
PATRONES DE VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA EN LOS ANDES CENTRALES (30-37°S) DE ARGENTINA

**Carolina Lauro^{1*}, Alberto I.J. Vich^{1,2}, Juan A. Rivera¹, Sebastián Otta¹, Stella Maris
Moreiras^{1,3}, Luis Bastidas¹, Emilce Vaccarino¹**

¹Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales, CCT Mendoza-CONICET

²Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

³Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

*clauro@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Los procesos hidroclimáticos se caracterizan por presentar ciclos que se repiten con una determinada frecuencia. En particular, la precipitación y el caudal de las cuencas de los Andes Centrales presentan una gran variabilidad interanual y decenal. Entender el origen de dichos ciclos nos permite conocer la influencia de diversos fenómenos en los componentes del ciclo hidrológico para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

El objetivo del presente estudio es identificar el rol de algunos de los forzantes climáticos en los modos de variabilidad de la precipitación y de los caudales, durante los últimos 60 años de registros en las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Grande y Barrancas, pertenecientes al sistema hidrográfico del río Colorado. Para detectar intervalos de tiempo-frecuencia en que dos series de tiempo tienen fuerte interacción, se realizó un análisis de coherencia de ondas entre las variables hidroclimáticas y diversos índices climáticos.

En las series de precipitación y caudal de toda la región se encuentran correlaciones significativas entre con el índice oceánico de El Niño (ONI). Además, se identificaron ciclos de mayor intensidad en las bandas 2-8 años en el período comprendido entre 1970-2000, que explica la variabilidad de alta frecuencia en la precipitación y el caudal. En el caso de asociar las señales de baja frecuencia con el índice de la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO), se identificó una coherencia significativa con el caudal en períodos de 8-16 años. Al sur de los 35°S se identifica una relación inversa con el índice del Modo Anular del Sur (SAM).

Palabras claves: PERIODICIDAD, FORZANTES CLIMÁTICOS, PRECIPITACIÓN, CAUDAL, ARGENTINA.

ABSTRACT

Hydroclimatic processes are characterized by cycles that repeat with a certain frequency. In particular, precipitation and streamflow in the the Central Andes basins show a large interannual and decadal scale variability. Understanding the origin of these cycles allows us to identify the influence of ocean-atmosphere circulation on the components of the hydrological cycle to improve the management of water resources. The aim of this study is to identify the main climatic forcings associated with the modes of variability of precipitation and streamflows during the last 60 years in the main Central Andean rivers (San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Grande, and Barrancas basins). A coherence analysis between hydroclimatic variables and various climate indices facilitates the detection of those frequencies where the two time series interact. Significant correlations exist between the Oceanic Niño Index (ONI), precipitation, and streamflow. Higher intensity cycles were identified in the 2-8 year bands in the period between 1970-2000, which explains the high-frequency variability in precipitation and streamflow. The Pacific Decadal Oscillation (PDO) and streamflow in decadal periods show a significant coherence detected in the San Juan, Mendoza, and Atuel River basins, whereas, streamflow and precipitations records located south 35°S reveal a negative relation with the Southern Annular Mode (SAM) index.

Key words: PERIODICITY, CLIMATIC FORCING, PRECIPITATION, FLOW, ARGENTINA.

INTRODUCCIÓN

La interacción entre el sistema climático y el sistema hidrológico ocurre en un conjunto amplio de diversas escalas temporales y espaciales, desde la generación de crecidas repentinas que ocurren en el lapso de minutos afectando áreas limitadas a la ocurrencia de sequías que perduran por varios años y afectan amplias regiones. Por ello, el estudio de la dinámica conjunta de ambos sistemas permite mejorar la predicción de los eventos hidroclimáticos que generan impactos negativos a nivel socioeconómico.

La variabilidad del clima se refiere a las fluctuaciones en diversas escalas temporales que se dan en las condiciones medias y extremas de las variables hidroclimáticas obtenidas en un lugar o región, pudiendo atribuirse a procesos naturales o antrópicos (IPCC, 2021a; van der Wiel & Bintanja, 2021). Típicamente, estos procesos de variabilidad representan cambios periódicos o cuasi-periódicos dentro de una misma estación (interestacionales), de un año a otro (interanuales), o en escalas de décadas (interdecenales), asociados a estructuras recurrentes espacio-temporales de variabilidad en el sistema climático conocidas como modos de variabilidad, que resultan de procesos naturales de la variabilidad interna (Branstator y Selten, 2009; IPCC, 2021b; Norel et al., 2021). Mediante patrones de teleconexiones es posible que los cambios en estos modos de variabilidad

generen impactos en el clima de regiones remotas, con lo cual toma relevancia su análisis para estudios hidroclimáticos regionales. Comúnmente, se utilizan índices climáticos para representar el comportamiento de los modos de variabilidad, los cuales permiten simplificar los complejos patrones espacio-temporales de la circulación atmosférica (Bonfils & Santer, 2011). Estos índices climáticos representan las fases o estados de los modos de variabilidad, los cuales permiten relacionar los patrones de variabilidad climática con la ocurrencia de fases extremas de precipitación como puede ser: un período o año más lluvioso que lo normal, o menos lluvioso que lo normal y que origina los fenómenos hídricos como inundaciones o sequías, afectando la disponibilidad de los recursos hídricos de una región.

En la región de los Andes Centrales (30°-37°S) de Argentina, diversos componentes del ciclo hidrológico presentaron cambios de largo plazo en sus valores medios. La temperatura en la región se incrementó aproximadamente 1°C en los últimos 50 años (SAyDSN, 2015). El incremento gradual de la temperatura se acompaña con saltos significativos positivos, en su mayoría en la década de 1980 (Lauro et al., 2021). Por otro lado, la precipitación nival sobre la Cordillera de los Andes se redujo en los últimos 30 años (Rivera et al., 2021), mientras que las precipitaciones sobre las porciones bajas de las cuencas andinas han registrado incrementos en la época estival, con gran variabilidad interanual (Compagnucci et al., 2002; SAyDSN, 2015). En tanto, la disminución de las precipitaciones también se refleja en una reducción de los caudales, principalmente en cuencas localizadas al sur de los 35°S (Lauro et al., 2021).

En series temporales de precipitación y de caudales, se destacan ciclos de alta y baja frecuencia, correspondientes a períodos de 2-4 años y 16-32 años respectivamente (Lauro et al., 2021). La interacción océano-atmósfera, actuando como forzante de los sistemas hidrológicos como fuente de variabilidad en diferentes escalas temporales y espaciales, ha sido estudiada a nivel global (Poveda et al., 2002; Schulte et al., 2016; Gonzalez-Reyes et al., 2017) y en particular en la región de los Andes Centrales de Argentina (Masiokas et al., 2006; 2010; Rivera et al., 2017; Lauro et al., 2019).

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por su sigla en inglés) es uno de los impulsores más importantes de la variabilidad de año a año en los patrones climáticos globales. Consiste en un cambio tanto de la temperatura superficial del mar (TSM) como de los patrones atmosféricos del Océano Pacífico Tropical con una periodicidad de 2 a 7 años (Trenberth, 1997). En las cuencas de los Andes Centrales las fases cálidas (frías) provocan precipitaciones niveas por encima (debajo) de la media y consecuente aumento (disminución) del escurrimiento durante el período estival (Compagnucci & Vargas, 1998; Masiokas et al., 2006; Rivera et al., 2017; Lauro et al., 2019). Sin embargo, dada la complejidad del sistema acoplado océano-atmósfera, que genera diferentes características o "sabores" en los eventos El Niño y La Niña (Singh et al., 2011; Wiedermann et al., 2021), el ENSO

no repercute de la misma manera en las precipitaciones níveas de los Andes Centrales. Esto se debe a que existe una gran variedad de procesos físicos interactuando en un conjunto amplio de escalas espaciales y temporales, que modulan las precipitaciones y la hidrología regional.

