

# Modelo probabilístico de pronóstico estacional de eventos extremos de caudal en la cuenca del río Atuel

Melanie Meis<sup>1,2</sup>, María Paula Llano<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO, FCEN-UBA)

<sup>2</sup> CONICET

E-mail: mmeis@at.fcen.uba.ar

**RESUMEN:** Ante al impacto del cambio climático en diferentes variables hidrometeorológicas resulta necesario continuar con estudios en lo que refiere a eventos extremos. En este trabajo se propone analizar eventos extremos de caudal en la cuenca del río Atuel, en particular en la estación La Angostura en el periodo temporal 12/1974-11/2016. Para ello se estimó el desfase entre el índice climático estacional SOI con los valores estacionales medios de caudal. A partir del resultado anterior se evaluó la probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos extremos y los periodos de retorno asociados. En consecuencia, se calculó la probabilidad de eventos extremos en el caudal estacional dado valores del índice previos.

## 1 INTRODUCCIÓN

La región central-oeste de la República Argentina conocida como cuyana, comprende las provincias de Mendoza, San Juan y San Luis. Esta región del país es considerada de suma importancia por las actividades agrícolas que se desarrollan en la misma, así como también por su capacidad de generar energía hidroeléctrica. De acuerdo con la mención previa, la realización de estudios hidroclimáticos en la región resultan de gran importancia para colaborar en un desarrollo óptimo de dichas actividades socio-económicas, como así también en la prevención de impactos negativos en la región como sequías (Rivera et. al, 2017).

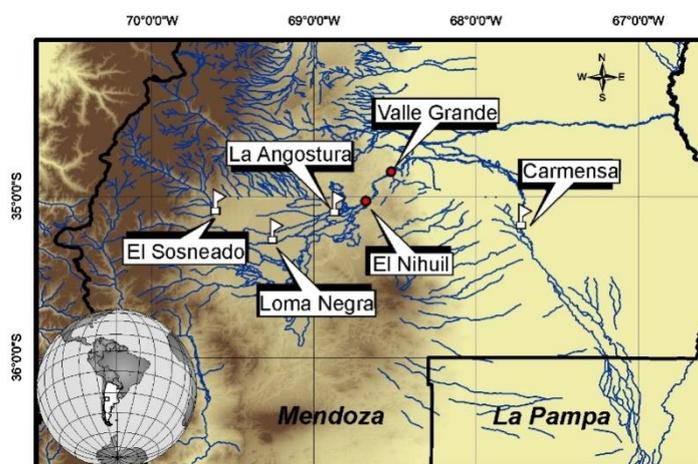
La exploración del régimen hidrológico del río Atuel en la Argentina con relación a fenómenos climáticos ha sido realizada por varios autores. Compagnucci y Vargas (1998) analizaron la variabilidad interanual en los ríos que comprenden la zona de Cuyo y su relación con los eventos ENSO, encontrando que la asociación entre las anomalías del caudal en verano resulta evidente. Así también, Compagnucci et al. (2000) estudiaron el caudal del río Atuel a fin de establecer la posible influencia de los eventos ENSO en el mismo, hallando señales significativas en distintas bandas de frecuencia. Más aún, Araneo et al. (2015) lograron determinar los principales patrones de variabilidad de escala intra-estacional del caudal en el río Atuel asociado a una variabilidad intraestacional de anomalías de temperatura sobre la región de la cuenca.

De acuerdo con los antecedentes previamente mencionados se destaca la necesidad de continuar caracterizando a nivel climatológico la cuenca del río Atuel. Por lo que se propone a partir de este trabajo profundizar y abordar la relación del caudal y los fenómenos climáticos desde un punto de vista estadístico probabilístico obteniendo medidas de cuantificación estocástica. Más aún, se presenta como objetivo

caracterizar de manera conjunta la relación entre el fenómeno del ENSO y el caudal estacional generando una herramienta de pronóstico de este último.

