

Recursos hídricos superficiales de la vertiente oriental de los Andes Centrales (28°-37°S) en contexto de variabilidad hidroclimática

Surface water resources in the eastern slope of the Central Andes (28°-37°S) in a context of hydroclimatic variability

 <https://doi.org/0000000000000000>

Carolina Lauro  orcid.org/0000-0001-7150-3885

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 clauro@mendoza-conicet.gob.ar

Alberto Ismael Juan Vich  orcid.org/0000-0002-0477-2476

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
 aivich@mendoza-conicet.gob.ar

Sebastián Alfredo Otta  orcid.org/0000-0003-4189-9406

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 sotta@mendoza-conicet.gob.ar

Stella Maris Moreiras  orcid.org/0000-0001-6462-6684

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina

Emilce Liliana Belén Vaccarino Pascuali  orcid.org/0000-0003-0443-9961

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 evaccarino@mendoza-conicet.gob.ar

Luis Bernardo Bastidas Mejías  orcid.org/0000-0002-8570-9734

Instituto Argentino de Nivología Glaciología y Ciencias Ambientales
Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 lbastidas@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El estudio de la variabilidad hidroclimática de una región contribuye a mejorar la seguridad hídrica de las comunidades ya que brinda información para la gestión de los recursos hídricos. El objetivo es identificar los principales modos de variabilidad y la relación entre series temporales de precipitación, temperatura y caudales medios anuales para los últimos 60 años de algunas cuencas de la región de Cuyo. Se realizaron pruebas de tendencias, saltos y periodicidades. Los resultados, en líneas generales, muestran que las precipitaciones y los caudales tienden a disminuir y presentan ciclos significativos de alta y baja frecuencia. Por el contrario, la temperatura muestra una tendencia creciente asociada a incrementos en la década del 80, los períodos con mayor intensidad son los que se presentan en escala interanual. Estos resultados brindan información para la comprensión de las relaciones entre los patrones de variabilidad hidroclimática y los intercambios entre los diversos componentes del ciclo hidrológico en el centro oeste argentino, lo que permite mejorar la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVE: hidroclimatología, precipitaciones, temperatura, caudal, tendencias, saltos, periodicidades.

ABSTRACT

Explore the hydroclimatic variability of a region provides information for water resources management improving water security in the communities involved. The aim is to identify modes of variability and the relationship between time series of precipitation, temperature and annual mean flows for the last 60 years of some basins in the Cuyo region. Trend, jump and periodicity tests were carried out. The results, in general terms, show that rainfall and flows tend to decrease and present significant cycles of high and low frequency. On the contrary, the temperature shows an increasing trend associated with increases in the 80s, the periods with the greatest intensity are those presented on an inter-annual scale. These results provide information for understanding the relationships between the patterns of hydroclimatic variability and the exchanges between the various components of the hydrological cycle in Central-Western Argentina, which allows better decision-making.

KEYWORDS: hydroclimatology, precipitation, temperature, streamflow, trend, step change, periodicity.

INTRODUCCIÓN

Los cambios del clima en diversas escalas temporales repercuten en el ciclo hidrológico de los Andes Centrales. Los principales impactos descritos son: el retroceso de glaciares, la disminución de las precipitaciones nivas, cambios en el régimen de escurrimiento, cambios en la intensidad de eventos extremos, entre otros (Magrin et al., 2014). Ante estas evidencias, conocer la distribución temporal y espacial de los recursos hídricos y la cuantificación de los mismos resulta de vital importancia para la planificación a largo plazo.

Los cambios en los diversos componentes del ciclo hidrológico pueden alterar la disponibilidad hídrica para el desarrollo socio-económico de la región, comprometiendo su seguridad hídrica, entendida como la capacidad de las sociedades para lograr un manejo exitoso e integral de sus recursos y servicios hídricos (GWP, 2000).

Durante la última década las ciudades y oasis productivos de la región centro oeste de Argentina se encuentran en un contexto de crisis hídrica; producto de la escasez de precipitaciones nivas durante el período invernal (Rivera et al., 2021). Este fenómeno meteorológico se encuentra estrechamente relacionado con la variabilidad climática. El principal impulsor climático, que modula las precipitaciones invernales, es el fenómeno de El Niño/Oscilación del sur (ENSO, por su sigla en inglés; Compagnucci et al., 2000; Masiokas et al., 2006; Rivera et al., 2017). La variabilidad interanual de los caudales está asociada al fenómeno ENSO, en tanto, la variabilidad interdecenal está asociada a la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO, por su sigla en inglés; Compagnucci y Araneo 2007; Masiokas et al., 2010; Rivera et al., 2014, 2017; Gonzalez-Reyes et al., 2017; Lauro et al., 2016, 2019). Además, se encuentra la influencia de las anomalías de circulación Antártica sobre variables asociadas a los caudales de los ríos andinos localizados al sur de los 37°S (Lauro et al., 2019).

Las variables hidroclimáticas se caracterizan por presentar periodicidades, es decir, la presencia de ciclos que se repiten con una determinada frecuencia en las series temporales. Dichos ciclos han sido identificados en series de caudales, precipitación, temperatura, entre otras (Rajagopalan y Lall, 1998; Rao y Hamed, 2003). Los mismos representan la influencia de fenómenos naturales como los ciclos solares, el ENSO u oscilaciones bienales. Algunos estudios sugieren la relación entre los ciclos solares y

el escurrimiento debido a que se encontraron oscilaciones entre 11-13 años en los ríos San Juan, Atuel y Colorado. En tanto, la oscilación de 4-6 años fue asociada a eventos ENSO (Labat, 2008; Mauas et al., 2011; Compagnucci et al., 2013). En el río Atuel la señal de ENSO se observa en variabilidad interanual en las bandas 4-7 años y la variabilidad de orden decenal centrada en 20 años aproximadamente (Compagnucci et al., 2000).

En la región de los Andes Centrales los pronósticos prevén una disminución de las precipitaciones níveas en la zona de la montaña (Rivera y Arnould, 2020), un aumento de la precipitación en el llano durante el período estival (Otta et al., 2020), y un aumento de la temperatura (Zazulie et al., 2017). En este contexto de variabilidad, sumado a las crisis hídricas registradas en los últimos años, resulta estratégico evaluar la oferta (superficial y subterránea) y la demanda a futuro de los oasis irrigados para llevar adelante planes de acción apunten que a la conservación de los recursos hídricos en cada una de las cuencas de la región centro oeste de Argentina.

El presente estudio se enfoca en la oferta hídrica superficial y tiene como objetivo identificar los principales modos de variabilidad y la relación entre las series temporales de precipitación, temperatura y caudal, desde escalas interanuales a decenales durante el período 1960-2018 en las cuencas que integran el sistema del río Colorado de la zona centro Oeste de Argentina. La finalidad del estudio es proporcionar información de utilidad en la gestión de los recursos hídricos en particular para cada cuenca analizada.

