

VARIABILIDAD DEL CAUDAL DEL RÍO NEUQUÉN EN LAS FASES DE SU CICLO ANUAL Y SU RELACIÓN CON ÍNDICES CLIMÁTICOS

Lorenzo Ricetti^{1,2}, Santiago I. Hurtado³, Eduardo Agosta Scarel⁴, Andrés Cesanelli¹

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata (FCAG, UNLP)

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB), INTA-CONICET

⁴Equipo Interdisciplinario para el Estudio de Procesos Atmosféricos en el Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Buenos Aires, CONICET-UCA

(Manuscrito recibido el 16 de febrero de 2023, en su versión final el 24 de mayo de 2023)

RESUMEN

El río Neuquén reviste una gran importancia para la región de Patagonia Norte. Por esto, el presente trabajo plantea el estudio de la variabilidad de su caudal a partir de datos observados, en un contexto de emergencia hídrica en la cuenca. Primero, se realizó una evaluación de algunos métodos de rellenado de datos de caudal diario, el cual arrojó que la regresión lineal múltiple es la más adecuada para la cuenca. Luego se identificaron las fases del ciclo anual, a partir de la propuesta de una metodología objetiva. Esta identificó las fechas de inicio y final de tres fases del ciclo anual, en concordancia con el ciclo pluvio-nival del curso. Así, se identificó una fase de mínimo caudal entre principios del año calendario y fines de mayo, una fase de máximo relativo que se extiende hasta mediados de septiembre y una fase de máximo absoluto que tiene lugar hasta principios del año siguiente. Posteriormente, se estudiaron series de caudal representativas de cada fase. La totalidad de las series estudiadas mostraron un quiebre o salto abrupto entre el 2007 y el 2010 hacia menores valores, el cual induce tendencias negativas y significativas pero espurias. Durante el periodo homogéneo previo al quiebre, la variabilidad de las series mostró ser distinta entre las fases. Respecto a los potenciales forzantes, el caudal de la fase mínima mostró una relación inversa con el índice del Modo Anular del Sur (MAS) y directa con el índice TNA, representativo de la variabilidad de la temperatura superficial del mar (TSM) del Atlántico tropical norte. El caudal de la fase de máximo relativo exhibió una relación directa con los índices del Niño Oscilación del Sur (ENOS) e inversa con el índice TSA, de la TSM del sur del Atlántico tropical. Por último, se encontraron relaciones directas entre el caudal de la fase de máximo absoluto y los índices del ENOS y del Dipolo del océano Índico e inversas con los índices del MAS y TNA. Estos resultados aportan información sobre el cambio del régimen hidrológico del río y su variabilidad, relevante en la gestión de un recurso estratégico.

Palabras clave: Patagonia Norte, El Niño Oscilación del Sur, Modo Anular del Sur, Dipolo del Océano Índico, Océano Atlántico.

STREAMFLOW VARIABILITY OF THE NEUQUEN RIVER ON THE PHASES OF ITS ANNUAL CYCLE AND IT RELATIONSHIP WITH CLIMATE INDICES

ABSTRACT

The Neuquén river has great relevance for the northern Patagonian region. For this reason, this work aims to study its streamflow variability based on observational data in the context of hydrological emergency in the basin. Firstly, a study of daily streamflow infilling methods was performed, from which the multiple linear regression stood out as the most appropriate for the basin. Then, the phases of the annual cycle were determined with an objective methodology. The methodology was able to determine the beginning and ending dates in each of the three identified phases, in concordance with the river's pluvio-nival cycle. Accordingly, there is a minimum streamflow phase, which takes place from the beginning of the year until May, a relative maximum phase which extends from May through mid-September, when the absolute maximum phase begins until the next minimum phase. Subsequently, streamflow series representative of each phase were examined. All the estimated series showed a breakpoint or step change towards lower streamflow between 2007 and 2010, which induces negative and significant trends, yet spurious. Throughout the homogeneous period before the breakpoint, the series of the different phases showed distinct variability. Regarding the potential forcings, the streamflow of the minimum phase showed an inverse relationship with the Southern Annular Mode (SAM) index and a direct association with the TNA index, which represents the sea surface temperature (SST) variability of the tropical North Atlantic Ocean. The streamflow of the relative maximum phase exhibited a direct relationship with El Niño Southern Oscillation (ENSO) indices and an inverse association with the TSA index of the tropical south Atlantic SST. Lastly, the streamflow of the absolute maximum phase showed a direct relationship with the ENSO and Indian Ocean Dipole indices and an inverse connection with the SAM and TNA indices. These results provide useful insights about the changes in the hydrological regime of the river and its variability, which is relevant in the management of the resource.