La Oscilación Decenal del Pacífico (PDO, por su sigla en inglés) es un patrón de variabilidad climática del Pacífico que cambia de fase, generalmente en una escala de tiempo interdecenal de al menos 20 a 30 años (Mantua et al., 1997; Mantua & Hare, 2002). Los cambios de régimen de escurrimiento andino son consistentes con la PDO (Masiokas et al., 2006, 2010; Lauro et al., 2019), con mayores caudales durante la fase positiva de la PDO y menores caudales durante su fase negativa.

Otro de los forzantes climáticos que influye en los componentes del ciclo hidrológico de los Andes Centrales de Argentina es la Oscilación Antártica (OA) o Modo Anular del Sur (SAM, por su sigla en inglés), particularmente para las cuencas ubicadas al sur de los 35°S-36°S, donde se encuentra que la fase positiva (negativa) del SAM genera caudales por debajo (por encima) de lo normal (Rivera et al., 2018, Lauro et al., 2019). La OA o SAM es un patrón atmosférico a gran escala que influye en el clima en el hemisferio sur (Thompson & Wallace, 2000). La fase positiva se caracteriza por una contracción y desplazamiento hacia el sur del cinturón de vientos del oeste, lo que inhibe el ingreso de los sistemas de baja presión que generan precipitaciones invernales y en consecuencia provoca una disminución de la precipitación al sur de los 35°S. Como consecuencia de la reducción de la capa de ozono y del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, este modo de variabilidad exhibe una tendencia hacia una mayor frecuencia de fases positivas desde la década de 1970 (Fogt & Marshall, 2020; Screen et al., 2018), lo cual se asocia a una tendencia decreciente en los caudales de los ríos con nacientes al sur de los 35°S (Rivera et al., 2018).

La acción de estos procesos de variabilidad interna en diferentes escalas temporales, sumado a un contexto de cambio climático asociado a las actividades humanas que generan incrementos en las emisiones de gases de efecto invernadero, muestra que la disponibilidad de los recursos hídricos de la región se encuentra en constante cambio, lo cual complejiza la planificación a largo plazo de los mismos, siendo necesario el estudio continuo del sistema hidroclimático.

Si bien varios estudios documentan la relación entre ENSO, PDO y en menor medida la OA con las precipitaciones y caudales en las cuencas de Andes Centrales de Argentina (Masiokas et al., 2006, 2010; Rivera et al., 2018; Lauro et al., 2019), resta aún hacer énfasis en el impacto de los forzantes climáticos en los patrones de variación de los componentes del ciclo hidrológico en esta región. Esto permitirá mejorar la predicción del caudal en cada una de las cuencas del centro oeste argentino, de manera tal de poder atender las demandas hídricas de cada oasis productivo.

Por lo tanto, se plantea como objetivo del presente estudio cuantificar el rol del ENSO, la PDO y el SAM en los patrones de variabilidad de las series temporales de precipitación y caudales medios

anuales para los últimos 60 años de registros en las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Grande y Barrancas, pertenecientes al sistema hidrográfico del río Colorado.

AREA DE ESTUDIO

Las cuencas de los Andes Centrales de Argentina entre los 28-37°S y 70°-69°O, cuyas cabeceras se localizan en la Cordillera de los Andes (Figura 1), se encuentran bajo un mismo régimen climático del tipo mediterráneo. Las masas de aire provenientes del océano Pacífico proporcionan las precipitaciones niveas durante el invierno, las que conformarán el escurrimiento de los principales ríos durante el período estival. El avance hacia el norte de los sistemas de baja presión que generan precipitaciones en la región se encuentra modulado por la posición del anticiclón del Pacífico sur, que durante el período invernal se traslada hacia latitudes más bajas permitiendo el ingreso de humedad (Rivera et al., 2018).

En estas cuencas la precipitación muestra una fuerte estacionalidad, donde más del 60 % de la precipitación ocurre durante los meses de mayo a agosto, la precipitación anual presenta un rango de 34 a 502 mm, siendo estos valores representativos de las cuencas del río San Juan y Diamante respectivamente (Tabla 1). El régimen de caudales también presenta una fuerte estacionalidad, ocurriendo los caudales máximos durante el verano austral conforme el incremento de la temperatura da inicio al período de fusión nival, mientras que los caudales mínimos ocurren durante el invierno. En la región el caudal medio anual presenta un rango 7,73 a 104,33 m³/s siendo estos valores representativos del río Barrancas y del río Grande respectivamente (Tabla 1).

Cuenca	San Juan	Mendoza	Tunuyán	Diamante	Atuel	Grande	Barrancas
Estación aforo (sigla)	Km-101 (SJ1)	Guido (MEG)	Valle de Uco (TVU)	La Jaula (DLJ)	La Angostura (ALA)	La Gotera (GLG)	Barrancas (BAR)
Registro	1971-2018	1960-2018	1960-2018	1971-2018	1960-2018	1971-2018	1960-2018
Precipitación (mm)							
Media	33,8	352,1	442,9	502,1	459,8	495,6	374,7
Máximo	86,4	771,1	1048,8	934,3	841,4	886,0	640,8
Mínimo	3,7	140,1	169,1	242,9	198,8	167,0	146,3
Desvío estándar	20,4	132,1	163,8	165,3	147,3	154,7	103,7

Coeficiente de variación (%)	60,1	37,5	37,0	32,9	32,0	31,2	27,7
Caudal (m ³ /s)							
Media	59,99	45,36	28,08	32,54	34,92	104,33	7,73
Máximo	151,72	93,95	54,24	72,69	69,50	202,47	8,37
Mínimo	19,98	23,43	15,41	16,73	19,04	41,58	6,79
Desvío estándar	31,56	15,45	9,02	11,52	9,86	40,14	0,39
Coeficiente de variación (%)	52,60	34,06	32,14	35,41	28,23	38,47	5,04

Tabla 1: Valores medios anuales para el período de registro de cada variable por cuenca. Los datos de precipitación pertenecen a la base de datos Climate Research Unit (CRU TS4.03; Harris et al., 2014) y los datos de caudal a la Secretaría de Políticas Hídricas de la Nación. Extraído de Lauro et al (2021).

El escurrimiento superficial proveniente de los ríos de la región de estas cuencas son la principal fuente de agua que abastecen los oasis productivos, donde se concentra la mayoría de la población y se desarrollan las actividades económicas: agricultura bajo riego, agroindustria e industria energética.