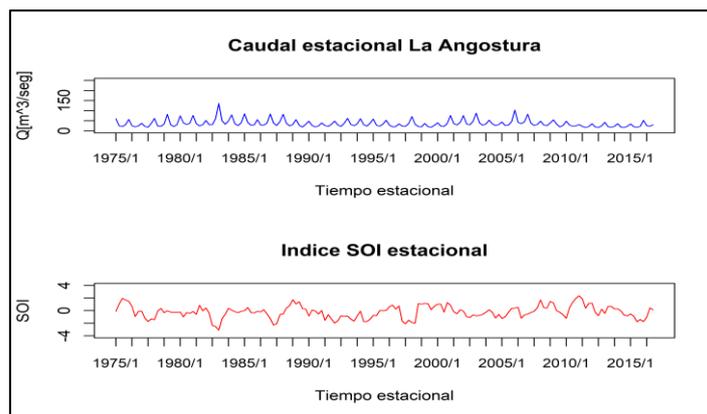
## 2 DATOS Y METODOLOGÍA

Para el estudio realizado se consideró el caudal mensual de la estación La Angostura del río Atuel, ubicada en la región oeste (latitud: 35° 05' 56" longitud: 68° 52' 25") de la República Argentina (Figura 1). Se analizó un periodo de 44 años de estudio, desde diciembre 1974 hasta noviembre 2016, y los datos fueron obtenidos a través de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina. También para el desarrollo del trabajo propuesto se analizó el índice climático Southern Oscillation Index (SOI), el mismo fue adquirido a través de la NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration), en igual periodo de tiempo que el previamente mencionado. Se considera dicho periodo temporal pues a partir de allí hay evidencia significativa de un cambio en el régimen de circulación en el hemisferio sur (García y Vargas, 1998).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la cuenca del Atuel destacando las estaciones de medición de caudal mensual (El Sosneado, Loma Negra, La Angostura, Carmensa), en conjunto con los embalses (El Nihuil, Valle Grande).

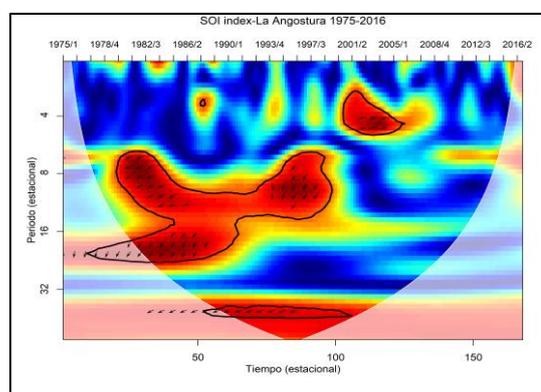
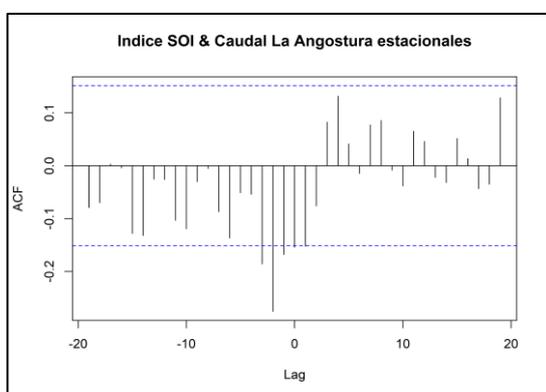
Asimismo, las series temporales mensuales tanto del caudal como del índice climático fueron transformadas en estacionales. De esta manera, se obtuvieron cuatro valores por año mediante el promedio de cada trimestre (Dic-Ene-Feb, Mar-Abr-May, Jun-Jul-Ago y Sep-Oct-Nov, Figura 2). Por otra parte, se evaluó la estacionaridad de las series, mediante los test estadísticos de Dickey Fuller (1996) y Phillips-Perron (1998), donde en ambos casos rechazan la hipótesis nula de no estacionaridad con un p-valor menor al 0.05.



**Figura 2.** Series temporales estacionales desde el verano 1975 a primavera 2016 para el caudal estacional en La Angostura y el índice SOI estacional.