Keywords: Northern Patagonia, El Niño Southern Oscillation, Southern Annular Mode, Indian Ocean Dipole, Atlantic Ocean.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Neuquén (CRN) es una cuenca de carácter exorreico situada en el oeste de la Patagonia norte (Figura 1). La misma nace en el faldeo oriental de la cordillera de los Andes, entre los 36° y 39,5° de latitud sur, drenando una superficie de unos 30000 Km² (<http://www.aic.gob.ar/sitio/lacuenca>, accedido el 15/02/2023). En su extremo norte limita con la cuenca del río Colorado y en el sur con la cuenca del río Limay. Este último confluye

con el río Neuquén para dar origen al río Negro en el extremo oriental de la CRN. En la sección inferior de la cuenca se encuentra emplazado el complejo hidroeléctrico Cerros Colorados, cuyas funciones son el control de crecidas (a partir de los reservorios Los Barreales y Mari Menuco), el abastecimiento de agua para el consumo humano y el riego, la protección de costas y la generación hidroeléctrica a cargo de cinco presas con una potencia instalada de 480 MW (Organismo Regulador de Seguridad de Presas; ORSEP, 2020). Esta última resulta

de gran importancia para la matriz energética nacional, dado que en el Comahue (región ubicada en el norte de la Patagonia argentina) se produce el 41 % de la energía hidroeléctrica del país, la cual representó el 33 % del total de energía producida en el país al año 2017 (<https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/hidroelectrica/estadisticasde-hidroelectricidad-en-argentina>, accedido el 19/04/2023). A nivel regional, la principal actividad productiva es la explotación de hidrocarburos, seguida del turismo y de la fruticultura (<https://w2.neuquen.gov.ar/economia-y-recursos>, accedido el 19/04/2023).

La CRN posee corrientes de agua permanentes de escurrimiento superficial dendrítico, siendo algunas pocas efímeras, reactivadas durante la época de deshielo (Finessi & Groch, 2018). El año hidrológico en los cursos de la CRN inicia en el mes de marzo (Romero & González, 2016), presentando una doble onda de crecida a la que se le asocia un régimen pluvio-nival. El primer máximo ocurre en los meses de junio y julio, acompañando el pico anual de las precipitaciones en la región (González & Vera, 2010). En tanto que el segundo máximo debe su origen a la alimentación alóctona producto del derretimiento nival y ablación glaciaria que ocurre en las cordilleras circundantes al inicio de la primavera (Vich et al., 2010).

La variabilidad interanual del caudal en los ríos andinos depende fuertemente de las condiciones atmosféricas (Araneo & Compagnucci, 2008). En tal sentido, numerosa evidencia sustenta que la variabilidad del caudal anual y estacional de los ríos patagónicos se encuentra modulada en escalas interanuales por los forzantes El Niño-Oscilación del sur (ENOS) y el Modo Anular del Sur (MAS) y en escalas interdecadales por la Oscilación Decadal del Pacífico y el MAS (Lauro et al., 2019; Berri et al., 2019; Compagnucci & Araneo, 2007; Rivera et al., 2018; Scarpati et al., 2001; Masiokas et al., 2019). A pesar de existir numerosos trabajos en la región de estudio, ninguno de

ellos analiza la variabilidad del caudal del río Neuquén en las distintas fases que componen su característico ciclo pluvio-nival. Tampoco fue explorada la relación de la variable con otros forzantes remotos de la variabilidad climática en Sudamérica, como lo es el Dipolo del océano Índico (DOI, Chan et al., 2008).