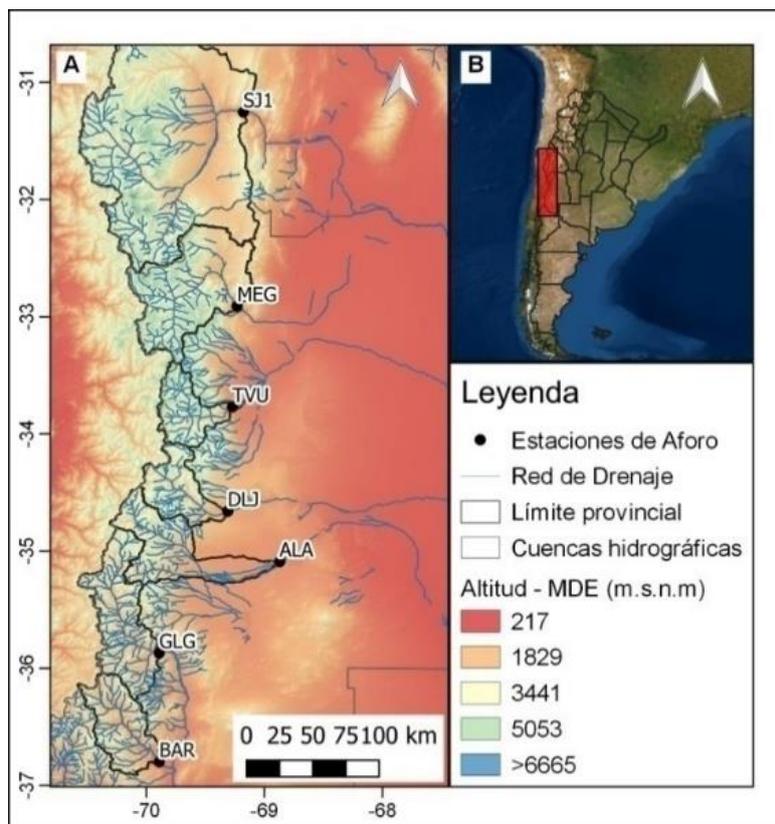


Figura 1: Localización del área de Estudio. Cuencas consideradas para el análisis con sus correspondientes puntos de aforo. SJ1: Cuenca del río San Juan. MEG: cuenca del río Mendoza. TVU: cuenca del río Tunuyán. DLJ: Cuenca del río Diamante. ALA: cuenca del río Atuel. GLG: cuenca del río Grande. BAR: cuenca del río Barrancas.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Datos hidroclimáticos

Las series de precipitación media anual se construyeron con información de la base de datos grillados de precipitación del Climate Research Unit (CRU) TS4.03 (Harris et al., 2014), con resolución espacial de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. Se realizó un promedio ponderado entre el valor de la variable climática y la superficie de la celda comprendida dentro de los límites de la cuenca (Figura 1) para el período coincidente con los registros de caudal.

Las series de caudal medio anual para los períodos de análisis 1960-2018 (ríos Mendoza, Tunuyán, Atuel, Barrancas) y 1971-2018 (ríos San Juan, Diamante, Grande) se construyeron a partir de registros instrumentales de caudales medios diarios en cada una de las cuencas de la base de datos de la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas de la Nación.

Los datos de caudal medio diario fueron rellenados según los métodos estadísticos explicados en Lauro et al. (2016). Además, se verificó la normalidad, aleatoriedad e independencia de las series anuales de precipitación y caudales, los test empleados se detallan en Lauro et al. (2016).

Índices climáticos

Para evaluar las relaciones entre la precipitación, el caudal y los forzantes climáticos de gran escala que afectan la región se consideraron los siguientes índices:

El índice ONI es el promedio móvil de tres meses de anomalías de TSM en la región Niño 3.4 (5°N - 5°S , 120 - 170°W), basado en múltiples períodos base cambiantes centrados de 30 años. Entonces, los valores ONI durante 1950-1955 se basan en el período base 1936-1965, los valores ONI durante 1956-1960 se basan en el período base 1941-1970, y así sucesivamente. El índice fue obtenido de la página de Centro de Predicciones Climáticas (Climate Prediction Center, en inglés) de la NOAA. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

El índice PDO es el resultado de un análisis de funciones empíricas ortogonales correspondiente a valores estandarizados de la primera componente principal de las anomalías de TSM en el Océano Pacífico al Norte de los 20°N . Este índice fue obtenido del Instituto de Estudios Conjuntos de la Atmósfera y el Océano (Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean). http://research.jisao.washington.edu/data_sets/pdo/

El índice SAM es el resultado de la diferencia del promedio zonal normalizado de presiones a nivel del mar entre 40°S y 65°S . Se utilizó el índice calculado por Marshall (2003), quien utiliza datos instrumentales. <http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>

Métodos

En principio, para las series de precipitación y caudal, se describieron los patrones interanuales considerando las anomalías estandarizadas de cada serie. Para el cálculo de las anomalías se consideró el valor medio del período completo de registro. Para la descripción de patrones de largo plazo, se calculó una media móvil de 7 años para el promedio de las series de las siete cuencas analizadas.

Análisis de correlación

Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson entre los índices climáticos y las variables hidroclimáticas. Se determinó un nivel de confianza del 95%.

Coherencia de ondas

Para identificar intervalos de tiempo-frecuencia en que dos series de tiempo tienen fuerte interacción, se realizó un análisis de coherencia de ondas (WC; por sus siglas en inglés wavelet coherence). El concepto de coherencia de ondas es análogo a la coherencia de Fourier, brindando una cantidad entre 0 y 1 que indica la correlación cruzada entre dos series de tiempo en función de la frecuencia (Torrence & Compo, 1998). Resulta una medida de la intensidad de la covarianza de las dos series en el espacio tiempo-frecuencia, que distingue además la relación de fase entre ellas y la evolución temporal de la co-variación.

La definición de la coherencia se asemeja a la definición tradicional del coeficiente de correlación. La alta co-variabilidad entre las series implica valores de coherencia cercanos o iguales a 1, mientras que, si las series no presentan ningún tipo de sincronización, el valor de coherencia es cercano a 0. La relación de fase entre las series da información de la sincronía entre las fluctuaciones para una determinada frecuencia y tiempo (Grinsted et al., 2004). El nivel de significancia es estimado usando un test Monte Carlo con ruido rojo determinando la significancia estadística al 90%.

Información detallada del cálculo e interpretación de resultados derivados de la metodología de coherencia de ondas se puede encontrar en Torrence & Compo (1998) y Grinsted et al. (2004), entre otros trabajos.

Para el análisis de coherencia se empleó el paquete de R biwavelet (Gouhier, 2018). La función madre utilizada fue Morlet. Esta función es empleada comúnmente en estudios hidroclimáticos de la región (Labat, 2008; Agosta y Compagnucci 2012, Caragunis, 2018). Para considerar los errores en la estimación de los coeficientes en los extremos de las series temporales se construye el cono de influencia (Grinsted et al., 2004).

Previo al análisis de coherencia de la PDO con las variables hidroclimáticas, se aplicó a las series de precipitación, caudal y PDO una media móvil centrada de 9 años para eliminar la variabilidad interanual.

RESULTADOS

Descripción de patrones de variabilidad de las series hidroclimáticas e índices climáticos

Para las siete cuencas analizadas la variabilidad interanual presenta un mismo patrón tanto de las series de precipitaciones como para las series de caudales dando lugar a años húmedos y secos (Figura 2 y 3). Entre los años en los que las anomalías estandarizadas son positivas se destacan: 1972, 1982, 1986/7, 1991/93, 1997, 2000/02, 2005, 2008, 2016. El año con mayor anomalía positiva de precipitación (Figura 2) fue 1987, en particular sobre la cuenca del río San Juan. En el caso de los caudales (Figura 3) el de mayor anomalía fue en el año 1982 en las cuencas de los ríos Diamante y Atuel, donde se puede observar que, en años caracterizados por la ocurrencia de anomalías húmedas o secas de gran magnitud, existen diferencias importantes a nivel cuenca. Entre las anomalías negativas de precipitación (Figura 2) se destacan los años 1961, 1968, 1988, 1998, y con menor diferencia respecto del valor medio los años 2010 y 2018. En tanto, los años con las mayores anomalías negativas en los caudales (Figura 3) son: 1962, 1964, 1968/1970, 1976/77, 1996, 1998 y a partir del año 2010 se observan anomalías negativas.

