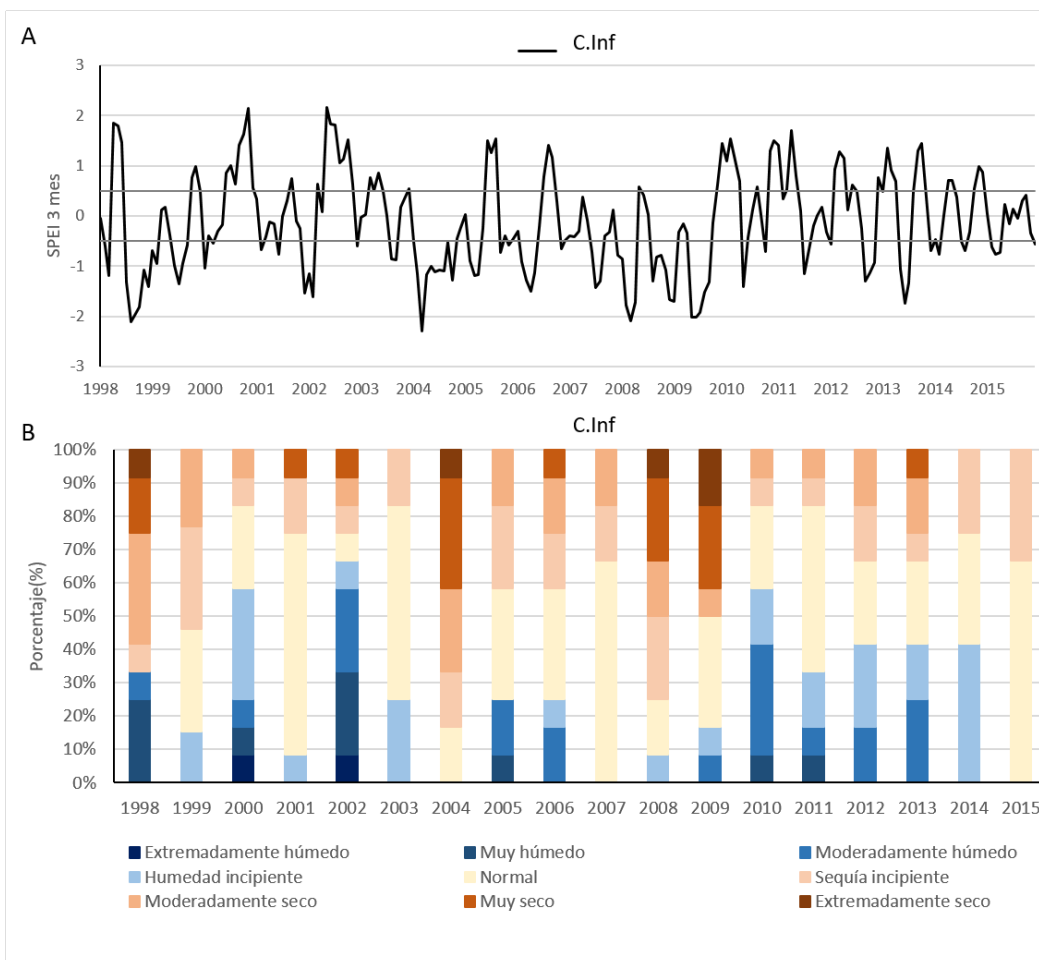


Figura 4 - SPEI en la estación C. Inf. (Escala temporal: 3 mes, período 1998-2015). Evolución mensual del índice (a). Porcentajes de meses con distintas categorías del SPEI para los distintos años (b). Se destaca los años 1998, 1999, 2004, 2007, 2008, 2009 y 2015 como años secos (por presentar la mayor diferencia entre meses de sequía y meses de humedad y los mayores valores de sequías). También se destacan los años 2000, 2002 y 2010 como años húmedos (por presentar la mayor diferencia entre meses de humedad y meses de sequía y los mayores valores de humedad).

Desde el año 2004 al 2009 la diferencia entre meses secos y húmedos es mayor al 17 % en todos los casos (Figura 4). En esta serie se destaca el año 2004 donde no se producen condiciones de humedad y el 82% de los meses predominan las condiciones de sequía. Durante el año 2008 la diferencia entre meses secos y húmedos es del 67%. Tanto en 2004 como en 2008 se producen dos de las sequías más extremas de toda la serie (-2.3 y -2.0, respectivamente). Por otra parte el

año 2007 no presenta condiciones de humedad y el 2009 presenta el mayor porcentaje de “sequías extremas” de toda la serie (17%). Si bien durante los años 2005 y 2006 predominan las condiciones de sequía sobre las de humedad, durante los mismos se producen un 25 % de meses con condiciones de humedad, algunos de ellas “moderadamente húmedas” y “muy húmedas”. Por lo que de este período de sequía (2004-2009) los años 2004, 2007, 2008 y 2009 fueron los más

secos y el 2005 y 2006 menos secos.