Las series de caudales anuales, mínimos y de meses estivales presentan tendencias negativas en la región de estudio (Masiokas et al., 2019; Vich et al., 2010; Lauro et al., 2019). Asimismo, Rivera et al. (2018) detectaron tendencias positivas en la frecuencia de ocurrencia de sequías hidrológicas desde mitad de 1970 en la cuenca. En este contexto de reducción en la disponibilidad del recurso hídrico, los estudios bajo distintos escenarios de emisión proyectan un probable aumento en la frecuencia de ocurrencia de sequías en los ríos patagónicos en el futuro cercano (Aguayo et al., 2019) y disminución del caudal medio anual y de la disponibilidad de agua en Comahue hacia fines del siglo XXI (Pessacg et al., 2020; Raggio & Saurral, 2021).

En el marco de la emergencia hídrica decretada por la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC, <http://www.aic.gob.ar/Sitio/novedadesver?a=730&z=2090819242>, accedido el 15/02/2023) generada por la disminución sostenida del caudal en años recientes, impera la necesidad de mejorar la comprensión de la evolución temporal de los caudales en la CRN y su relación con los mecanismos forzantes de su variabilidad, a partir de estudios específicos a nivel de cuenca. Esto permitiría mejorar la planificación y gestión del recurso en las próximas décadas, en una región donde las actividades económicas dependen fuertemente de su disponibilidad. El presente trabajo se propone analizar la variabilidad interanual e interdecadal del caudal de los ríos de la CRN en cada una de las fases de su ciclo anual y su relación con índices climáticos. De este modo, se busca extraer información estadísticamente relevante que permita mejorar la comprensión