También se puede observar una variabilidad de baja frecuencia examinando la media móvil de 7 años. Se observan períodos consecutivos de aproximadamente 10 años con precipitaciones y caudales por encima o debajo de su valor medio. Se destaca la presencia de un período seco entre 1965-1977, pasando a un período húmedo entre 1977-1990. La década entre 1991-2000 se presenta con valores próximos a la media. En tanto, el período entre 2001-2009 se presenta con características más húmedas, mientras que el período reciente 2010-2018 se presenta con valores por debajo de la media. Si bien a nivel regional existe un comportamiento homogéneo, existen algunas diferencias entre las cuencas producto de los diversos procesos incluidos en el origen del escurrimiento, que involucran además cambios en las anomalías de temperatura y cuestiones vinculadas a la geomorfología de las cuencas.

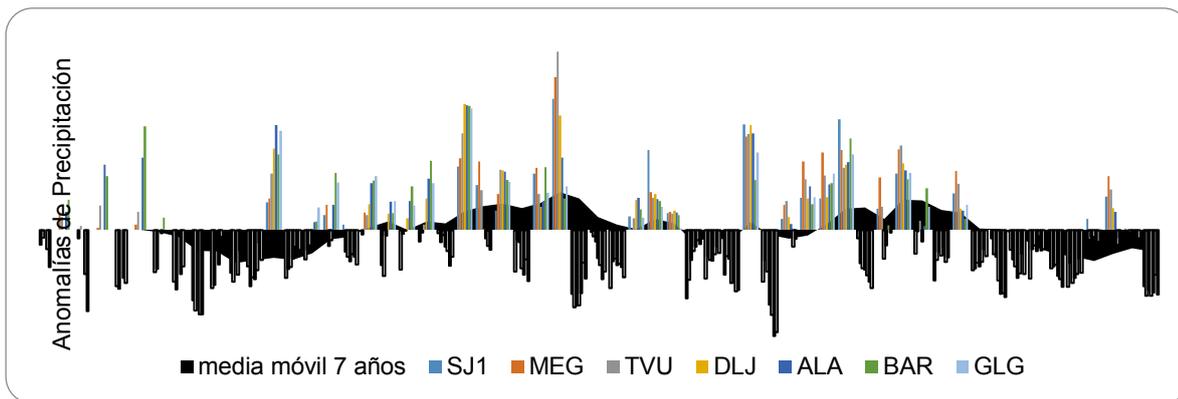


Figura 2: Anomalías estandarizadas de precipitación para las siete cuencas analizadas. Media móvil de 7 años de las anomalías estandarizadas promediadas para las siete cuencas.

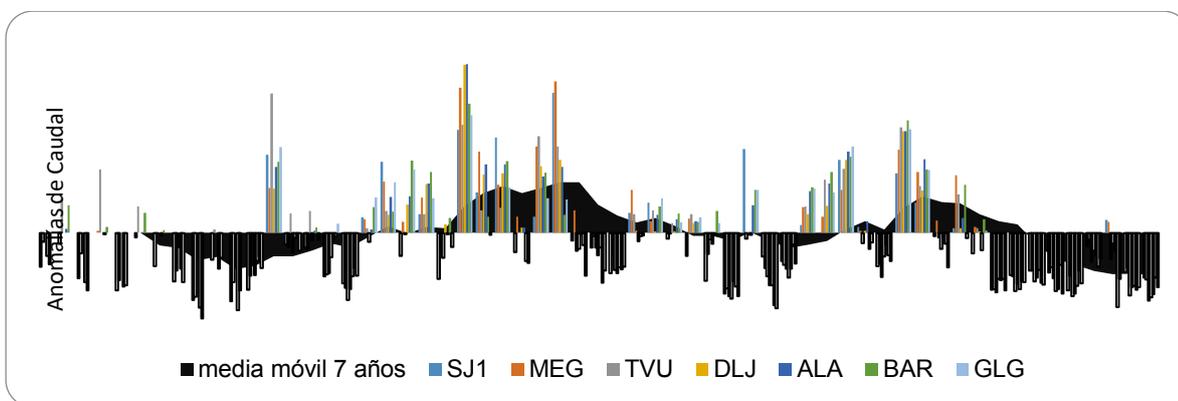


Figura 3: Anomalías estandarizadas de caudal para las siete cuencas analizadas. Media móvil de 7 años de las anomalías estandarizadas promediadas para las siete cuencas.

Se evaluaron las características de los índices climáticos seleccionados, a fin de describir la variabilidad predominante en los mismos, considerando el período 1960-2018. El índice de la PDO presenta valores negativos entre 1961-1976, 1990-1992, 1998-2002, 2007-2017, mientras que los períodos con valores positivos son 1976-1989, 1992-1998, 2002-2006 y 2014-2018. El análisis de ondas indica una frecuencia de 8-16 años con mayor intensidad y persistencia a partir de la década de 1990, también se observan ciclos de 4-8 años de menor intensidad en la década 1990-2000. El ONI presenta el ciclo de mayor intensidad con períodos de 4 años entre 1980-1990. El índice SAM presenta una tendencia significativa positiva producto de un cambio de fase a valores positivos desde 1997 al 2018. Por su parte, el análisis de ondas indica una frecuencia significativa de 4-8 años entre 1990-2000. En la figura 4 se pueden observar las series temporales y el análisis de onda para cada índice.

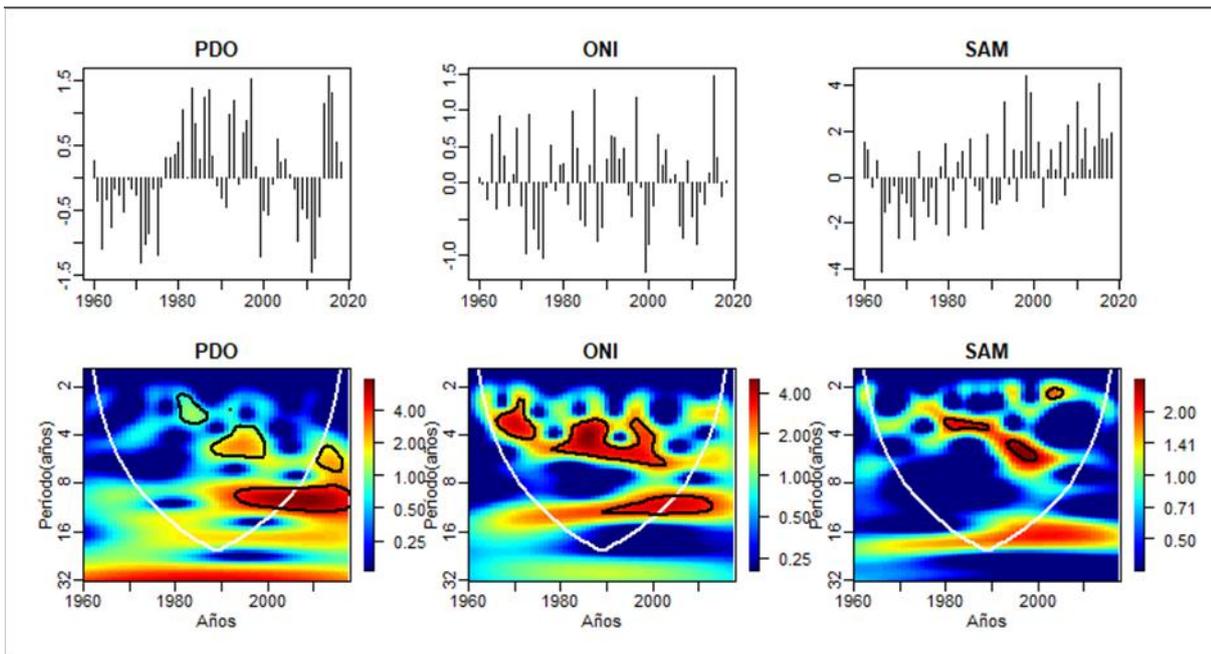


Figura 4: Variabilidad de los índices climáticos. Arriba: variabilidad interanual. Abajo: espectros de potencia donde se ilustran las periodicidades. El eje vertical muestra los periodos (ciclos) en años y el eje horizontal los años en los que se presentan los ciclos; las líneas negras indican ciclos significativos al 90% contra el ruido rojo AR (1). Los colores cálidos indican que los periodos (ciclos) poseen una mayor intensidad caso contrario para los colores fríos. El cono de influencia (área por debajo de la línea blanca) indica la zona donde los efectos de borde son importantes.