Área de estudio

La región de estudio se localiza en el centro-oeste de Argentina, conformada por las cuencas de los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante, Atuel, Grande y Barrancas. Los cauces se extienden desde las altas cumbres de la cordillera de Los Andes hacia el este hasta el colector del río Desaguadero; este finalmente drena en el río Colorado (**Figura 1**). Estos ríos abastecen los principales oasis productivos de la región. El río San Juan abastece al Gran San Juan y los valles productivos Ullum,

Tulum y Zonda. En la provincia de Mendoza, el río Mendoza y el río Tunuyán inferior abastecen al oasis Norte, allí se concentra mayoritariamente la población de la provincia y se desarrollan las principales actividades industriales. El río Tunuyán superior abastece el oasis Centro de la provincia, y los ríos Diamante y Atuel abastecen el oasis Sur. El río Grande es el más caudaloso de la provincia, se une al río Barrancas, abastecen localidades rurales en la provincia de Mendoza. La confluencia de estos ríos da origen al río Colorado.

En la región de los Andes Centrales, se presentan dos sistemas de precipitación; uno estival influenciado por masas de aire continental (Compagnucci et al., 2002; Masiokas et al., 2006) localizado en las zonas de llanuras de las cuencas y un sistema invernal sobre la elevación más alta de Los Andes, producto de la interacción entre los flujos de humedad provenientes de los sistemas sinópticos de latitudes medias del Pacífico Sur, la topografía de Los Andes, la ocurrencia de bajas segregadas durante la estación fría (Garreaud y Fuenzalida, 2007) y el paso de frentes fríos (Seluchi et al., 2006). La precipitación media entre los 32 °S-36 °S y 69 °O-68 °O alcanza los 600 mm anuales (Viale et al., 2019), con máximos durante el período invernal (**Figura 2**). La mayor precipitación media anual se registra en la cuenca del río Tunuyán, mientras que los registros más bajos pertenecen a la cuenca del río San Juan (**Tabla 1**). La temperatura en la región es menor conforme aumenta la altitud de la cordillera y la latitud, con mínimas durante los meses de unio a agosto y máximas de diciembre a febrero (**Figura 2**). Los valores medios anuales de temperatura muestran que la menor y mayor temperatura son para las cuencas del río Tunuyán y Barrancas respectivamente (**Tabla 1**).

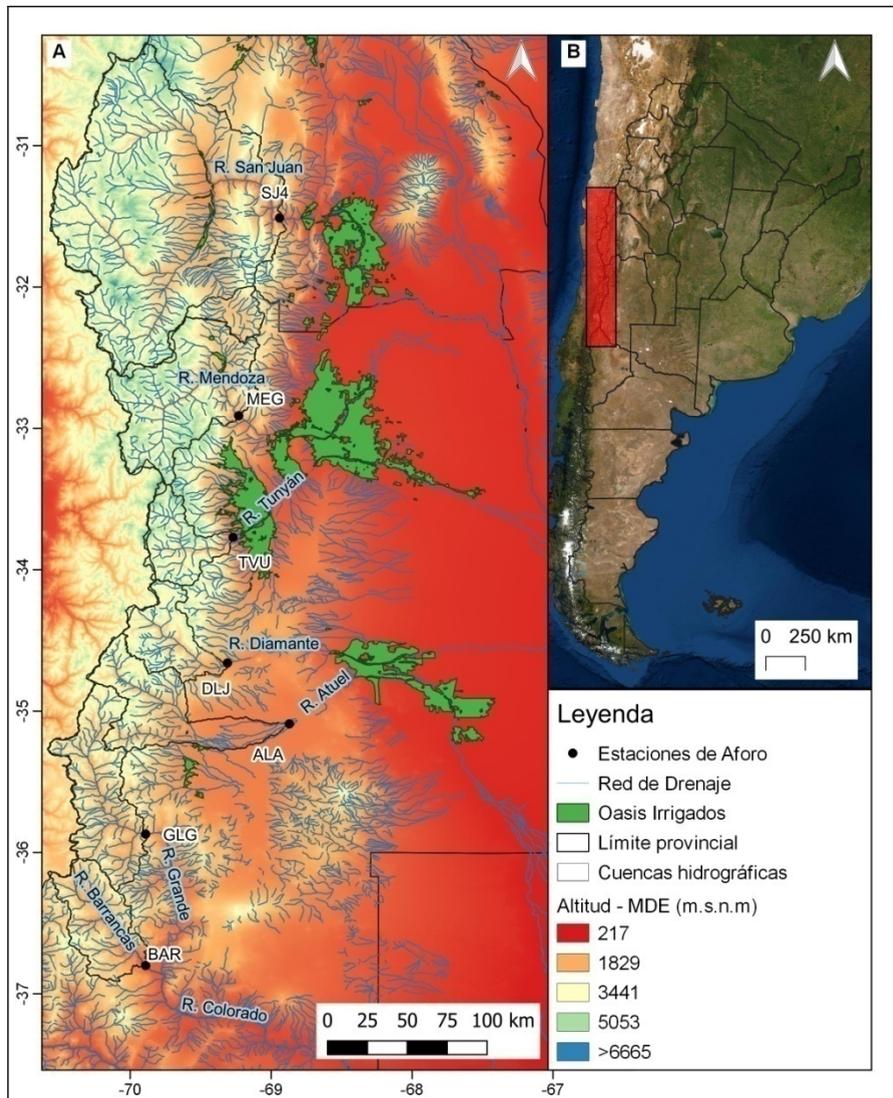


Figura 1: Localización de las cuencas que integran el sistema hidrográfico del río Colorado, las estaciones de aforo y principales oasis productivos. Ver siglas en **Tabla 1**. Elaboración propia.

Cuenca	San Juan	Mendoza	Tunuyán	Diamante	Atuel	Grande	Barrancas
Estación (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	243,4	352,1	442,9	502,1	459,8	495,6	374,7
Máximo	534,6	771,1	1048,8	934,3	841,4	886,0	640,8
Mínimo	90,14	140,1	169,1	242,9	198,8	167,0	146,3
Desvest	107,3	132,1	163,8	165,3	147,3	154,7	103,7
CV (%)	44,1	37,5	37,0	32,9	32,0	31,2	27,7
Temperatura (°C)							
Media	3,72	2,46	2,19	4,06	7,48	6,45	7,73
Máximo	4,84	3,17	2,96	4,80	8,24	7,05	8,37
Mínimo	2,91	1,56	1,18	3,01	6,46	5,42	6,79
Desvest	0,45	0,40	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39
CV (%)	12,08	16,47	18,92	10,19	5,39	6,18	5,04
Caudal (m³/s)							
Media	59,99	45,36	28,08	32,54	34,92	104,33	35,53
Máximo	151,72	93,95	54,24	72,69	69,50	202,47	66,87
Mínimo	19,98	23,43	15,41	16,73	19,04	41,58	14,70
Desvest	31,56	15,45	9,02	11,52	9,86	40,14	11,70
CV (%)	52,60	34,06	32,14	35,41	28,23	38,47	32,93

Tabla 1: Valores medios anuales para el período de registro de cada variable por cuenca. Los datos de Precipitación y temperatura pertenecen a la base de datos Climate Research Unit y los datos de caudal a la Secretaría de Políticas Hídricas de la Nación. Elaboración propia.