Con las nuevas series de tiempo se procedió a analizar la relación entre el caudal y el índice SOI estacional por medio de dos metodologías distintas. Primero a través de una correlación cruzada de manera de evaluar la relación y el laggeado de la misma, y como esta metodología supone relación lineal entre las variables se consideró también otro tipo de metodología wavelet cruzado y wavelet coherencia (Maraun and Kurths, 2004, Grinsted et al., 2004). En el caso de la última metodología, la misma permitió detectar ondas significativas que ocurren en ambas series de tiempo en un periodo temporal puntual, y además la herramienta no solo se utilizó para evaluar la relación de las variables a través del tiempo sino también para obtener la diferencia de fase entre las mismas, es decir el periodo temporal que la señal de una de las variables tarda en generar un impacto sobre la otra.

De acuerdo con ambas metodologías mencionadas (correlación cruzada y wavelet coherencia) se obtuvo que la variable SOI está relacionada con el caudal que ocurre dos estaciones después, es decir con un desfase igual a  $2\Delta t$  (con  $\Delta t$  igual a 1 estación), Figura 3a y Figura 3b respectivamente. Este resultado fue tenido en cuenta a la hora de realizar los cálculos posteriores.



**Figura 3.** a) Correlación cruzada entre el índice SOI estacional y el caudal estacional de la estación de La Angostura. b) wavelet coherencia entre las mismas variables anteriores para el periodo verano 1975 a primavera 2016. Las flechas negras indican el desfase entre ambas variables, y el contorno el área significativa con un 95% de confianza.

Continuando con el estudio se empleó la teoría de cópulas para vincular las dos variables y luego estimar la probabilidad de ocurrencia conjunta entre el caudal y el índice, en particular en eventos extremos. Para ello, previamente fue necesario obtener el ajuste marginal de cada una de las series de datos a considerar. Se analizaron distintas funciones clásicas de distribución posibles (Normal, Lognormal, Gamma, Gumbel, Weibull y GEV) estimando los parámetros de cada distribución mediante el método de máxima verosimilitud. Luego, se realizaron test de bondad de ajuste considerando el test de Kolmorov-Smirnov (*K-S*) mediante un reemplazo de Bootstrap a un 95% de confianza. Por otra parte, es importante aclarar que en el caso que más de una distribución no rechazara el test se optó por la distribución que presentó menor valor del criterio de Akaike (AIC), (Meis y Llano, 2018). Además, se presentan las comparaciones entre cuartiles de la función de distribución teórica propuesta y la función de distribución empírica, conocido como qq-plot, de esta manera se pretendió observar la calidad del ajuste.

La cuantificación de las relaciones multivariadas en eventos extremos es uno de los objetivos del trabajo, para ello se pretende estimar una función de probabilidad multivariada, a través del método de cópulas como ya se mencionó previamente. De acuerdo al teorema de Sklar (1945), si  $F_{xy}$  es la función de distribución conjunta con marginales  $F_x$  y  $F_y$ , entonces existe una función bivariada copula (2-copula) tal que

$$F_{xy}(x,y) = C(F_x(x), F_y(y)) \quad (1)$$

Para todos los  $x$ ,  $y$  reales. Si  $F_x$  y  $F_y$  son continuas, entonces existe una única  $C$ ; caso contrario  $C$  esta únicamente definida en el Rango ( $F_x$ ) x Rango ( $F_y$ )

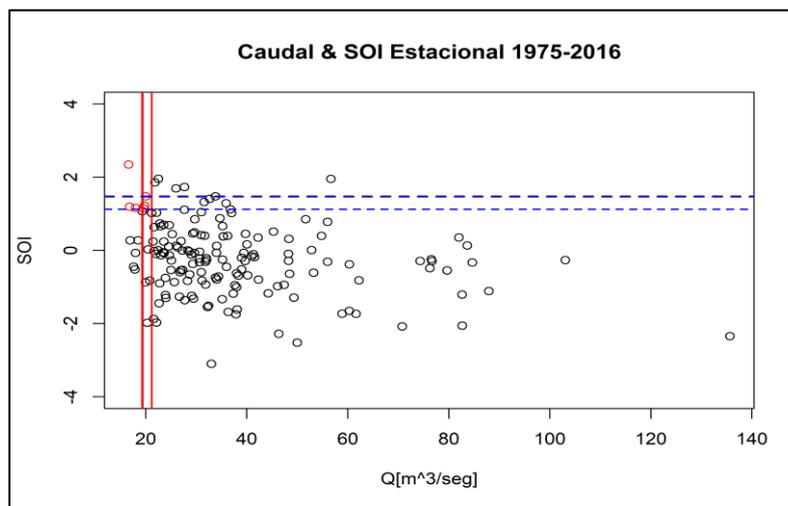
Al revés, si  $C$  a 2-copula y  $F_x$ ,  $F_y$  son funciones de distribución, entonces la función  $F_{xy}$  dada por la ecuación anterior es una función de distribución conjunta con marginales  $F_x$  y  $F_y$ .