Relación de los índices climáticos con la variabilidad hidroclimática

Análisis de correlación entre índices climáticos y variables hidroclimáticas

A partir del análisis de correlación se encuentra que los valores positivos del ONI se asocian a incrementos de la precipitación y el caudal en todas las cuencas analizadas, con coeficientes de correlación significativos entre $r=0,33$ y $r=0,52$ (Tabla 2). Las correlaciones entre los caudales y las precipitaciones con el índice que describe el comportamiento de la PDO, presentan valores positivos en todas las cuencas, esto indica que la fase positiva del índice PDO se asocia con incremento de las precipitaciones y el caudal. Dado que el índice PDO representa un proceso de variabilidad de baja frecuencia, presenta autocorrelación, esto origina que el número de observaciones independientes sea menor, por consiguiente, afecta el nivel de significancia de la prueba de hipótesis de correlación y debe ser corregido a un número efectivo de observaciones considerando el coeficiente de autocorrelación de primer orden. A partir de dicha corrección las relaciones entre la PDO y las variables hidroclimáticas no resultan significativas. Con el índice SAM, únicamente se encontró una relación inversa significativa con la precipitación y el caudal en la cuenca del río Grande con un coeficiente de $r=-0,35$ para la precipitación y $r=-0,33$ para el caudal. Al remover las tendencias de las series de precipitación y caudal de la cuenca del río Grande y del índice SAM, los coeficientes de correlación no resultan significativos, en tanto, los coeficientes de correlación con el

ENSO se incrementan, indicando que la variabilidad interanual en la cuenca del río Grande está vinculada a las variaciones de temperatura en el sector Niño 3.4 del océano Pacífico Tropical.

Precipitación							
	SJ1	MEG	TVU	DLJ	GLG	ALA	BAR
PDO	0,29	0,30	0,29	0,22	0,06 (0,08)	0,15	0,09 (0,12)
ONI	0,45*	0,33*	0,41*	0,52*	0,39* (0,43*)	0,46*	0,40* (0,40*)
SAM	-0,08	0,13	0,09	-0,22	-0,35* (- 0,21)	-0,13	-0,22 (-0,14)
Caudal							
PDO	0,30	0,33	0,08	0,24	0,11 (0,14)	0,26	0,14
ONI	0,52*	0,39*	0,38*	0,42*	0,41* (0,46*)	0,33*	0,27*
SAM	-0,26	-0,04	-0,16	-0,25	-0,33* (-0,17)	-0,08	-0,13

Tabla 2: Coeficientes de correlación entre variables hidroclimáticas e índices climáticos. El asterisco indica correlación significativa para un nivel de confianza del 95%. Entre paréntesis se muestran los coeficientes de correlación con tendencia removida¹.

¹Únicamente presentan tendencia significativa las precipitaciones de GLG y BAR y el caudal de GLG. Extraído de Lauro et al., (2021).

Análisis de coherencia de ondas entre los índices oceánicos, la precipitación y el caudal

Respecto a la sincronía entre las variables hidroclimáticas y los índices oceánicos (Figura 5), el análisis entre el índice PDO y la precipitación muestra períodos de 4-8 años significativos y zonas de alto poder espectral en bandas decenales en tres cuencas. En tanto, con el caudal se identificó una coherencia significativa para ciclos de 16 años en cinco de las siete cuencas analizadas. Entre el índice ONI, la precipitación y el caudal la coherencia en las bandas de 2-8 años se expresa con mayor intensidad, lo cual, explica la variabilidad interanual de estas variables en todas las cuencas analizadas. Por su parte, no se encontraron resultados contundentes en la relación del índice SAM con las variables hidroclimáticas, por lo cual, estos resultados no son presentados.

A continuación, se describen los resultados encontrados para cada cuenca en particular.

En la cuenca del río San Juan, la relación entre la precipitación y el índice PDO resulta en una fase con mayor intensidad para períodos de 4-6 años entre 1990-2000, además se encuentra un período de 16 años significativo desde el comienzo de la serie hasta el año 2000 (Figura 5A). En tanto en el caudal el período de 16 años se extiende desde 1990 hasta el final de la serie analizada (Figura 5B). Con el índice ONI se encuentra una coherencia significativa para el período de 2 años en 1990-2000 con un adelantamiento del índice climático respecto de la precipitación y también una relación en fase para períodos de 4-6 años entre 1980-1995 (Figura 5C). Con el caudal también se encuentra un período de 4-6 años en fase, pero con un adelantamiento del índice respecto del caudal (Figura 5D).

En la cuenca del río Mendoza la precipitación y el índice PDO presentan mayor coherencia para períodos de 4-6 años entre 1980 y 2000 aproximadamente, sin embargo, se observa una elevada potencia en la señal decenal, siendo esta señal significativa con el caudal para el período 1990-2018 (Figura 5E), con el caudal también se observa una señal para períodos de 16 años (Figura 5F) En el caso de la relación entre la precipitación y el índice ONI se encuentra mayor coherencia para períodos de 2-6 años en fase entre 1980-1990 (Figura 5G). La relación entre el caudal y el índice ONI muestra que a lo largo de la serie temporal la influencia de los eventos ENSO han sido variables, por lo que se encuentra coherencia en fase para períodos de 2-4 años en 1960-1970, pasando luego pasa a ciclos de entre 4-6 años en 1970-1980 y en la década de 1990 con períodos de 2-4 años (Figura 5H).

En la cuenca del río Tunuyán, la precipitación y el índice PDO presentan mayor coherencia para períodos 4-6 años en la década 1990 y elevada potencia en períodos decenales (Figura 5I). Con el caudal se observa coherencia significativa para períodos de 16 años (Figura 5J). La precipitación y el índice ONI muestran mayor coherencia para períodos de 2-4 años en fase en 1965-1975 y 1980-2000. Además, se encuentra elevada potencia para la relación de períodos de 4-8 años entre 1980-1990 (Figura 5K), esta última relación también se presenta en el caudal. Sin embargo, con el caudal también se observan períodos significativos de 2-4 años en la década del 1970 (Figura 5L).

En la cuenca del río Diamante, la precipitación con el índice PDO muestran mayor potencia en el período de 16 años a inicios de la serie. Sin embargo, este resultado se encuentra afectado por el cono de influencia producto de la longitud de la serie de datos (Figura 5M). Este mismo resultado se encuentra con el caudal siendo significativo en la década de 1990 (Figura 5N). La precipitación con el índice ONI presentan mayor coherencia para períodos de 2-4 y 4-6 años en fase entre 1980-1990. La misma relación se observa posteriormente en la década de 2000 (Figura 5O). En el caso del caudal se obtiene una relación similar, con mayor coherencia para períodos de 2-6 años entre 1980-2000 (Figura 5P).