Las cuencas poseen un gradiente altitudinal de Oeste a Este con un rango de más de 6000 a 900 msnm y una importante superficie cubierta de glaciares en los sectores

de mayor altura. El régimen hidrológico es nivo-glaciario, el año hidrológico comienza en julio. La variación estacional del caudal es función de las variaciones estacionales de la precipitación, la temperatura y características topográficas de la cuenca. El caudal mínimo anual ocurre durante los meses de junio a agosto y los máximos anuales desde noviembre a febrero (Lauro et al., 2018). El mayor caudal medio anual se registra en la cuenca del río Grande y el menor en la cuenca del río Tunuyán (**Tabla 1**).

Las variables analizadas presentan variabilidad interanual, los coeficientes de variación son mayores para las variables precipitación (28 a 44%) y caudal (28 a 52%) siendo las dos variables mayores para la cuenca del río San Juan.

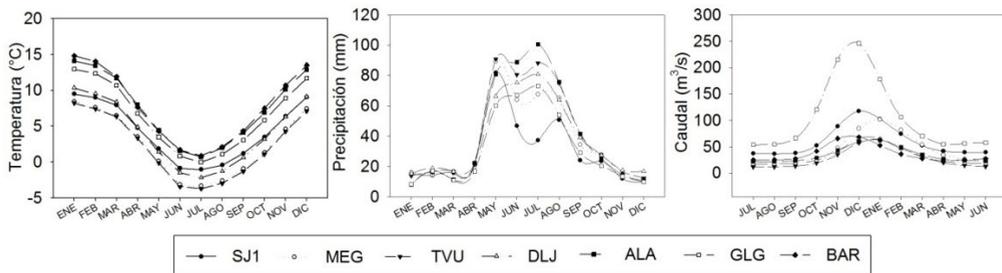


Figura 2: Marcha anual de la Temperatura, Precipitación y Caudal. Los gráficos de temperatura y precipitación se elaboraron partir de la base de datos *Climate Research Unit* para el período 1960-2018. Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

En la región los registros instrumentales de precipitación y temperatura no presentan la longitud y la calidad adecuada para realizar estudios climáticos. Por ello, se empleó la base de datos grillados de precipitación y temperatura del *Climate Research Unit* (CRU) TS4.03 (Harris et al., 2014), con resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Esta base de datos representa de forma adecuada las variaciones climáticas en la región de los Andes Centrales (Rusticucci et al., 2014). La correlación entre los datos grillados y datos instrumentales de precipitación y temperatura existentes en algunas cuencas resultan significativos (Lauro et al., 2021).

Dicha base de datos posee un registro desde el año 1900 hasta la actualidad. En el presente estudio se obtuvo la precipitación y temperatura media anual para el período coincidente con el registro de caudales en cada una de las cuencas (Ver período de registro en **Tabla 1**). 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.

De la base de datos de la Secretaría de Infraestructura y Políticas Hídricas de la Nación se obtuvieron registros instrumentales de caudales medios diarios en cada una de las cuencas, a partir de los cuales se construyeron las series de caudal medio anual para los períodos de análisis 1960-2018 y 1971-2018. Los puntos de aforo considerados se encuentran aguas arriba de las obras hidráulicas.

Los datos de caudal medio diario fueron rellenados según los métodos explicados en Lauro et al (2016). Además, se verificó la normalidad, aleatoriedad e independencia de las series anuales de temperatura, precipitación y caudales, los test empleados se detallan en Lauro et al. (2016). Los supuestos se evalúan dado que son condiciones requeridas en algunos de los test de tendencias y saltos.

Detección de tendencias y saltos

Para la detección de tendencias y saltos de las variables precipitación, temperatura y caudal medio anual se aplicaron test paramétricos y no paramétricos. Para la identificación de tendencia los test aplicados fueron: t student (Remington y Schork, 1974), Sperman Rank Order Correlation (Kundzewicz y Robson, 2000), Mann y Kendall (Hirsch et al., 1982; Westmacott y Burn, 1997) y sus correcciones por preblanqueo para series autocorrelacionadas (Yue et al., 2002) y por varianza (Hamed y Rao, 1998). Para la detección de saltos se aplicó la prueba estándar de homogeneidad normal (SNHT; Alexandersson, 1986), el test de Pettitt (Pettitt, 1979), el test de Buishand por rangos (Buishand, 1982), y el test de Buishand U (Buishand, 1984).

En todos los test se trabajó con $\alpha=0,05$. La sola indicación de no homogeneidad significativa de algún método, se toma como motivo de sospecha de cambios graduales o saltos.

Análisis de ondas

Se estudió la variabilidad periódica en las series temporales de precipitación, temperatura y caudal medio anual de cada cuenca mediante la transformada de onda continua (CWT; por sus siglas en inglés *continuous wavelet transform*). El análisis CWT permite analizar fenómenos periódicos de diferentes frecuencias, en series temporales no estacionarias. La CWT puede descomponer una señal y representarla en el dominio de frecuencia de tiempo, permitiendo observar el modo dominante de variabilidad y la forma en que estos modos varían en el tiempo (Torrence y Compo, 1998). La significancia estadística del espectro de potencia se prueba bajo la hipótesis nula que los datos del proceso de generación están dados por un proceso estacionario AR(0) o AR(1) para un espectro de fondo de una cierta potencia, en este caso, el espectro de la frecuencia media de Fourier.

Luego, para estudiar la variabilidad conjunta del caudal medio anual con la precipitación y temperatura en cada cuenca, se utilizó el análisis de coherencia de ondas (WC; por sus siglas en inglés *wavelet coherence*).

El análisis de coherencia de ondas tiene la capacidad de detectar los intervalos de tiempo-frecuencia en que dos series de tiempo tienen fuerte interacción. 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 y 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 WC cercanos o iguales a 1 mientras que si las series no presentan ningún tipo de sincronización el WC 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, ya sea en fase, anti-fase o rezago temporal (Gristed et al., 2004).

El nivel de significancia es estimado usando un test Monte Carlo con ruido rojo determinando la significancia estadística al 95% (Torrence y Webster, 1999).

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

Para los análisis de onda continua y coherencia de ondas 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).

RESULTADOS

Análisis de la tendencia y saltos

La variación interanual, las tendencias y los saltos abruptos para las series analizadas en cada una de las cuencas se muestran en la **Figura 3**.

En las cuencas de los ríos Grande y Barrancas se detecta tendencia significativa a la disminución de la precipitación con coeficientes de -3,61 y -2,36 mm/año respectivamente. Dicha tendencia en la cuenca del río Grande se acompaña de un salto significativo negativo en 1987. En las cuencas de los ríos Mendoza y Tunuyán se detectaron en ambos casos incrementos significativos de la precipitación mediante el análisis saltos en los años 1981 y 1976 respectivamente. En las demás cuencas no se encontraron cambios significativos.

Respecto a las series de temperatura todos los sitios presentan tendencias significativas positivas, a excepción de la cuenca del río San Juan que no presenta tendencia significativa, siendo el incremento promedio de la temperatura en la región de 0,01°C por año. El incremento gradual de la temperatura se acompaña con saltos significativos positivos en su mayoría en la década de 1980. Particularmente, en la cuenca San Juan y Mendoza en el año 1984, en Tunuyán en 1985, en Diamante, Atuel y Grande en el año 1988 y en Barrancas dos pruebas (test) indicaron el año 1976 mientras otros dos test indicaron el año 1984, siendo el salto del año 1976 el de mayor aumento.