### 3 RESULTADOS

De acuerdo con el objetivo principal del trabajo que es modelar la relación del caudal en la estación La Angostura y el índice SOI a nivel estacional, y en particular la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos se presenta la Figura 4. En la misma se destaca la ocurrencia de eventos que ocurren por debajo del percentil 10 del caudal y por encima del percentil 90 del índice, es decir situaciones de eventos NIÑA asociado a un bajo caudal estacional, como así también la relación negativa que se puede observar a través de dicha figura. Asimismo, la relación entre las variables presenta un coeficiente de correlación de *Rank*

*Kendall* alrededor de los -0.27 (relación significativa y negativa) teniendo en cuenta el desfase temporal ya mencionado en la sección anterior.

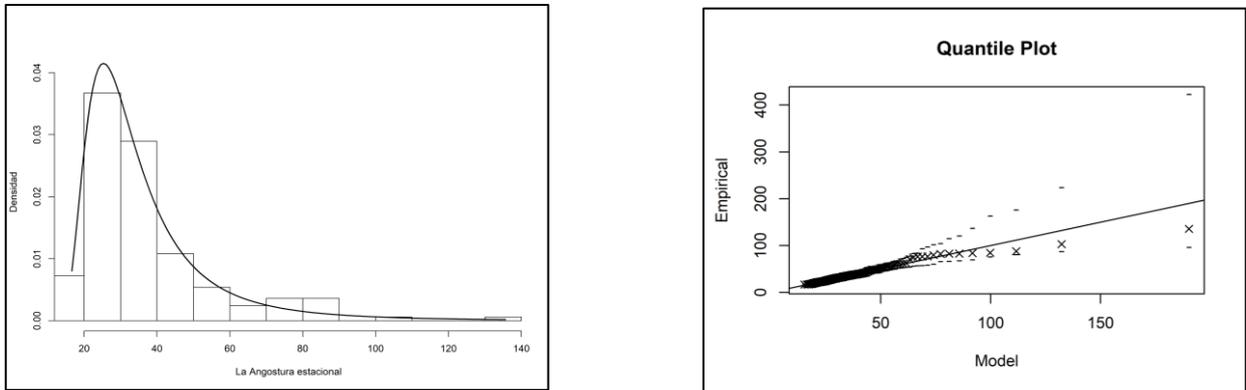
De acuerdo con la metodología que se quiere emplear previamente es necesario conocer las distribuciones teóricas que podrían ajustarse cada una de las series temporales en cuestión. Como ya ha sido mencionado en