Desde el año 2010 al 2014 predominan condiciones de humedad (Figura 4). La diferencia entre meses húmedos (≥ 33) y secos (≤ 33) es mayor al 8 % en todos los casos. Dentro de esta serie se destacan el año 2010 donde las condiciones de humedad ocurren en el 58% de los meses y se produce un evento “extremadamente húmedo”. Si bien durante los años 2011 a 2014 predominan las condiciones de humedad sobre las de sequía, durante los mismos se producen de un 17 a un 33 % de meses con condiciones de sequía, algunos de ellas “moderadamente seco”. Por lo que de este período de humedad (2010-2014) el año 2010 fue el más húmedo y del 2011 al 2014 menos húmedos. El año 2015 es un año seco donde no se producen condiciones de humedad y el porcentaje de meses secos es del 33%. Se destaca que durante este año las sequías fueron solo incipientes (Figura 4).

Evolución Temporal de la Variación Mensual de la Profundidad del Lago Musters

El lago Musters tiene una profundidad media de 14 m y una profundidad máxima de 37,1 m. Durante el período de estudio la profundidad del lago fluctuó en tres metros. La marcha temporal de la variación mensual de la profundidad del Lago Musters debe dividirse en dos etapas para el período de estudio. Una desde el año 1998 hasta finales del año 2000 y la otra desde el año 2001 hasta el 2015 (Figura 5). El motivo de esta división se debe a que los bajos niveles de profundidad que el lago presentó durante el año 2000 impulsó la creación de una obra de infraestructura que evitó que el lago derivara agua hacia un canal secundario. Esto provocó un aumento de la profundidad media del lago de aproximadamente 0.7 m.

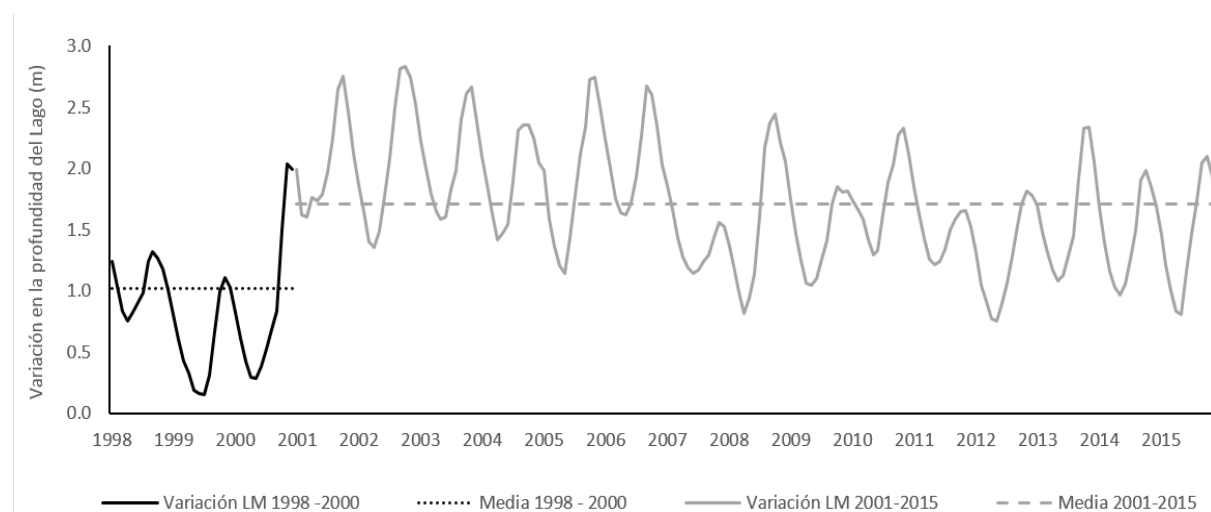


Figura 5 - Evolución temporal de la variación mensual de la profundidad del lago Musters (período 1998-2015) (a). Durante el período la profundidad fluctuó 3 m. Sin embargo se divide en dos etapas (1998-2000 y 2001-2015) correspondientes a antes y después de la obra de infraestructura en el lago que provocó un aumento de la profundidad media del lago de aproximadamente 0.7 m. Aun así la tendencia de los dos períodos es decreciente (0,6 m en el primero y 0.7 m. en el segundo). Se observa fluctuaciones intra e interanuales.

Si no se toma en cuenta los meses de Noviembre y Diciembre del año 2000 (durante los cuales se ve el efecto de la obra de infraestructura), la tendencia de los dos períodos es decreciente. De 1998 a 2000 la profundidad decreció 0,6 m, desde el año 2001 al 2015 la profundidad decreció 0.7m.