La tendencia en las series de caudales medios anuales en la región resulta ser principalmente negativa siendo la del río Diamante y la del río Grande las únicas significativas a partir del análisis estadístico. En la cuenca del río Mendoza se detecta un salto positivo significativo en el año 1976 que ocasiona una tendencia positiva aunque no significativa. Si bien, se observa una disminución del caudal en el año 2008/2009 en la cuenca del río Mendoza (**Figura 3**) dicha disminución, en valor absoluto, es menor que el incremento que se produce en el salto de la década del 70. En las demás cuencas se detectan saltos significativos negativos: en 2009 para los ríos Tunuyán, Diamante, Grande y Barrancas, y en el año 2008 para el río Atuel. A diferencia de lo expresado para la cuenca del río Mendoza, en la cuenca del río Atuel el salto detectado en el año 2008 en términos absolutos es mayor respecto en salto de la década del 70 (Lauro et al., 2019). Es decir, que es mayor la disminución del caudal en los últimos diez años que el incremento que se produjo en la década del 70. La disminución del caudal de la región en la última década se corresponde con precipitaciones por debajo de la media y temperaturas por encima de la media. En líneas generales, la tendencia de la precipitación acompaña a la tendencia de los caudales, mientras que la situación inversa ocurre entre el caudal y la temperatura.

Análisis transformada de ondas continuas

Los resultados del análisis WTC se presentan en la **Figura 4**, donde el eje vertical muestra los ciclos en años presentes en la serie 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 ciclos (períodos) 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.

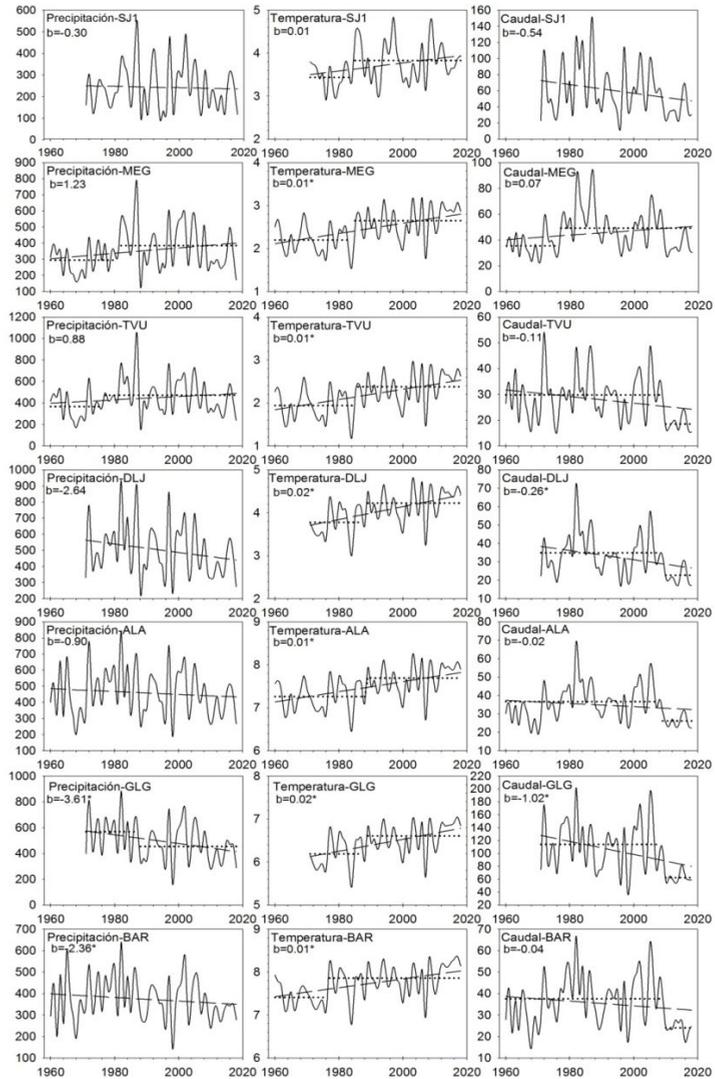


Figura 3: Series de precipitación (mm), temperatura (°C) y caudal (m³/s) para todas las cuencas analizadas. La línea de trazos muestra la tendencia lineal, se incluyó el coeficiente de tendencia (b) en las unidades de las variables, señalando con un asterisco los casos significativos. La línea de puntos indica los valores medios de la serie en los períodos previos y posteriores a los saltos significativos detectados. Elaboración propia.

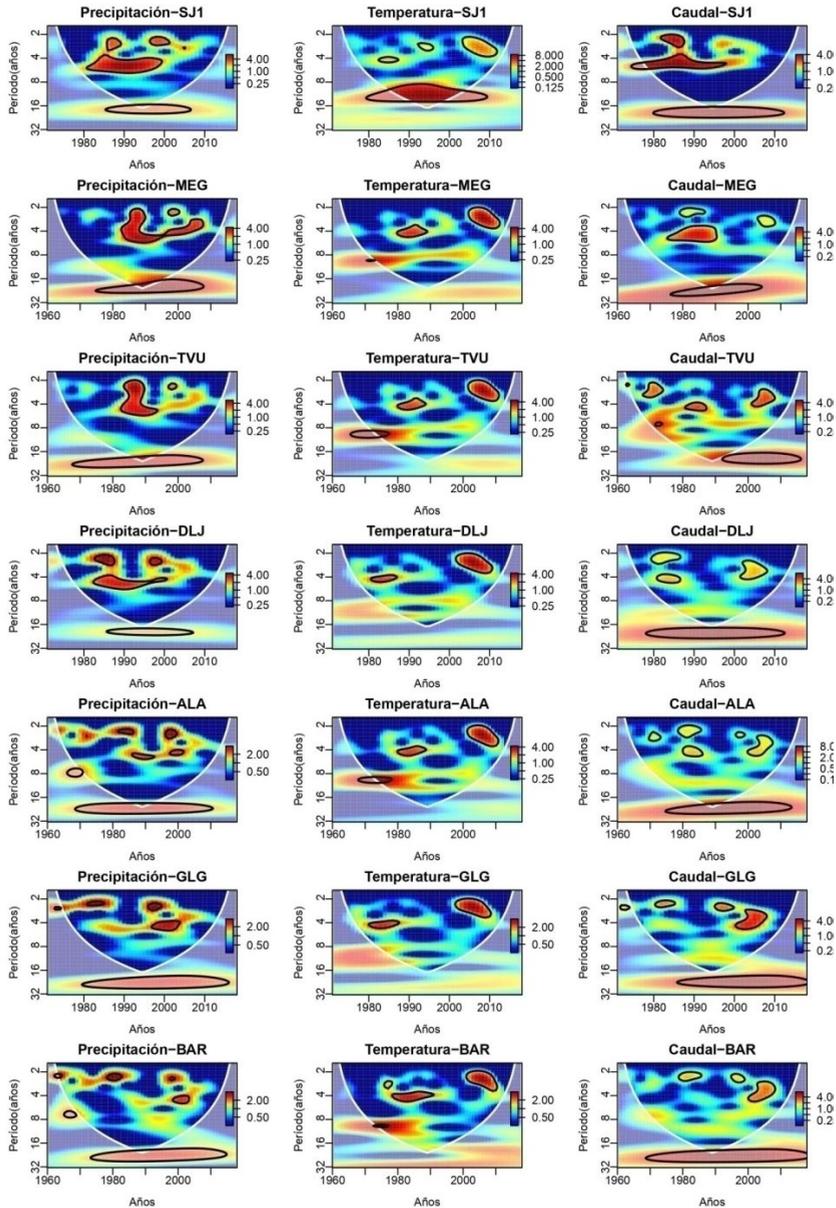


Figura 4: Análisis transformada de onda continua para las variables precipitación, temperatura y caudal. Elaboración propia.