En la cuenca del río Atuel, la relación entre la precipitación, el caudal y el índice PDO muestran una elevada potencia en períodos de 16 años, siendo significativa con el caudal a partir de de la década del 2000 (Figura 5Q y R). Con la precipitación y el índice ONI se observa una elevada potencia en fase para períodos de 2-4 años discontinuos entre 1975, 1985 y 1995. Asimismo, se observa una relación en fase para períodos de 4-6 años entre 1980-1990 (Figura 5S), que también se muestra en el caudal, con la particularidad de que el caudal presenta un retardo de un cuarto de período respecto el índice. Adicionalmente se observan períodos significativos de 2 años entre 1990-2000 (Figura 5T).

En la cuenca del río Grande, no se encuentran coherencias significativas entre las variables hidroclimáticas y la PDO (se omite representación gráfica). La precipitación con el índice ONI presentan una elevada potencia en períodos de 2 años a mediados de la década de 1980 y entre 1995 y 2000, también para períodos 4-6 años entre 1980-1990 (Figura 5U). En tanto, con el caudal y el ONI se observa una mayor coherencia para períodos de 8-16 años entre 1990-2000 (Figura 5V).

En la cuenca del río Barrancas la precipitación, el caudal y el índice PDO no presentan una coherencia significativa (se omite la representación gráfica). La relación de la precipitación con el índice ONI presenta una elevada potencia en períodos de 2 años en la década de 1960 y en el período 1995-2000 y también para períodos 4-6 años entre 1980-1990 en fase (Figura 5W). Con el caudal se encuentran períodos similares, con coherencia en fase para períodos de 2-4 años en la década de 1970 y de 4 años entre 1980-1990 (Figura 5X).

En la Figura 5 se muestran los diagramas de coherencia de ondas entre los índices climáticos, la precipitación y los índices climáticos y el caudal.. El eje vertical muestra los períodos (ciclos) en años y el eje horizontal los años en los que se presentan los ciclos; las líneas negras indican ciclos significativos al 90%. Los colores cálidos indican que los períodos (ciclos) poseen una mayor intensidad caso contrario para los colores fríos. El cono de influencia (sombra blanca) indica la zona donde los efectos de borde son importantes. Los vectores indican la relación de fase entre las variables: horizontales orientados a la derecha (izquierda) indican que las series se encuentran en fase (anti-fase), en tanto los vectores verticales hacia arriba (abajo) reflejan un retardo la variable hidroclimática (del índice climático).

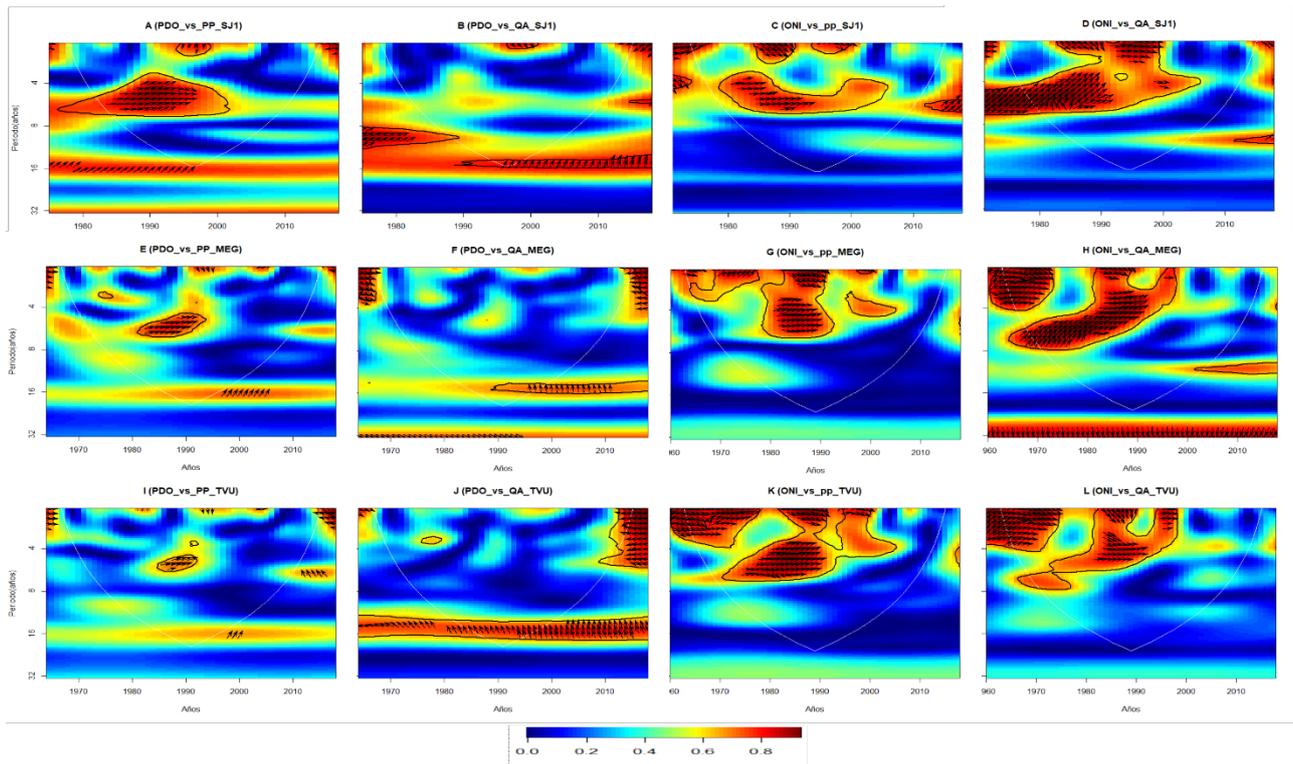


Figura 5: Diagramas de coherencia de ondas.