Si bien la tendencia de la serie es decreciente, en el gráfico de la marcha mensual de la variación de la profundidad (Figura 5) al igual que en los análisis espectrales (Figura 6) se observa una clara fluctuación intranual de los niveles de profundidad del lago. Así mismo se

detectan fluctuaciones interanuales. Durante algunos años la profundidad se sitúa muy por encima de la media de la serie y en otros muy por debajo de dicha media (Figura 5).

Durante los años 1998 a 2000 la profundidad se situó por debajo del promedio de la serie en el 61 % de los meses, alcanzando el valores más bajo (0.1 m) en el año 1999. Durante los años 2001 a 2006 la profundidad se situó por encima del promedio en el 67 % de los meses. Alcanzando los máximos valores de toda la serie durante los años 2001, 2002, 2003, 2006 y 2005 (2.8 - 2.6 m) (Figura 5). La excepción de este

período se encuentra en el año 2004 durante el cual, si bien la profundidad se mantiene por encima del promedio en el 66% de los meses, el valor máximo alcanzado (2,4 m) es el menor de estos años.

Durante los años 2007 a 2015 la profundidad se sitúa por debajo del promedio en el 65 % de los meses (Figura 5). Sin embargo durante este período se puede destacar los años 2007, 2011 y 2012 por presentar un alto porcentaje de meses por debajo de la profundidad media de la serie ($\geq 75\%$) y a los años 2012 y 2015, por presentar los menores valores (0.8 m) de profundidad de este período. A su vez los años 2009, 2010 y 2013, a pesar de presentar mayormente valores por debajo de la profundidad promedio de la serie, se desatacan por también presentar un porcentaje elevado de meses por encima de dicha profundidad (42 %) y los máximos valores de profundidad (2.4 - 2.3) de este período (Figura 5).

Relación entre El SPEI y la Profundidad del lago.

Análisis de la transformada rápida de Fourier.

El análisis TRF para la serie mensual de las variaciones en la profundidad del lago, muestra frecuencias significativas para los períodos anuales, interanuales (3 a 5 años) y decadales. El análisis TRF para la serie SPEI 3M en la estación C. Sup muestra frecuencias significativas para los períodos anuales, interanuales (4 a 7 años) y decadales. Similares resultados se encontraron para el análisis TRF de la serie SPEI 3M en la estación C. Inf. La conexión entre las variaciones en la profundidad del lago y el SPEI 3M en ambas estaciones es apoyada por el hecho que exhiben un elevado espectro de coherencia cuadrada (>0.7) en el rango de los períodos mencionados. Especialmente se destaca el período anual, para el cual el espectro de coherencia cuadrada entre la variación de la profundidad del lago y el SPEI 3M en C. Sup es 0,88 y en C. Inf es 0,83.

El desfase entre la variación en la profundidad y el SPEI en ambas estaciones se analizó para el período anual. Para la estación C. Sup el desfase es de tres meses, esto es coherente con el régimen hidrológico nivopluvial de la cuenca. La precipitación caída en este sector tarda aproximadamente tres

meses en derretirse y alcanzar el lago Musters en forma de caudal.

Para la estación C. Inf el desfase es de medio mes, esto es coherente con el hecho de que esta estación se localiza cerca del lago. Las consecuencias de un período seco o húmedo se ven reflejado rápidamente en las variaciones de la profundidad del lago. Cabe destacar que para ambas estaciones el desfase es relativamente corto. Por lo cual al producirse un período de meses secos o húmedos su efecto sobre la profundidad se refleja dentro del mismo año.

Análisis de la transformada continua wavelet

El análisis wavelets para la variación en la profundidad del lago muestra un máximo de energía para el período anual. Este máximo se extiende ininterrumpidamente durante todo el período de estudio (Figura 6a).

Para la serie del SPEI 3M estación C. Sup, el análisis wavelet muestra máximos de intensidad en períodos de 6 a 14 meses, los cuales están asociados a variaciones estacionales. Estos máximos de energía muestran coherencia con el máximo de energía para el período anual de la serie de variación de la profundidad (Figura 6b). Sin embargo este máximo de energía no resulta constante en toda la serie de tiempo. Es interesante notar como en esta frecuencia se produce una pérdida de energía durante los años definidos como secos (1998-1999; 2007-2008; 2011-2014), y se manifiesta con mayor intensidad durante los años definidos como húmedos (2001-2003; 2005-2006; 2009-2010) para esta estación. Para la serie del SPEI 3M estación C. Inf, el análisis wavelets muestra máximos de intensidad en períodos de 6 a 16 meses, los cuales también se asocian a variaciones estacionales. Estos máximos de energía muestran coherencia con el máximo de energía para el período anual de la serie de variación de la profundidad (Figura 6c).