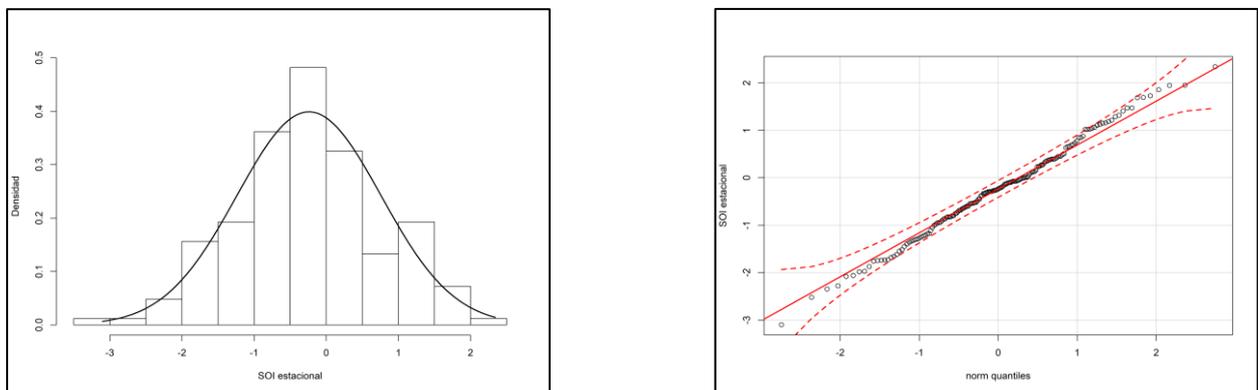
**Figura 4.** Diagrama de dispersión entre las series estacionales del caudal en La Angostura y el índice SOI. Las líneas rojas representan el percentil 5 y 10 del caudal estacional en La Angostura, mientras que las líneas azules punteadas representan el percentil 90 y 95 del índice estacional SOI

la sección de datos y metodología, de las distribuciones teóricas propuestas el caudal estacional podría ajustarse a una distribución de *GEV* con un 95% de confianza. Los parámetros de dicho ajuste resultaron ser:  $\mu = 27.8246496$   $\sigma = 9.3078391$   $\xi = 0.3286079$ . Siendo  $\mu$  el parámetro de locación,  $\sigma$  el de escala y  $\xi$  el de forma. Por otra parte, en el caso de la serie estacional SOI de las funciones teóricas consideradas dos de ellas: *Normal* y *GEV* no rechazaron la hipótesis nula del test *K-S* sin embargo el *p-valor* para la función de distribución *GEV* presentó un valor cercano al rechazo de la hipótesis nula, y además como considerar esta función teórica implicaba estimar mayor cantidad de parámetros se optó por tener en cuenta la función de distribución *Normal* con  $\mu = -0.23$  y  $\sigma = 1$ , siendo  $\mu$  la media y  $\sigma$  el desvío; y si además se consideraba el análisis multivariado que posteriormente se va a desarrollar no había diferencias significativas entre los resultados obtenidos. Asimismo, las Figuras 5a, 5b y 6a, 6b muestran una medida de evaluación de los ajustes teóricos para el caudal y el índice, respectivamente. Donde en la Figura 5a y 6a se presenta la distribución de los datos empíricos junto con cada curva de densidad de probabilidad teórica propuesta. Por otra parte, la Figura 5b y 6b presentan la relación entre los cuantiles teóricos y los observados donde la línea

recta da una medida de lo que sería un ajuste ideal, junto con un intervalo de confianza al 95%. En este sentido, de las figuras anteriores se puede inferir que los resultados de los ajustes han resultado óptimos.



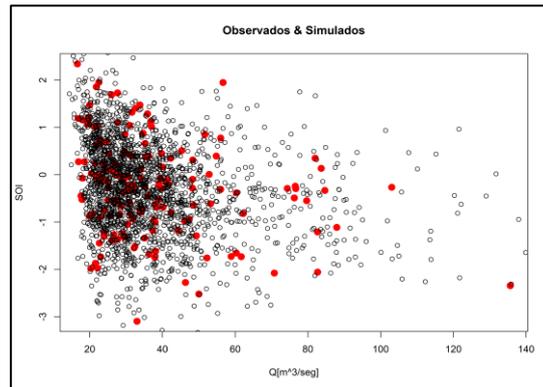
**Figura 5.** a) Histograma de frecuencia relativa de los datos observados del caudal estacional, junto con la curva teórica de densidad de probabilidad *GEV* de acuerdo con los parámetros estimados. b) Gráfico de los cuantiles empíricos vs. los teóricos.



**Figura 6.** a) Histograma de frecuencia relativa de los datos observados del índice estacional SOI, junto con la curva teórica de densidad de probabilidad *Normal* de acuerdo con los parámetros estimados. b) Gráfico de los cuantiles empíricos vs. los teóricos.