En el análisis WTC realizado para la variable precipitación se observan patrones similares de norte a sur donde los ciclos en la banda 2-6 años en la década del 80, 90 y 2000 resultan significativos. Además se observan ciclos significativos en la banda 16-32 años aproximadamente desde las décadas 1970/80-2000/10. Particularmente, para la cuenca del río Atuel y Barrancas se observan ciclos significativos de 8 años en la década de 1970.

Para la variable temperatura todos los casos presentan una composición similar. En las cuencas TVU, ALA y BAR resulta significativo el período 8-16 años presentes entre la década del 1970-80, este período también es significativo en la cuenca del río San Juan pero se extiende a lo largo de toda la serie de datos analizada. En todos los casos en la década del 1980-90 se observan ciclos significativos en la banda de 4 años. Finalmente, en la década 2000-10 los períodos en la banda de 2-4 años resultan significativos y en líneas generales representan la mayor energía. En ningún caso resulta significativo períodos de baja frecuencia.

Para la variable caudal en la cuenca del río San Juan se observa un ciclo de 4-6 años desde 1975-2000, en las bandas 2-3 años entre 1980-90 y en la banda 16-32 años en el período 1980-2010. En la cuenca del río Mendoza entre 1980-90 las bandas 2 y 4-6 años son significativas, siendo la primera la de mayor energía. También se observa significativa la banda 2-4 años en 2000-10. La banda 16-32 años se muestra significativa en la década del 90. En la cuenca del río Tunuyán resulta significativa la banda 2-4 años en 1970, la banda 4-6 años en 1980-90 y la banda 2-4 en el año 2000-10. Desde la cuenca del río Diamante al Barrancas, el análisis presenta intensidades similares para los períodos en las bandas 2-6 años presentes en la década de 1980-90. También se presentan ciclos significativos en las bandas 4-6 en la década 2000-10. En las cuencas del río Atuel y Barrancas, la mayor energía se observa en las bandas 16-32 en 1970.

En líneas generales, la mayor actividad energética se concentra en los períodos interanuales (2-8 años). Los espectros de potencia elevados también se distinguen en frecuencias bajas (16-32 años), principalmente en las variables precipitación y caudal, si bien estas fluctuaciones presentan mayor persistencia en el espectro, por

lo general, se encuentran fuera del cono de influencia producto de la longitud de la serie analizada.

Análisis coherencia de ondas

El análisis de coherencia de ondas permite identificar si dos series de tiempo (precipitación- caudal y temperatura-caudal) presentan oscilaciones en la misma frecuencia y si están acopladas o no. Los resultados se presentan en la **Figura 5**. Los vectores horizontales orientados a la derecha (izquierda) indican que las series se encuentran en fase (anti-fase), en tanto los vectores con ángulos entre 90° y -90 reflejan un retardo de alguna de las dos variables de un cuarto de período (período/4).

En líneas generales se observa que de norte a sur existen diferencias entre las frecuencias y distribución temporal que presentan alta coherencia entre la precipitación y el caudal. En tanto, la coherencia entre temperatura y caudal en las distintas cuencas analizadas presentan ciertas coincidencias.

En la cuenca del río San Juan el caudal y la precipitación se encuentran en fase, es decir, que existe una relación lineal, para períodos de 6 años durante 1970-2005 y para períodos de 16 años entre 1995-2000. En tanto, oscilaciones de períodos de 2-4 años se observa un adelantamiento de la precipitación respecto del caudal. El caudal con la temperatura muestran correlación para oscilaciones de 4-6 años durante el período 1980-1990, con un retardo de 1-1,5 años de los caudales con respecto a la temperatura.

En la cuenca del río Mendoza, las series de precipitación y caudal tienen elevada potencia y se encuentran en fase en la frecuencia entre 4-8 años durante 1980-1990, como así en la frecuencia entre los 2-6 años entre el 2000-2010, con un retardo en la serie de caudales. Con la temperatura coinciden en la frecuencia 4-6 años entre 1980-1990, con un retardo también en la serie de caudales. Para período 2000-2010 se encuentran potencias significativas con un desfase mayor de la serie de caudales, de hasta 3 años para las frecuencias 2-4 años y de 4-5 años para las frecuencias 6-7 años.

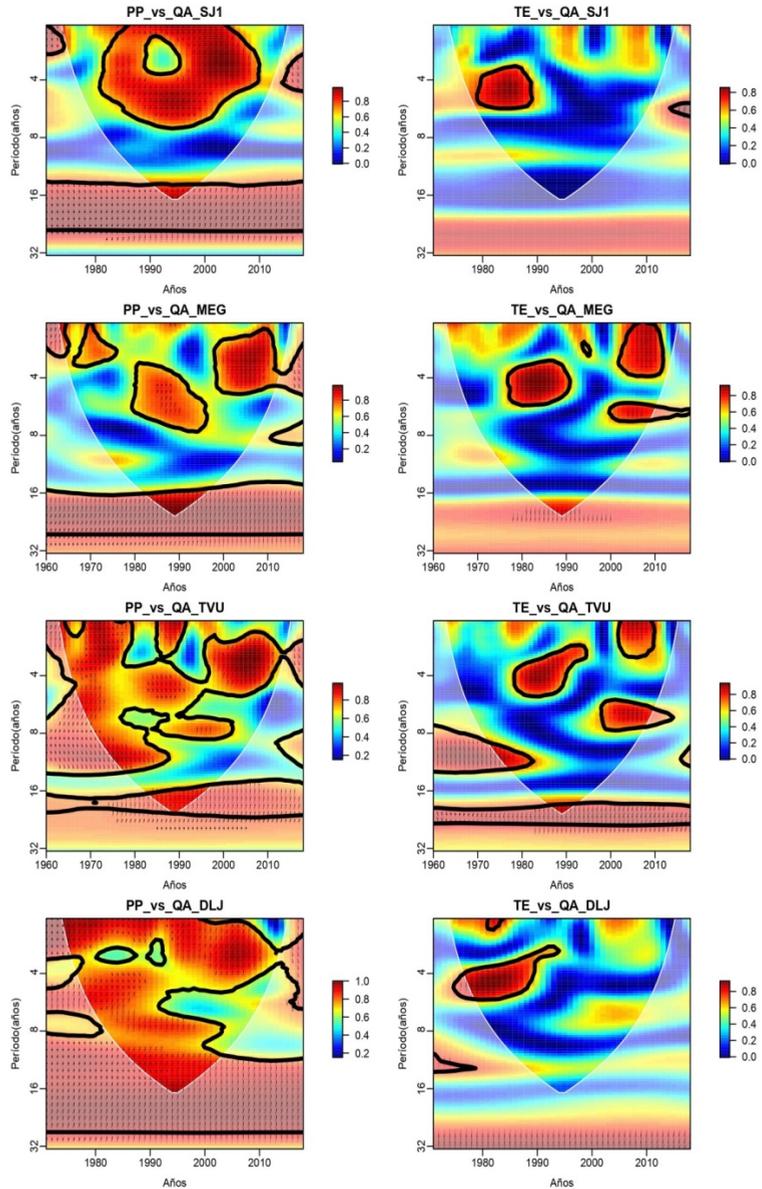


Figura 5: Análisis coherencia de ondas entre las variables precipitación-caudal y temperatura-caudal. Elaboración propia.