De esta manera, durante el período de estudio la señal de la variación de la profundidad del lago está asociada en la frecuencia anual (doce meses) con el SPEI 3M tanto para la estación C. Sup como para la estación C. Inf. Cabe destacar que los períodos de pérdida de energía de la señal anual para una estación quedan cubiertos por la otra estación, tal es el caso de los años 1998-1999, 2007-2008

y 2011-2014 para la estación C. Sup los cuales son cubiertos por una fuerte señal anual en la estación C. Inf. Por otro lado la pérdida de

energía en la frecuencia anual en los años 2003-2004 en la estación C. Inf son cubiertos por una fuerte señal anual en la estación C. Sup.

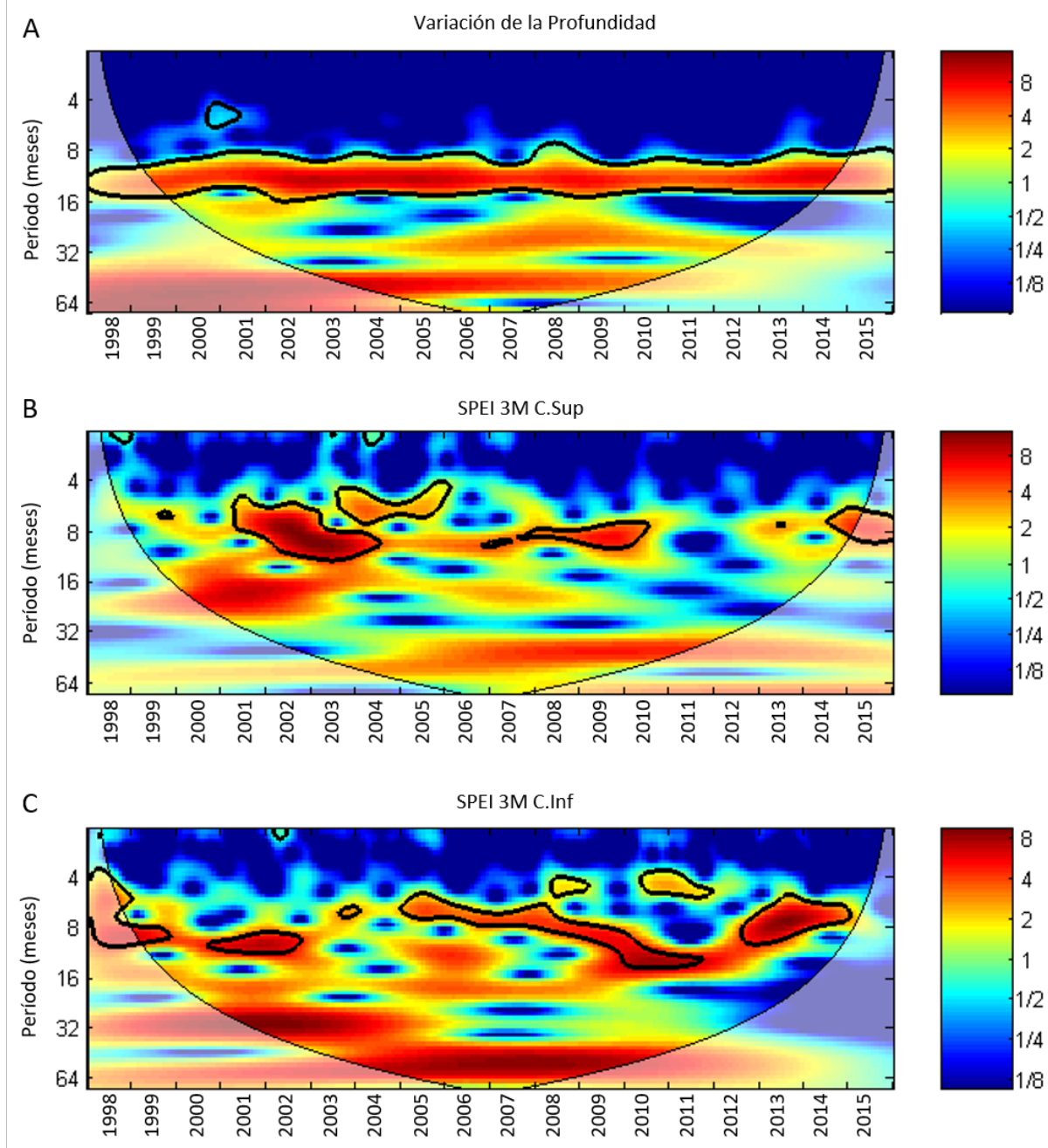


Figura 6 - Análisis de la transformada continua wavelet en el período 1998– 2015 para la serie mensual de la variación de la profundidad del Lago Musters, SPEI 3M en la estación C. Sup. y C. Inf. (a) Para la variación de la profundidad del lago el análisis wavelets muestra un máximo de energía ininterrumpido para el período anual. (b) Para la serie del SPEI 3M estación C. Sup, wavelets muestran máximos de intensidad en períodos de 6 a 14 meses, asociados a variaciones estacionales. Esta frecuencia pierde energía durante los años definidos como secos y se manifiesta con mayor intensidad durante los años definidos como húmedos. (c) Para la serie del SPEI 3M estación C. Inf, wavelets muestran máximos de intensidad en períodos de 6 a 16 meses asociados a variaciones estacionales. Durante el período de estudio la señal de la variación de la profundidad del lago está asociada a una frecuencia anual con el SPEI 3M tanto para la estación C. Sup como para la estación C. Inf. Cabe destacar que los períodos de pérdida de energía de la señal anual para una estación quedan cubiertos por la otra estación.

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se corroboró que el SPEI es un índice climático adecuado para analizar períodos de humedad y sequía en la

región andina y extra andina de la Cuenca del río Senguer en la Patagonia Argentina. Esto se debe a que los distintos análisis descriptivos y

espectrales mostraron una fuerte relación entre la ocurrencia de dichos eventos y las variaciones en la profundidad del Lago Musters. La estación C. Sup. refleja las condiciones de la región andina, mientras que la estación C. Inf. las de la región extra andina.

En ambas estaciones el porcentaje de meses secos supero al de los meses húmedos. Esto coincide con el hecho de que la profundidad del lago haya tenido una tendencia decreciente durante los dos períodos descritos para esta variable (1998-2000 -0.6 m y 2001-2015 -0.7 m). Estudios sobre la superficie de los lagos de esta región también señalaron que al final de ambos períodos el área de estos cuerpos de agua había decrecido (Tejedo, 2003; Llanos et al., 2016; Scordo et al., 2017a y b). Por ejemplo, a solo 15 km hacia el Este del lago Musters se localiza el lago Colhué Huapí cuya superficie en el año 2006 fue de aproximadamente de 750 km², sin embargo para el año 2015 está era de 270 km² (Llanos et al., 2016; Scordo et al., 2017a). Esto indica que en los últimos 10 años el volumen de agua los lagos de la región se vieron afectado por una alta variabilidad climática con tendencia negativa.