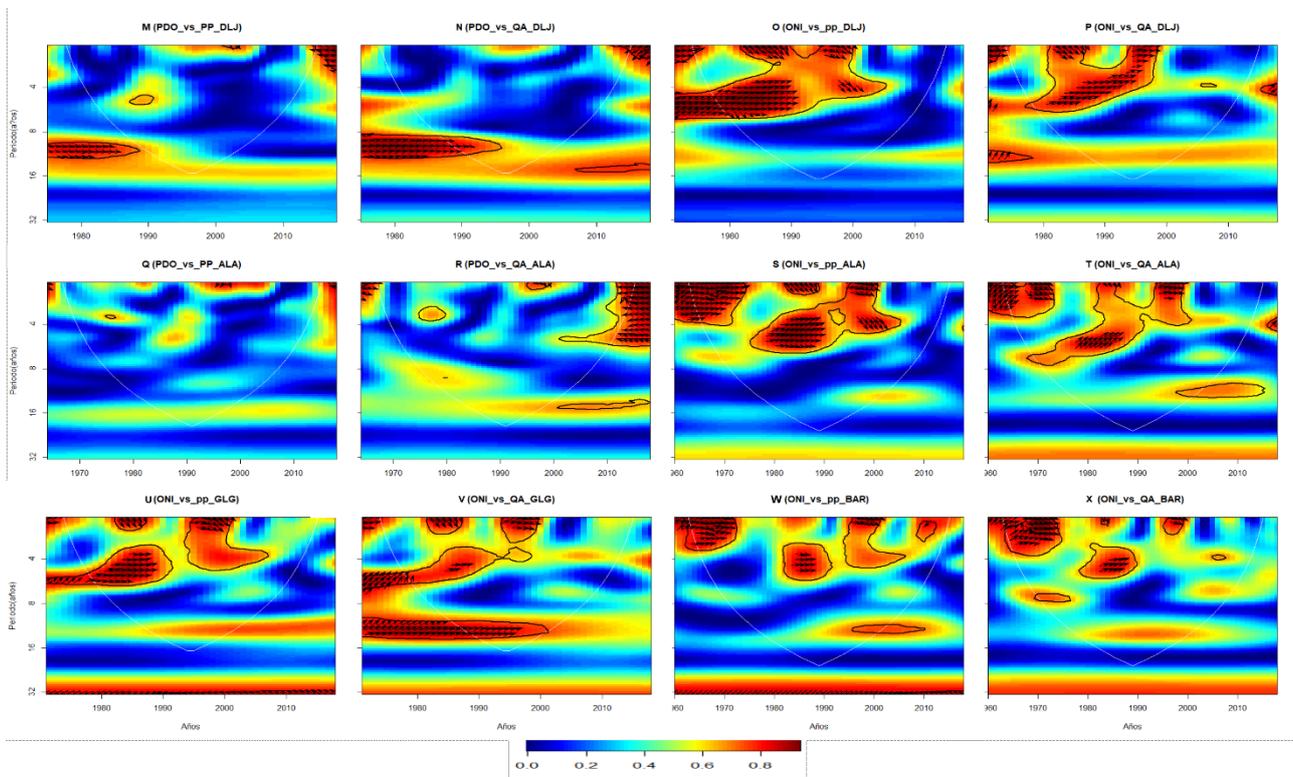


Figura 5 continuación: Diagrama de coherencia de ondas

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se estudia la influencia de algunos forzantes climáticos en la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y el caudal en las cuencas de la región centro oeste de Argentina entre los 28-37°S y 70°-69°O cuyas cabeceras se encuentran en la Cordillera de los Andes.

En la escala interanual se identificaron años con anomalías positivas en la precipitación y el caudal que responden a los eventos cálidos (El Niño) del fenómeno ENSO, en los cuales los años de mayores desvíos respecto a la media resultaron coincidentes con los eventos extremos El Niño de 1982/83, 1997/98 y 2015/2016 (Norel et al., 2021). Sin embargo, también se encontraron precipitaciones y caudales por encima de la media durante eventos fríos del fenómeno ENSO (La Niña) como ser en los años 2000 y 2008, aunque de magnitud reducida. En tanto, las anomalías negativas de precipitación y caudales coinciden en su mayoría con eventos de fase negativa o neutral del fenómeno ENSO. Estos resultados están en línea con lo documentado en publicaciones previas (Lauro et al., 2019; Masiokas et al., 2019) y destacan el rol del fenómeno ENSO como modulador de las precipitaciones y los caudales en escala interanual en el centro oeste de Argentina. Durante las décadas de 1980 y 1990 se presentaron 5 episodios de El Niño (1982/83, 1986/87, 1991-93, 1994/95 y 1997/98) y 4 episodios de La Niña (1984/85, 1988/89, 1995/96, 1998/99; CPC, 2022), lo cual se ve reflejado en las series de precipitación y caudal, las cuales

presentan ciclos en escala interanual con períodos entre 2-6 años y una variación conjunta de la precipitación y el caudal con ciclos de 2-8 años (Lauro et al., 2021). La relación encontrada con el índice ONI en períodos entre 4-8 años durante las décadas 1980 y 1990, explica parte del origen de la variabilidad interanual detectada en el análisis de onda por Lauro et al., (2021).

Mientras la relación del índice ONI se encuentra presente en toda la región y en las dos variables hidroclimáticas analizadas, el índice PDO presenta los coeficientes de correlación más altos con las precipitaciones y caudales en las cuencas ubicadas al norte de los 34°S. En contraste, Garreaud et al., (2009) encuentran relaciones entre la precipitación y el índice PDO en la vertiente chilena al sur de los 35°S, lo cual puede asociarse a la diferencia en el período de análisis y al desacople que existe entre la variabilidad decenal de los caudales de Cuyo y el índice PDO luego del cambio de fase de 1999/2000 (Rivera et al., 2017). Respecto del análisis de coherencia en las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza y Tunuyán, se observa relación con las series de precipitación para períodos de 4-8 años, infiriendo que la PDO modula el comportamiento interanual de la precipitación. En el caudal se encuentran zonas de alto poder espectral para períodos 8-16 años en diversas décadas dependiendo de la cuenca analizada. Otros autores han reportado oscilaciones

de 20 años en consonancia con eventos ENSO (Compagnucci et al., 2000), en tanto, Gonzalez-Reyes et al. (2017), si bien encuentra un patrón de comportamiento decenal a multidecenal en la sub-región norte de los Andes mediterráneos (30-34°S), no encuentra resultados estadísticamente significativos entre la PDO y variables hidroclimáticas. Esto da cuenta que se requiere una mayor investigación respecto de los mecanismos de variabilidad decenal a multidecenal en las precipitaciones y el caudal de la región, dado que se ha identificado anteriormente que la precipitación y el caudal presentan cambios entre anomalías negativas y positivas cada 16-32 años (Lauro et al., 2021).

La influencia del modo anular del sur ha sido descripta entre los 37-54°S como modulador de los períodos húmedos y secos tanto en Argentina y Chile (Garreaud et al., 2009; Villalba et al., 2012, Aravena & Luckman 2009, Rivera et al., 2018). La tendencia hacia su fase positiva ha sido relacionada con forzantes del calentamiento global antropogénico, en particular la disminución del ozono estratosférico y el incremento de los gases de efecto invernadero (Fogt & Marshall, 2020). Se encontró que el caudal anual en la región de estudio presenta una relación inversa con el índice SAM, lo cual se asocia a un fortalecimiento del anticiclón semipermanente del Océano Pacífico sur y un desplazamiento hacia el sur de los *storm tracks*, que favorece el déficit en los caudales (Rivera et al., 2018). Sin embargo, esta relación no es significativa en el presente estudio. Además, no se encuentran períodos significativos con el análisis de coherencia de ondas, lo cual podría responder a que el mayor impacto de este modo de variabilidad se observa al sur de 37°S. Se considerará en futuros estudios discriminar la influencia del SAM en función de la fase prevaleciente del fenómeno ENSO, así como también discriminar la componente interanual de la tendencia multidecenal hacia una fase positiva en este modo.

CONCLUSIONES

Estos resultados brindan información para la comprensión de las relaciones entre algunos de los patrones globales y hemisféricos que originan la variabilidad hidroclimática en la región de los Andes Centrales de Argentina.

La precipitación y el caudal de los últimos 60 años presentan fluctuaciones en sus valores medios en escala interanual y decenal. Estas fluctuaciones se presentan con diversas intensidades y frecuencias a lo largo del período de análisis.

Los patrones de variabilidad de alta frecuencia con ciclos de 4-8 años durante 1980-1990, se asocian al ENSO en toda la región. La PDO muestra coeficientes de correlación con la precipitación y el caudal de las cuencas localizadas al norte de los 34°S. Sin embargo, dada la longitud de las series la relación lineal encontrada no es significativa. En tanto, se identificaron períodos decenales

significativos entre la PDO y el caudal. El modo anular del sur presenta una relación inversa con las variables hidroclimáticas, sin embargo, no resulta significativa en la región analizada.