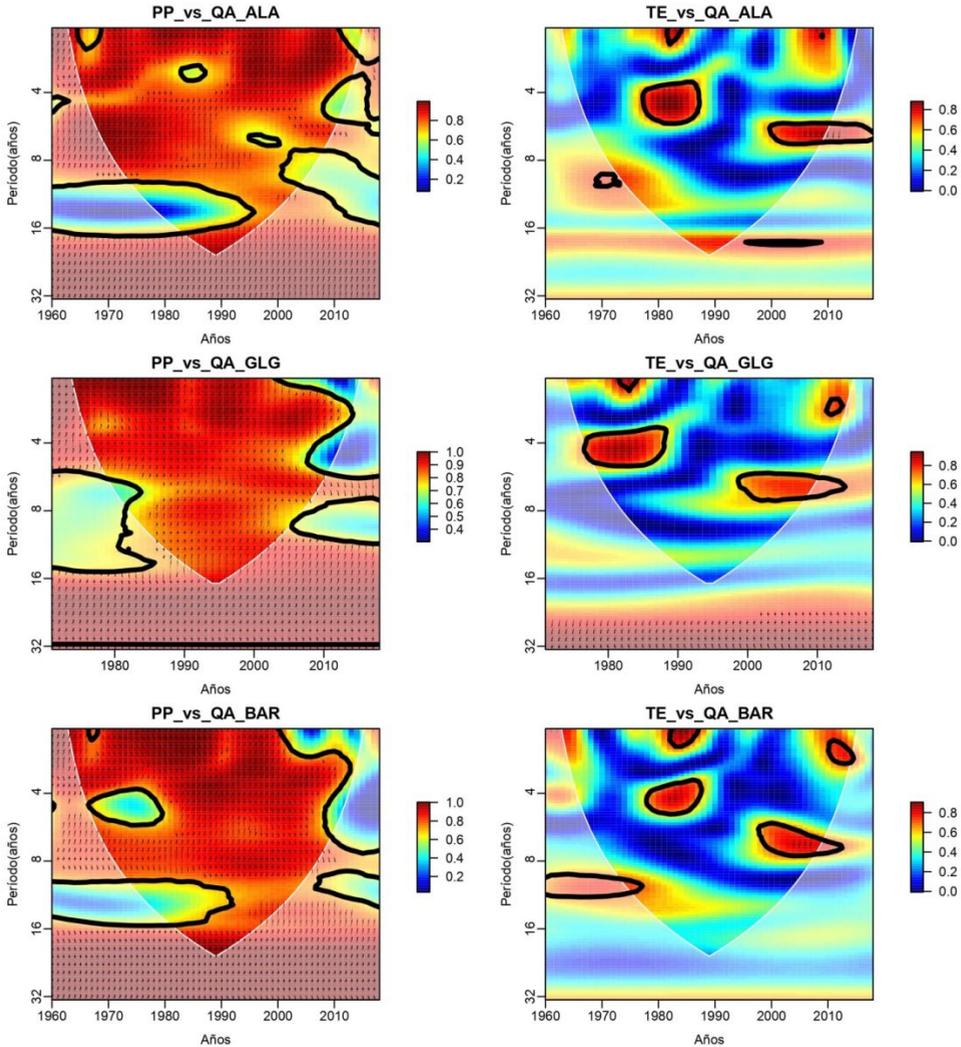


Figura 5 continuación: Análisis coherencia de ondas entre las variables precipitación-caudal y temperatura-caudal. Elaboración propia.

En la cuenca del río Tunuyán las series de caudal y precipitación muestran elevada potencia para ciclos entre 2-4 años en fase durante el período 1960-1980 y con

adelantamiento de la precipitación para el final del período analizado. Para ciclos de 4-6 años ambas series se encuentran en fase en 1980-1990. Para ciclos de 16 años se verifica también una elevada potencia de variabilidad, con un adelantamiento de la serie de precipitación. Respecto la relación entre caudal y temperatura muestra resultados similares a los descriptos para la cuenca del río Mendoza.

Para la cuenca del río Diamante y las cuencas localizadas al sur de esta, el comportamiento de la relación precipitación-caudal es similar. Existiendo elevada correlación para las frecuencias entre 2-16 años durante todo el período analizado. En la cuenca del río Diamante la relación precipitación-caudal con mayor intensidad es para ciclos de 2 años en el 2000-2010 con adelantamiento de la precipitación. Entre ciclos de 4-8 años en 1980-1990 se presenta una relación lineal entre ambas variables. También se destacan períodos significativos de ciclos de 8-16 años entre 1990-2000, dicha relación también es significativa en la cuenca del río Grande. Se puede observar que para los ciclos de 8-16 años para las cuencas de río Atuel y Barrancas no existe una correlación entre 1980-1990. En cuanto a la relación temperatura-caudal en todos los casos se presentan ciclos significativos de 4-8 años en el período 1980-1990 y otro entre el 2000-2010.

Se observa que mientras la relación precipitación-caudal muestra niveles altos de coherencia en la mayoría de las frecuencias a lo largo de toda la serie temporal, la relación temperatura-caudal es significativa sólo para algunas frecuencias y períodos de tiempo.

DISCUSIÓN

Entender la variabilidad del sistema hidroclimático en la región centro oeste de Argentina resulta de gran importancia para el manejo de los recursos hídricos de las poblaciones asentadas al pie de la Cordillera de los Andes.

Dado que las cuencas hidrográficas de la región de Cuyo presentan un régimen hidrológico nivo-glaciario (Lauro et al., 2016), se espera que la evolución temporal de las variables precipitación y temperatura acompañen al comportamiento del escurrimiento. Los resultados muestran que mientras la temperatura tiende a incrementarse en todas las cuencas, siendo este hecho consistente con el

incremento de la temperatura global (Magrin et al., 2014) y las proyecciones realizadas con diversos modelos globales (Zazulie et al., 2017), las tendencias de las precipitaciones acompañan a las tendencias en los caudales. Una excepción a esta situación la constituye la cuenca del río Tunuyán donde la tendencia positiva (no significativa) de la precipitación no acompaña al decrecimiento del escurrimiento asociado al salto negativo del año 2009.