A su vez cuando los períodos de humedad y sequía de mayor intensidad y duración coincidieron en las dos estaciones. Durante los períodos de mayor intensidad y duración de humedad (sequía) se produjeron los períodos de mayor (menor) profundidad del lago Musters. Se destacan los años 1998-1999, años secos para las dos estaciones con ocurrencia de “sequías extremas”, período en el cual la profundidad del lago Musters decreció 0,6 m en promedio y llego a presentar disminuciones de hasta 1,4 m. Así mismo durante los años 2000-2003, años húmedos para las dos estaciones con ocurrencia de “humedad extrema”, se producen los mayores niveles de profundidad del lago Musters. Estas fluctuaciones en la profundidad del lago coincide con las fluctuaciones en la superficie de los lagos de la región descrita en otros estudios (Llanos et al., 2016; Scordo et al. 2017a).

A su vez la hidrología del lago Musters esta mayormente controlada por el caudal del río Senguer el cual se origina en la región andina (Scordo et al., 2015).

En este sentido es notorio que en la estación C.Sup, nueve de los años analizado fueron secos, solo se produjo un 15% de meses con condiciones de humedad y ninguno de “extrema humedad”, en contraposición al 36% de meses secos y la ocurrencia de eventos de “extrema sequía” y “muy seco”. Estas condiciones coinciden con la tendencia decreciente de la profundidad del lago durante el período de estudio.

Por otro lado, el análisis de la marcha temporal del SPEI 3M en la estación C. Sup. y C. Inf. permitió observar diferencias espaciales en la intensidad, frecuencia y duración de los eventos de sequía y humedad en la Cuenca del Río Senguer. Las diferencias espaciales en las condiciones climáticas en estas regiones obedecen al hecho de que las mismas dependen de distintos factores tanto regionales como locales. Diferencias entre las condiciones climáticas de la región andina y extra andina a estas latitudes han sido encontradas por otros autores. Aravena & Luckman (2009) hallaron que a estas latitudes, las precipitaciones en la región extra andina estaban altamente correlacionadas con el efecto del EL Niño-Oscilación del Sur, mientras que las precipitaciones en la región andina estaban correlacionadas con la Oscilación Antártica. Por otro lado las condiciones climáticas locales asociadas a la continentalidad y las extensas superficies lacustres afectan la evaporación desde los lagos en la región extra andina (Coronato, 1996). Así mismos Pasquini et al. (2008) demostraron que en la región andina se desarrollan condiciones climáticas locales que producen cambios en la hidrología de los sistemas lacustres.