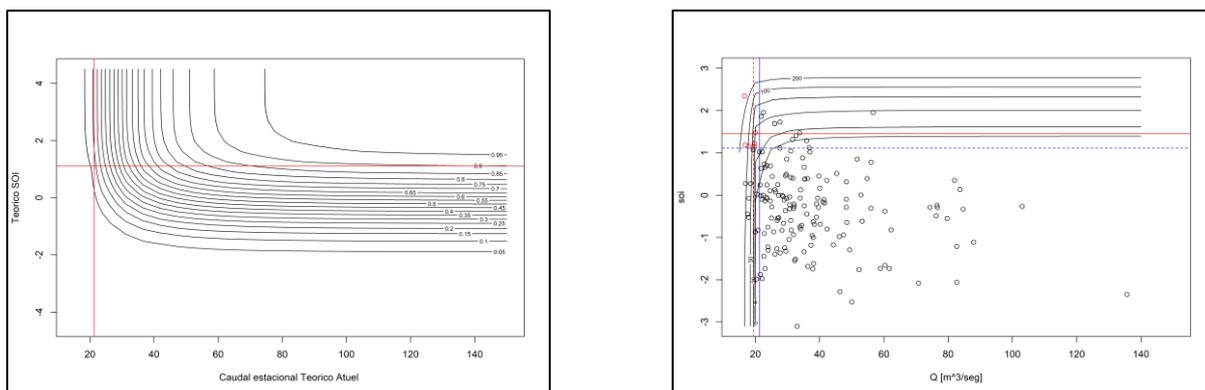
Considerando el algoritmo desarrollado por Schepsmeier, et. al, (2017) para la obtención de una función multivariada, es decir una familia de cópula que modele la relación caudal-índice se obtiene que la que mejor representa dicha relación es la familia rotada de *Gumbel* con  $\theta = -1.24$ , parámetro asociado a dicha función. Es importante destacar que la familia de *Gumbel* resulta útil para el modelado de eventos extremos que queremos resaltar y la estimación de la probabilidad de ocurrencia de estos, ya que no todas las familias

logran ajustarse necesariamente en las colas de las distribuciones (Otani y Imai, 2018; Huynh et. al, 2014). Por otra parte, en la Figura 7 se muestra el diagrama de dispersión con la relación observada (puntos rojos), y la simulación de datos que se obtendrían de una función cópula rotada de Gumbel, y las funciones teóricas de distribuciones marginales propuestas anteriormente, cada una con sus respectivos parámetros (puntos negros); destacando una buena simulación de los datos con respecto a los empíricos.



**Figura 7.** Datos observados estacionales para el caudal en La Angostura y el índice SOI en puntos rojos, y la simulación del modelo teórico propuesto en puntos negros.

Además, también se muestra la función de densidad de probabilidad acumulada (Figura 8a) de la relación estudiada, y a partir de la cual se estimó la probabilidad que se tenía como uno de los objetivos. Es decir, el cálculo de la probabilidad, y más aún el periodo de retorno (Figura 8b) asociados a eventos extremos relacionados con eventos NIÑA y bajo caudal estacional en la estación de medición La Angostura. De esta manera, a partir del procedimiento anterior destacamos una probabilidad de ocurrencia de 0.03, teniendo asociado un periodo de retorno de 7.8 años. Es decir, en promedio ocurren eventos superiores al percentil 90 del índice y por debajo del percentil 10 del caudal estacional cada 7.8 años. Dentro de los eventos observados que cumplen las condiciones anteriores se enumeran a continuación con la ocurrencia temporal del índice (estación/año), y dos estaciones siguientes para el caudal, verano76 SOI - invierno76 caudal; verano99 SOI - invierno99 caudal; verano09 SOI - invierno09 caudal; verano11 SOI - invierno11 caudal; primavera11 SOI - otoño12 caudal; verano12 SOI - invierno12 caudal. Es importante destacar que las observaciones que cumplieron las condiciones propuestas están todas relacionadas con eventos NIÑA de intensidad leve a fuerte.