El estudio de datos históricos revela que desde finales de siglo XIX el caudal del río Atuel presenta una disminución sostenida con ciclos de crecidas y sequías (Rojas y Prieto, 2020). Los datos instrumentales analizados desde mediados de siglo XX hasta el año 2018, muestran que los valores medios tienden a disminuir en el largo plazo impulsado por un salto negativo en la década 2010. Sin embargo, se identificaron cambios abruptos por encima de la media en la década del 70 (Lauro et al., 2019). En el dominio de la frecuencia, se encontraron ciclos en escala interanual de 2-6 años. En cuanto a la variabilidad de baja frecuencia, se distinguen ciclos de 16-32 años. Caragunis (2018) identifica una importante componente decenal en los escurrimientos del río Atuel.

Dado que los análisis de tendencia están ligados a la longitud de la serie, la incorporación de una década de datos de caudales en los últimos años revierten los resultados de las tendencias obtenidos por Lauro et al. (2019) para los ríos Diamante y Barrancas. Mientras, para el río Grande, su coeficiente de tendencia negativa se incrementa. Cabe destacar que los datos incorporados coinciden con un evento de sequía hidrológica de características extraordinarias debido a su extensión, duración y severidad en los últimos 50 años en la región (Vaccarino et al., 2020; Rivera et al., 2021).

Los ciclos identificados a partir del análisis de onda exhiben los cambios en la varianza de las variables hidroclimáticas analizadas. Se destaca que dichos cambios no son continuos y cambian de intensidad y frecuencia a lo largo de la serie analizada. Tanto las precipitaciones y los caudales presentan ciclos que corresponden con variaciones interanuales y decenales en las bandas de 4-8 años y 16-32 años, respectivamente. Lauro et al (2021) explica que la variabilidad de alta frecuencia en las series de caudal en toda la región se asocia con el ENSO, dicha relación expresa con mayor intensidad en el período comprendido entre 1970-2000. En los ríos San

Juan, Atuel y Colorado, Caragunis (2018) identifica ciclos significativos de alrededor de 22 años con mayor señal entre los años 1970 y 1990. La asociación entre la precipitación y caudal con el índice ENSO y el índice de la PDO (Compagnucci et al., 2000; Lauro et al., 2019; Masiokas et al., 2019; Lauro et al., 2021), indican que los forzantes oceánicos-atmosféricos inducen ciclos de baja y alta frecuencia en la región de los Andes Centrales. Particularmente, los incrementos en los caudales anuales están asociados a aumentos en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (Carril et al., 1997; Compagnucci y Araneo, 2007; Lauro et al., 2019). Durante la fase positiva/negativa del índice PDO los caudales del centro oeste argentino se encuentran por encima/debajo de sus valores medios (Masiokas et al., 2010; Lauro et al., 2019).

El escurrimiento de las cuencas localizadas en la vertiente este de la cordillera de los Andes (28-37°S), es altamente dependiente la acumulación de las precipitaciones níveas (Masiokas et al., 2006) y la variabilidad intra-estacional de la temperatura (Araneo et al., 2015), entre otros factores. En cuanto a la relación entre la precipitación y el caudal resulta mayor en el intervalo de frecuencias interanuales presente a lo largo de todo el período de estudio, en tanto, en algunas cuencas se encontró relación en frecuencias decenales en la década del 90. Para períodos interanuales se observa un adelantamiento de la precipitación, es decir, que existe un retardo entre que la precipitación aumenta y el incremento de caudal. El rol de la temperatura en las cuencas de régimen nivo-glacial radica en los procesos de fusión nivo-glaciario o inhibición de la misma, esta relación se presenta claramente con patrones intra-estacionales (Araneo et al., 2015). En escala interanual la relación entre la temperatura y el caudal se observa en frecuencias de 4-8 años en el período comprendido entre 1980-1990, con un adelantamiento de la temperatura respecto del caudal.

CONCLUSIÓN

Los componentes del ciclo hidrológico en cuencas de régimen nivo-glaciario en largas escalas temporales se vinculan con patrones de circulación oceánico-atmosférico globales que afectan la variabilidad climática regional. Conocer el comportamiento de los diversos componentes del ciclo hidrológico en diversas escalas temporales y

espaciales permite mejorar la gestión de los recursos hídricos. Particularmente, el estudio de la variabilidad hidroclimática en la región de Cuyo apunta a contribuir a la seguridad hídrica de las comunidades involucradas, dado que durante la última década se ha visto comprometida producto de una disminución de la oferta hídrica por la disminución en las precipitaciones, y el incremento de la temperatura en la región.

Los cambios graduales identificados en la región no presentan un comportamiento homogéneo. El caudal de los ríos Diamante y Grande son los únicos que presentan tendencias negativas significativas desde el análisis estadístico, siendo la disminución del caudal en la cuenca del río Grande la de mayor magnitud en términos relativos. Es notable destacar que hacia el sur del río Tunuyán todos los ríos presentan un salto negativo significativo a principios de la década 2010.

Tanto para la precipitación como para el caudal se identificaron ciclos interanuales y decenales, siendo estos no uniformes a lo largo del período de análisis. La temperatura de la región tiende a aumentar, presenta ciclos interanuales con mayor intensidad en la década 2000-2010.

La relación entre la precipitación y el caudal se observa en las bandas de frecuencias interanuales y en algunos casos en bandas decenales. En tanto, la relación del caudal con la temperatura de mayor intensidad ocurre en las bandas 4-8 años. Se considerará realizar el análisis de coherencia en la escala temporal mensual motivado por las características de régimen hidrológico de las cuencas, ya que la influencia de la temperatura es más importante en escalas estacionales o intra-estacionales.

La disponibilidad hídrica superficial en cada una de las cuencas está sujeta a cambios de largo plazo, como así también a fluctuaciones interanuales y decenales asociados a fenómenos climáticos de macroescala. Conocer las múltiples escalas temporales de fluctuaciones como así también los diversos procesos que las originan resulta de interés para mejorar los modelos de predicción del escurrimiento.

FINANCIAMIENTO

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*, 25, 1657-1677.

Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climate*, 6, 661-675.

Araneo, D.C., Rivera, J.A., & Villalba, R. (2015). Variabilidad intraestacional de las condiciones níveas de los Andes Centrales relacionadas con los cambios en el régimen hidrológico del río Atuel. *Acta geológica lilloana*, 27, 2: 77-86.

Buishand, T.A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.

Buishand, T.A. (1984). Tests for Detecting a Shift in the Mean of Hydrological Time Series. *Journal of Hydrology*, 73, 51-69.

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.

Carril, A., Doyle, M., Barros, V., & Núñez, M. (1997). Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Research*, 9, 121-129.

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

Compagnucci, R.H., & Araneo, D. (2007). Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(3), 23-35.

Garreaud, R., & Fuenzalida, H. (2007). The Influence of Andes on cutoff lows: A modeling study. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1596-1613.

Gonzalez-Reyes, A., et al. (2017). Spatio-temporal variations in hydroclimate across the Mediterranean Andes (30°–37°S) since the early 20th century. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1929–1942.

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.