La compleja interacción entre los eventos a escala regional y local tanto en la región andina como extra andina, hace difícil comprender como los períodos de humedad y sequía en ambas regiones influyen la hidrología de los lagos localizados al centro de la Patagonia extra andina (Scordo et al., 2015).

Esto se debe a que estos cuerpos de agua reciben importantes caudales de ríos que se originan en la cordillera, pero a su vez las precipitaciones locales y la evaporación desde los mismos depende de las condiciones climáticas extra andina. En este sentido, el

presente estudio permitió comprender algunas de estas relaciones.

El desfase entre la serie mensual de la variación de la profundidad del lago Musters y del SPEI 3M en la estación C. Sup para el período anual (Coherencia cuadrada 0,88) es de tres meses, esto coincide con el régimen hidrológico nivopluvial de la cuenca. De este modo, los eventos de humedad y sequía producidos en la región andina tardan aproximadamente tres meses en manifestarse en el lago Musters.

Por otro lado el desfase entre la variación de la profundidad y del SPEI 3M en la estación C. Inf para el período anual (Coherencia cuadrada 0,83) es de medio mes, esto coincide con el hecho de que esta estación se localiza cerca del lago. Al producirse un período seco o húmedo rápidamente se ve reflejado en la profundidad del lago.

La relación entre el SPEI 3M y la profundidad del lago Musters está asociada a las fluctuaciones en el caudal del río Senguer y por ende a los módulos climáticos regionales

más relevantes de la región como el AAO y el SOI. Similar a los resultados de este trabajo, Scordo et al. (2017b) han encontrado que para la periodicidad interanual el caudal del río Senguer (medido en la cuenca baja cercano a lago Musters) está desfasado más de un mes tarde que el AAO, y menor a un mes del ENSO. El AAO genera la mayor parte de las precipitaciones en la región andina en esta sector de la Patagonia (Aravena & Luckman, 2009).

La precipitación en los Andes (en este trabajo representada por el SPEI 3M en la estación C. Sup) tarda al menos un mes en verse reflejada en la descarga del río en la cuenca baja (Scordo et al., 2017b) y por ende en la profundidad del lago Musters. El ENSO genera las precipitaciones en la región extra andina en esta zona (Aravena & Luckman, 2009). La precipitación en el sector extra andino (en este trabajo representada por el SPEI 3M en la estación C. Inf) rápidamente se ve reflejada en el caudal del río en la cuenca baja (Scordo et al., 2017b) y por ende en la profundidad del lago Musters.

CONCLUSIÓN

El SPEI 3M resulta una herramienta eficiente para estudiar los eventos de sequía y humedad tanto en la región andina como extra andina de la Patagonia Argentina. La aplicación de este índice que permite determinar condiciones climáticas de humedad y sequía, basado en variables sencillas de medir (precipitación y evapotranspiración) y que ha tenido gran aceptación y se ha utilizado en estudios de sequía a diversas escalas espaciales y temporales, es de gran importancia en la Patagonia Argentina. Esto se debe a que por lo extenso y remoto de la región, los datos que necesitan los índices calculados a partir de modelos multicriterio son difíciles de obtener.

Si bien la intensidad y frecuencia de los eventos de sequía y humedad tuvo diferencias entre las estaciones C. Sup y C. Inf, las cuales se deben a la interacción de múltiples factores meteorológicos regionales y locales, se observó que para ambas estaciones dichos eventos estaban relacionados con las variaciones en la profundidad del lago Musters. Los efectos de los períodos de humedad y sequía que se producen tanto en la región andina como extra

andina son reflejados por el lago por estar localizado en la cuenca baja.

La correlación entre los eventos de sequía y humedad con las variaciones en la profundidad del lago es especialmente elevada (Coherencia cuadrada $\geq 0,83$) a escala anual. El desfase entre las series del SPEI 3M de la C. Sup es de tres meses y de la C. Inf es de medio mes, lo cual es coherente con el régimen hidrológico de la cuenca.

Poder definir las condiciones de sequía y humedad tanto en la región andina como extra andina es importante para poder planificar el uso y la contingencia del recurso hídrico de las cuencas hidrográficas de la Patagonia. Esto es especialmente necesario para los emprendimientos petroleros, mineros, agrícola-ganaderos y las localidades que se desarrollan cerca de ríos y lagos y demandan un gran uso de recursos hídricos. Esto es particularmente importante en la cuenca del río Senguer y especialmente en el lago Musters, debido a que es la principal fuente de agua dulce de la Patagonia extra andina Argentina y de él se extrae agua para el consumo 254.000 habitantes.