**Figura 8.** a) Función de densidad de probabilidad acumulada del modelo teórico, las líneas rojas representan el percentil 10 del caudal y el percentil 90 del índice. b) Diagrama de dispersión entre los pares de datos junto con el periodo de retorno asociado. En rojo se destacaron los eventos que estuvieron dentro del umbral propuesto en el trabajo.

Por otra parte, si las variables estudiadas (índice-caudal) fueran independientes los eventos extremos considerados tendrían asociado un periodo de retorno estimado de 25 años en promedio, pero ya hemos destacado a través de distintos procedimientos metodológicos la relación existente entre ambas.

#### 4 CONCLUSIONES

A través de la metodología propuesta se obtuvo una herramienta útil para pronosticar y prevenir eventos extremos de caudal estacional en la estación de medición La Angostura relacionados con eventos NIÑA a partir del monitoreo del índice SOI con 6 de antelación. Asimismo, el análisis propuesto permitió determinar periodos de retorno asociados a ciertos eventos extremos que ya han ocurrido en los años recientes.

Por otra parte, nuestro trabajo provee un análisis para estudiar en mayor profundidad la relación entre índices climáticos y el caudal, destacando la necesidad de estudiar la relación bivariada cuando la variable hidrológica presenta eventos extremos. Lo cual resulta útil para el monitoreo hidrológico- climático en la región considerada.

Finalmente, en proceso de análisis se encuentra el análisis con otras variabilidades climáticas y el estudio multivariado con el caudal del río Atuel a nivel estacional.

*Agradecimientos.* IFRH18, a la Subsecretaría de Recursos Hídricos y al proyecto CONICET PIP 112-201-301-00806

## 5 REFERENCIAS

- Araneo, D.C, Rivera, J.A., Villalba, R., 2015. Variabilidad intraestacional de las condiciones níveas en los Andes Centrales relacionadas con los cambios en el régimen hidrológico del río Atuel. *Acta Geológica Lilloana*. Vol. 27. 77-86.
- Compagnucci, R. H., Vargas W. M., 1998. Inter-annual variability of the Cuyo rivers' streamflow in the argentinean andean mountains and ENSO events. *International Journal of Climatology*. Vol. 18, pp. 1593-1609.
- Compagnucci, R.H, Blanco, S.A, Figliola, M.A, Jacovkis, P.M, 2000. Variability in subtropical Andean Argentinean Atuel river; a wavelet approach. *Environmetrics*. Vol. 11. 251-269.
- Fuller, W. A. (1996). *Introduction to Statistical Time Series*, second ed., New York: John Wiley and Sons.
- García, NO., Vargas, WM., 1998. The temporal climatic variability in the "Rio de la Plata" basin displayed by the rivers discharges. *Climatic Change*. Vol. 38, 359-379.
- Grinsted, A., Moore, J. and Jevrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*. Vol. 11, 561–566. Huynh et. al, 2014
- Maraun, D. and Kurths, J., 2004. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes in Geophysics*. Vol.11, 505-514.
- Meis, M., Llano, M.P., 2018. Hydrostatistical study of the Paraná and Uruguay Rivers. *International Journal of River Basin Management*. <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1446962>
- Otani, Y., Imai, J., 2018. An Empirical Analysis of the Dependence Structure of International Equity and Bond Markets Using Regime-switching Copula Model.
- Rivera, J., Penalba, O., Villalba, R., Araneo, D., 2017. Spatio-Temporal Patterns of the 2010-2015 Extreme Hydrological Drought across the Central Andes, Argentina. *Water*. Vol 9, 1-18.
- Schepsmeier, U., Stoeber, J. Brechmann, E.C., Graeler, B., Nagler, T., Erhardt, T., Almeida, C., Min, A., Czado, C., Hofmann, M., Killiches, M., Joe, H., Vatter, T., 2018. Statistical Inference of Vine Copulas. *cran.r-project*.
- Sklar, A. 1945. Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges., *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*. 8: 229–231.
- Phillips, P.C.B and P. Perron (1988), "Testing for a Unit Root in Time Series Regression", *Biometrika*, 75, 335–346