Dado que la disponibilidad hídrica superficial es diferente en cada una de las cuencas de la región de los Andes Centrales, como así también son las demandas de los recursos hídricos, es necesario conocer los modos de variabilidad hidroclimática en cada una de las cuencas para la predicción y planificación a largo plazo de los recursos hídricos en el centro oeste argentino.

Agradecimientos

Este trabajo posee financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) mediante el proyecto PICT 2019-03430.

BIBLIOGRAFÍA

Agosta, E., & Compagnucci, R.H. (2012). Central-West Argentina Summer Precipitation Variability and Atmospheric Teleconnections. *American Meteorological Society, Journal of Climate*; 25; 5; 3; 1657-1677.

Bonfils, C., & Santer, B.D. (2011). Investigating the possibility of a human component in various pacific decadal oscillation indices. *Clim. Dyn.* 37, 1457–1468 <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0920-1>

Branstator, G., & Selten, F. (2009). “Modes of Variability” and Climate Change, *Journal of Climate*, 22(10), 2639-2658.DOI: 10.1175/2008JCLI2517.1

Caragunis, J.I. (2018). Variabilidad de baja frecuencia en los caudales de los ríos del centro-norte de la Argentina. Aplicación en el análisis de sequías hidrológicas. Tesis de Licenciatura en Cs. de la Atmósfera. UBA.

Compagnucci, R.H. & Vargas, W.M., (1998). Interannual variability of Cuyo rivers streamflow in Argentinean Andean mountains and ENSO events. *International Journal of Climatology*, 18, 1593–1609.

Compagnucci, R., Blanco, S., Figliola, A., & Jacovkis, P. (2000). Variability in subtropical Andean Argentinean Atuel River; a wavelet approach. *Environmetrics*, 11, 251-269.

CPC, consultado junio 2021.
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Fogt, R.L., & Marshall, G.J. (2020) The Southern Annular Mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. *WIREs Clim Change*. 11:e652.
<https://doi.org/10.1002/wcc.652>

Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R. & Marengo, J. (2009): Present day South American climate. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 281, 180–195, doi:10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

González-Reyes, Á., McPhee, J., Christie, D., Le Quesne, C., Szejner, P., Masiokas, M., Villalba, R., Muñoz, A., & Crespo, S. (2017). Spatiotemporal variations in hydroclimate across the Mediterranean Andes (30°-37° S) since the early twentieth century. *Journal of Hydrometeorology* 18: 1929-1942. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0004.1>

Gouhier, T. C., Grinsted, A. & Simko, V. (2018). R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses (Version 0.20.17). Available from <https://github.com/tgouhier/biwavelet>

Grinsted, A., Moore, J. C. & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566.

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International journal of climatology*, 34, 623–642.

IPCC, 2021a. Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215–2256, doi:10.1017/9781009157896.022.

IPCC, 2021b. Annex IV: Modes of Variability [Cassou, C., A. Cherchi, Y. Kosaka (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2153–2192, doi:10.1017/9781009157896.018.

Labat, D. (2008). Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources*, 31, 109–117.

Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S.M. (2016). Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *Geoacta*, 40(2), 28-51.

Lauro, C., Vich, A. I., & Moreiras, S. M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina, *Hydrol. Sci. J.* 64(5), 607-619. doi: 10.1080/02626667.2019.1594820.

Lauro, C.; Vich, A. I.J.; Otta, S.; Moreiras, S.M.; Vaccarino, E.; & Bastidas, L. (2021). Recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de los Andes Centrales (28°-37°S) en contexto de variabilidad hidroclimática. *Boletín De Estudios Geográficos* 116 – Noviembre 2021 – Abril 2022. ISSN 0374-6186. E-ISSN: 2525-1813. PP. 45-71.

Mantua, N.J., et al., (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069–1079.

Mantua, N.J. & Hare, S.R., (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.

Marshall, G.J., (2003). Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16, 4134–4143. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<4134:Titsam>2.0.Co;2

Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C., & Aravena, J.C. (2006). Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J. Climate*, 19, 6334–6352, doi:10.1175/JCLI3969.1.

Masiokas, Villalba, R., Luckman, B. H., & S. Mauget, (2010). Intra- to multidecadal variations of snowpack and streamflow records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *J. Hydrometeor.*, 11, 822–831, doi:10.1175/2010JHM1191.1.

Masiokas, M.H., Cara, L., Villalba, R. Pitte, P., Luckman, B. H., Toum, E., Christie, D. A., Le Quesne C., & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Sci Rep* 9,17879 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>

Norel, M.; Kałczyński, M.; Pinskiwar, I.; Krawiec, K.; & Kundzewicz, Z.W. (2021). Climate Variability Indices. A Guided Tour. *Geosciences*, 11, 128. <https://doi.org/10.3390/geosciences11030128>.

Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Hoyos, C., Salazar, L., Mejía, J., Barco, O. & Correa, P. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana:

cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorol. Colomb.* 6:121-130. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

Rivera, J.A., Araneo, D.C., & Penalba, O.C., (2017). Threshold level approach for streamflow droughts analysis in the Central Andes of Argentina: A climatological assessment. *Hydrological Sciences Journal* 62(12): 1949-1964. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1367095>.

Rivera, J.A., Araneo, D.C., Penalba, O.C., & Villalba, R. (2018). Regional aspects of streamflow droughts in the Andean rivers of Patagonia, Argentina. Links with large-scale climatic oscillations. *Hydrology Research* 49(1): 134-149. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.207>.

Rivera, J.A., Otta, S., Lauro, C. & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Front. Water* 3: 640544. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.640544>.

SAyDSN (2015). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDSN). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Schulte, J.A., Najjar, Raymond, G. & Ming Li. (2016). The influence of climate modes on streamflow in the Mid-Atlantic region of the United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5. 80–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.003>

Screen, J.A., Bracegirdle, T.J. & Simmonds, I. (2018). Polar Climate Change as Manifest in Atmospheric Circulation. *Curr. Clim. Change Rep* 4, 383–395 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0111-4>

Singh, A., Delcroix, T., & Cravatte, S. (2011). Contrasting the flavours of El Niño-Southern Oscillation using sea surface salinity observations, *Journal of Geophysical Research*, 116(C06016), doi:10.1029/2010jc006862.

Thompson, D. W. J., & Wallace, J. M. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13(5), 1000–1016. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C1000:AMITEC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C1000:AMITEC%3E2.0.CO;2)

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79:61-78.

Torrence, C. & Webster, P.J. (1999) Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System. *Journal of Climate*, 12, 2679-2690.

Trenberth, K.E., (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771–2777.

van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Commun. Earth Environ.* 2, 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00077-4>

Vera, C. & Osman, M. (2018). Activity of the Southern Annular Mode during 2015–2016 El Niño event and its impact on Southern Hemisphere climate anomalies. *Int. J. Clim.* <https://doi.org/10.1002/joc.5419>.

Villalba R, Lara A, Masiokas MH, Urrutia R, Luckman BH, Marshall GJ, Mundo I, Christie DA, Cook E, Neukom R, Allen K, Fenwick P, Boninsegna JA, Srur AM, Morales MS, Araneo D, Palmer JG, Cuq E, Aravena JC, Holz A, & LeQuesne C. (2012). Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience* 5: 793-798. <https://doi.org/10.1038/ngeo1613>.

Wiedermann, M., Siegmund, JF., Donges, JF, & Donner, RV. (2021) Differential Imprints of Distinct ENSO Flavors in Global Patterns of Very Low and High Seasonal Precipitation. *Front. Clim.* 3:618548. doi: 10.3389/fclim.2021.618548