AGRADECIMENTOS

El presente estudio ha sido realizado con el aporte del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN3038, que es financiado por la US National Science Foundation (Grant GEO-1128040), y el proyecto IAI-CONICET y a la Universidad Nacional del Sur.

REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 505-524, 1988.
- ARANEO, D.C. & COMPAGNUCCI, R.H. Atmospheric circulation features associated to Argentinean Andean rivers discharge variability. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 1, L01805, 2008. doi: 10.1029/2007GL032427
- ARAVENA, J.C. & LUCKMAN, B.H. Spatio-temporal rainfall patterns in southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 2106-2120, 2009.
- BLAUHUT, V., STAHL, K., STAGGE, J.H., TALLAKSEN, L.M., DE STEFANO, L., VOGT, J. Estimating drought risk across Europe from reported drought impacts, hazard indicators and vulnerability factors. **Hydrology and Earth System Sciences Discussion**, v. 12, p. 12515-12566, 2015.
- BOHN, V.Y., DELGADO, A.L., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, p. 818, 2016.
- BRENDEL, A.S., BOHN, V.Y., PICCOLO, M.C. Efecto de la variabilidad climática sobre el estado de la vegetación y la cobertura de agua en una cuenca de clima templado (Argentina). **Anuário do Instituto de Geociências** (en prensa), 2017.
- BROWN, J.F., WARDLOW, B.D., TADESSE, T., HAYES, M.J., REED, B.C. The vegetation drought response index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. **GIScience and Remote Sensing**, v. 45, n. 1, p. 16-46, 2008.
- BRUNIARD, E.D. **Hidrografía: Procesos y tipos de escurrimiento superficial**. Editorial Ceyne, Buenos Aires, Argentina, 124p., 1992.
- COMPAGNUCCI, R.H. & ARANEO, D.C. Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. **Ingeniería Hidráulica en México**, v. 22, n. 3, p. 23-35, 2007. ISSN: 0186-4076
- CORONATO, F.R. El problema de la desecación del lago Colhué Huapí desde la Geografía Histórica. En ACTAS DE LA 64ª SEMANA DE GEOGRAFÍA, GAEA. Bahía Blanca, 2003. **Resumen Extendido...** Bahía Blanca, Argentina, 2003, p. 165-170.
- CORONATO, F.R. Influencia climática de los lagos Musters y Colhue-Huapi. **Revista Meteorológica**, v. 21, n.1-2, p. 65-72, 1996.
- CUELLO, A. Tipos de clima. En Chiozza & Figueiras (Eds), **Atlas total de la República Argentina, Vol. 2**. Centro Editorial de América Latina, Buenos Aires, Argentina, 510 p., 1980.
- DAS, P.K., DUTTA, D., SHARMA, J.R., DADHWAL, V.K. Trends and behavior of meteorological drought (1901-2008) over Indian region using standardized precipitation-evapotranspiration index. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 909-916, 2016.
- DORE, M.H.I. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? **Environment International**, v. 31, n. 8, p. 1167-1181, 2005.
- GONZÁLEZ DÍAZ & E.F., DI TOMMASO, I. Paleogeoformas 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**, v. 71, n. 3, p. 416-426, 2014.
- HAO, Z.C. & AGHAKOUCHAK, A. A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 1, p. 89-101, 2014.
- LLANOS, E., BEHR, S., GONZALEZ, J., COLOMBANI, E., BUONO, G., ESCOBAR, J.M. Informe de las Variaciones del Lago Colhué Huapí mediante sensores remotos y su relación con las precipitaciones. **Informe Técnico**. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Trelew, Argentina, p. 1-8, 2016.
- LORENZO-LACRUZ, J., VICENTE-SERRANO, S.M., LÓPEZ-MORENO, J.I., BEGUERÍA, S., GARCÍA-RUIZ, J.M., CUADRAT, J.M. The impact of droughts, water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). **Journal of Hydrology**, v. 386, p. 13-26, 2010.
- MASIOKAS, M., VILLALBA, R., LUCKMAN, B., LASCANO, M., DELGADO, S., STEPANEK, P. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. **Global Planetary Change**, v. 60, n. 1-2, p. 85-100, 2008.
- MERESA, H.K., OSUCH, M., ROMANOWICZ R. Hydro-Meteorological Drought Projections into the 21-st Century for Selected Polish Catchments. **Water**, v. 8, n. 5, p. 206, 2016.
- PASQUINI, A. I., LECOMTE, K. L., DEPETRIS, P. J. Climate change and recent water level variability in Patagonian proglacial lakes, Argentina. **Global and Planetary Change**, v. 63, n. 4, p. 290-298, 2008.
- PASQUINI, A.I. & DEPETRIS, P.J. Discharge trends and flow dynamics of South America rivers draining the southern Atlantic seaboard: an overview. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 385-399, 2007.
- PEÑA-GALLARDO, M., GÁMIZ-FORTIS, S.R., CASTRO DÍEZ, Y., ESTEBAN-PARRA, M.J. Análisis comparativo de índices de sequía en Andalucía para el periodo 1901-2012. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 42, n. 1, p. 67-88, 2016.
- PICCOLO, M.C., CAPELLI, A., CAMPO, A. La sequía de 1995 en el sur de la región pampeana argentina. En LUGO J. & INBAR M. (editores), **Desastres Naturales en América Latina**
- RABASSA, J. El cambio climático global en la Patagonia desde el viaje de Charles Darwin hasta nuestros días. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, v. 67, n. 1, p. 139-156, 2010.
- SCORDO, F., CARBONE, M.E., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Influencia de Eventos de Humedad y Sequía en Lagos de la Patagonia Argentina: el Caso de los Lagos Musters y Colhué Huapí. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 3, p. 170-180, 2017a.
- SCORDO, F., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Modificación del curso de los ríos en la cuenca del Senguer: período 1994-2013. En **Geotecnologías del sur argentino. Casos de estudio**. Bahía Blanca, Argentina, p. 487-494, 2014.
- SCORDO, F., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Relación entre el caudal y el forzamiento climático en la evolución del área del lago Colhué Huapí (1998-2014). En III JORNADAS NACIONALES DE POSGRADO EN GEOGRAFÍA Y II JORNADAS INTERNACIONALES DE POSGRADO EN GEOGRAFÍA. IV JORNADAS DEL PROGRAMA DE POSGRADO DEL DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y