- GWP. (2000). *Towards Water Security: A Framework for Action*. Global Water Partnership: Stockholm.
- Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J. of Hydrology*, 204(1-4), 182–196.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborna, T.J. & Listera, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International journal of climatology*, 34, 623–642.
- Hirsch, R.M. (1982). A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, 18(4), 1081-1088.
- Klees R., Haagmans, R. (2000). *Wavelet in the geosciences*. Springer-Verlag: Berlin.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2000). Detecting trend and other changes in hydrological data. WCDMP-45. WMO/TD, 1013. Geneva.
- 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., & Moreiras, S.M. (2018). Regional flood frequency analysis in the Central Western River Basins (28°-37°S) of Argentina. *River Research and Applications*, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3319>
- Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S.M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indexes in western river basins of Argentina. *Hydrological Science Journal*, 57 (1). doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>
- Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S.M., Bastidas, L., Otta, S., Vaccarino, E. (2021). Regionalización del caudal máximo anual en cuencas del sistema hidrográfico del río Colorado, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47. <http://doi.org/10.18172/cig.4465>.
- Lauro, C., Vich, A., Otta, S., Moreiras, S.M., Bastidas, L., Vaccarino, E. (2021). Modos de variabilidad hidroclimática en los Andes Centrales (30-37°S). AAGG 2021.
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña, (2014). Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
- Mauas P, Buccino A, & Flamenco E. (2011). Long-term solar activity influences on South American rivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(2–3), 377–382.

- Mallat, S. (1999). A Wavelet tour of signal processing. Wavelet analysis and its applications. *Academic Press*, San Diego, 637.
- Masiokas, M., 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. *Journal of Climate*, 19, 6334–52.
- Masiokas, M., Iba, R., Luckman, B., & Mauget, S. (2010). Intra-to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *J. of Hydrometeorology*, 11, 822-831.
- Masiokas, M.H., Cara, L., Villalba, R. et al. (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>
- Massone, H., Martinez, D., Vich, A., Lodoño, M.Q., Trombotto, D., & Grondona, S. (2016). Snowmelt contribution to the sustainability of the irrigated Mendoza s Oasis, Argentina: an isotope study. *Environ, Earth Sci*, 75,520. doi <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5141-9>.
- Meyers, S.R. (2014). *Astrochron: An R Package for Astrochronology*. <https://cran.r-project.org/package=astrochron>
- Otta, S., Lauro, C., Vich A., Vaccarino, E., Bastidas L. Variabilidad de la oferta hídrica en los oasis irrigados de Mendoza y San Juan (Argentina) en el período 1981-2018. *Actas E-ICES 15. Virtual; Octubre 2020*.
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist*, 28, 126-135.
- Rajagopalan & Lall, (1998). Interannual variability in western US precipitation. *Journal of Hydrology*, 210, 51-67.
- Rao, A.R & Hamed, K. (2003). Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data. *Journal of Hydrology*, 279, 125-143.
- Remington, R.D., & Schork, M.A., (1974). *Estadística Biométrica y Sanitaria*. Editorial Prentice/Hall International: Bogota.
- Rivera, J.A., Araneo, D.C., & Penalba, O.C. (2014). Climatología de sequías hidrológicas en los ríos andinos de Argentina. *XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, San Juan, Argentina, 10-14 de noviembre de 2014*. ISBN: 978-987-33-5605-6.
- Rivera, J.A., & Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). *Atmospheric Research*, 241, 104953.
- Rivera, J. A., Penalba, O. C., Villalba, R., & Araneo, D. C. (2017). Spatio-temporal patterns of the 2010–2015 extreme hydrological drought across the Central Andes, Argentina. *Water*9,652. doi: <https://doi.org/10.3390/w9090652>.

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

Rojas, F., & Prieto, M. R. (2020). La variabilidad hídrica en la cuenca del río Atuel, desde la climatología histórica: siglo xviii a mediados del xx. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (2), 326-353. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n2.75960>

Rusticucci, M., Zazulie, N., & Raga G.B. (2014). Regional winter climate of the southern central Andes: Assessing the performance of ERA-Interim for climate studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 8568–8582. doi: <https://doi.org/10.1002/2013JD021167>.

Seluchi, M.E., Garreaud, R.D., Norte, F.A., & Saulo, A.C. (2006) Influence of the subtropical Andes on baroclinic disturbances: A cold front case study. *Mon. Wea. Rev.*, 134:3317–3335.

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

Vaccarino, E., Otta, S., Lauro, C., Bastidas, L., Vich, A. Sequías hidrológicas en la región de Cuyo, Argentina. *Actas E-ICES* 15. Virtual. Octubre 2020.

Viale, M., Bianchi, E., Cara, L., Ruiz, L.E., Villalba, R., Pitte, P., Masiokas, M., Rivera, J.A., & Zalazar, L. (2019). Contrasting climates at both sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.* 7, 69. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00069>.

Westmacott, J., & Burn, D. (1997). Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Curchill Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, 202, 263-279.

Yue S., & Wang, C.Y. (2002) The influence of serial correlation on the Mann-Whitney test for detecting a shift in median. *Advances in Water Resources*. 25, 325–333.

Zazulie, N., Rusticucci, M., Raga, G.B. (2017). Regional climate of the subtropical central Andes using high-resolution CMIP5 models—part I: Past performance (1980–2005). *Clim. Dyn.*, 49, 3937–3957.

LOS AUTORES

Carolina Lauro Ingeniera en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Cuyo. Doctora en Ingeniería de la Universidad Nacional de Rosario. Es Investigadora asistente de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación se refieren a Recursos hídricos superficiales. Regionalización de variables hidrológicas extremas: sequías, inundaciones. Variabilidad hidrológica y relación con el cambio climático.

Alberto I. J. Vich Ingeniero en Recursos Hídricos. Magister en Ciencias, Especialidad Edafología. Investigador adjunto de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Profesor de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo. Sus principales líneas de investigación se refieren a Riesgo aluvional. Análisis de procesos

hidrológicos. Modelación matemática. Fenómenos hidrológicos extremos. Erosión hídrica. Regionalización de variables hidrológicas. Gestión integrada de los recursos hídricos.

Sebastián OttaIngeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Cuyo. Becario doctoral de CONICET y trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: usos de la tierra. Gestión Integradas de los Recursos Hídricos y Adaptación al Cambio Climático.

Stella Maris MoreirasLicenciada en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de San Juan. Dra. en Ciencias Geológicas. Investigadora Independiente de CONICET. Profesora Adjunta de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Cuyo. Experiencia en Cuaternario, Deslizamientos y Geomorfología. Sus principales líneas de investigación comprenden los campos de la estratigrafía cuaternaria, paleosismología, neotectónica, peligros naturales, aluviones catastróficos por rompimiento de diques naturales glaciares o represados por deslizamientos y cambios ambientales recientes.

Emilce VaccarinoGeógrafa Profesional de la Universidad Nacional de Cuyo. Becaria doctoral de CONICET, trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: sequías hidrológicas, recurrencia de eventos hidrológicos, distribución espacio/temporal y apreciación social de eventos de sequías.

Luis BastidasGeógrafo de la Universidad de Los Andes, Venezuela. Estudiante de la Maestría en Desarrollo de Aguas y Tierras, mención Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos. Centro Interamericano de Investigación Ambiental y Territorial CIDIAT. Universidad de los Andes. Becario doctoral CONICET, trabaja en el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias ambientales (CCT Mendoza). Sus principales líneas de investigación son: caudales ambientales, conservación de humedales, variabilidad y cambio climático.