- TURISMO. **Resumen...**Bahía Blanca, Argentina, p. 36-38, 2015.
- SCORDO, F., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Response of lake surface area in Patagonia to variations in river discharge and austral climate modes. En GLOBAL LAKE ECOLOGICAL OBSERVATORY NETWORK ALL HAND MEETING 19. **Resumen**, Lake Mohonk, Estados Unidos, p. 84-85, 2017b.
- SCORDO, F., SEITZ, C., MELO, W.D., PICCOLO, M.C., PERILLO, G.M.E. Dinámica geomorfológica de la Cuenca del Río Senguer. En 3º JORNADAS DE TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DEL SUR ARGENTINO. **Resumen...**Bahía Blanca, Argentina, p. 73, 2016.
- SERRA, J.J. "Urbanización e inundaciones en sistemas hídricos del centro de la región patagónica". En Bertoni, J. C. (editor), **Inundaciones urbanas en Argentina**. Global Water Partnership, Córdoba, Argentina, p. 155-196, 2004.
- SSRH Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina. **Base de datos hidrológica integrada**. Disp. en: http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php. Acceso, 15 de Enero 2016.
- TEJEDO, A.G. Degradación de suelos en los alrededores del lago Colhué Huapí, Escalante, provincia de Chubut. En PRIMER CONGRESO DE LA CIENCIA CARTOGRÁFICA Y VII SEMANA NACIONAL DE LA CARTOGRAFÍA. **Resumen...**Buenos Aires, Argentina, p. 1-9, 2003.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.
- UNEP United Nations Environment Programme. **Towards Integrated Water Resources Management. International experience in development of river basin organizations**. Sudan, v. 31 p., 2014.
- VALLADARES, A. Cuenca de los ríos Senguer y Chico (Cuenca N°66). **Informe Técnico**, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina, p. 1-6, 2004.
- VICENTE-SERRANO, S.M. & BEGUERÍA, S. **SPEI Global Drought Monitor**. Disp. en: <http://sac.csic.es/spei/home.html>. Acceso, 15 de Enero 2016.
- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.
- VICENTE-SERRANO, S.M., CAMARERO, J.J., AZORIN-MOLINA, C. Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. **Global Ecology and Biogeography**, v. 23, p. 1019-1030, 2014.
- WANG, K., LI, Q., YANG, Y., ZENG M., LI, P., ZHANG, J. Analysis of spatio-temporal evolution of droughts in Luanhe River Basin using different drought indices. **Water Science and Engineering**, v. 8, n. 4, p. 282-290, 2015.
- YANG, M., YAN, D., YU, Y., YANG, Z. SPEI-based spatio-temporal analysis of drought in Haihe River Basin from 1961 to 2010. **Advances in Meteorology**, 2016

*Submetido em 8 de março de 2017
Aceito em 10 de janeiro de 2018*