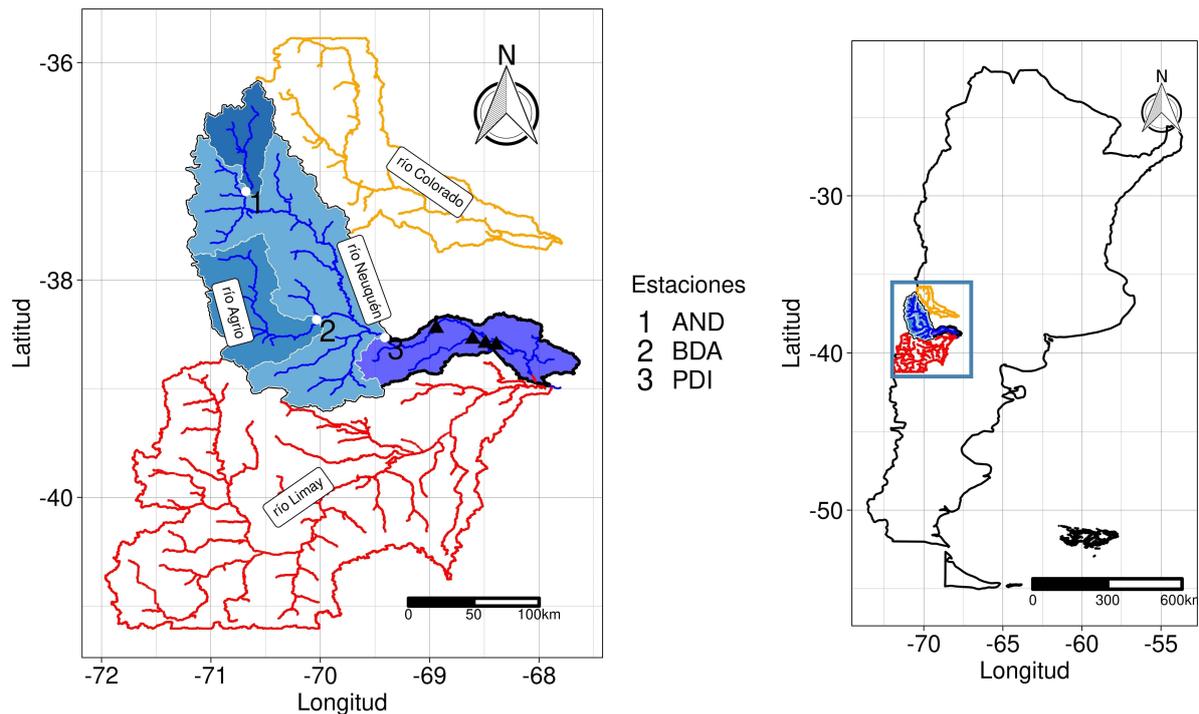


Figura 1: Cuenca del río Neuquén (CRN, sombreado azul y contorno negro), región de estudio. Cuenca del río Colorado (contorno amarillo) y del Limay (contorno rojo). Estaciones de aforo utilizadas en el estudio (puntos blancos, números negros): Andacollo (AND), Bajada del Agrio (BDA) y Paso de Indios (PDI) y sus subcuencas asociadas (contornos blancos, sombreados azules). Complejo hidroeléctrico Cerros Colorados (triángulos negros).

de la progresión temporal del caudal en la cuenca y de su variabilidad.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Datos

Para el estudio se utilizaron datos de caudal medio diario extraídos del Sistema Nacional de Información Hídrica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>, accedido el 19/10/2022), correspondientes al periodo 1980-2019. Tales registros fueron sometidos a un análisis de consistencia identificando falsos ceros y valores inconsistentes, los cuales fueron considerados como datos faltantes. Para identificar datos inconsistentes se ajustó un modelo Autoregresivo integrado de medias móviles (ARIMA) a cada serie y se consideró sospechoso a cualquier valor por fuera del intervalo arbitrario dado por el doble del

desvío estándar de los residuos del modelo. Para determinar si un sospechoso era un valor inconsistente se realizó un análisis visual de la serie centrada en el valor a consistir y se comparó con registros de estaciones cercanas. La Tabla I muestra el nombre, acrónimo, ubicación y porcentaje de datos faltantes de las estaciones empleadas. Se seleccionaron las estaciones ‘Andacollo’ (AND), ‘Bajada del Agrio’ (BDA) y ‘Paso de Indios’ (PDI), que resultaron las únicas con un porcentaje de datos faltantes menor al 10% en el periodo de estudio. Puede observarse en la Figura 1 que AND y BDA son representativas de subcuencas con nacimiento en los Andes, mientras que PDI lo es de una subcuenca que abarca las dos anteriores. En la Tabla I puede advertirse que la estación AND presenta casi un 6% de datos faltantes, donde más del 4% de los mismos se concentran en un periodo continuo comprendido entre el 1° de abril del 2004 y el 1° de enero

del 2006, comprometiendo la serie histórica. Dado que el uso de métodos de rellenado de datos inadecuados en series hidrometeorológicas puede comprometer la fiabilidad de los análisis hidrológicos y climatológicos posteriores (Ng et al., 2009; Hurtado et al., 2021) y ante la falta de trabajos que evalúen y comparen el desempeño de distintos métodos de rellenado de datos en la región, se procedió a realizar un análisis comparativo de algunos métodos de rellenado de datos de caudal medio diario, con el fin de determinar el más óptimo para recuperar la serie histórica para su uso climático.

| Estación | Acrónimo | Lat | Lon | % Faltantes |
|------------------|----------|--------|--------|-------------|
| Andacollo | AND | -37,18 | -70,68 | 5,74% |
| Bajada del Agrio | BDA | -38,36 | -70,03 | 0,33% |
| Paso de Indios | PDI | -38,53 | -69,41 | 0,00% |

Tabla I: Nombre y ubicación de las estaciones de aforo diario utilizadas, sus acrónimos y el porcentaje de datos faltantes en el período de estudio.

Para explorar los posibles forzantes del sistema acoplado océano-atmósfera que modulan la variabilidad del caudal del río Neuquén se utilizaron índices climáticos mensuales. Entre ellos se encuentran los índices Niño 1.2, Niño 4 y Niño 3.4 del fenómeno ENOS, los índices TNA ('Tropical North Atlantic') y TSA ('Tropical South Atlantic') del océano Atlántico tropical norte y sur, respectivamente y el índice DMI ('Dipole mode index') del DOI, extraídos de la página de la 'National Oceanic and Atmospheric Administration' (NOAA, <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>, accedido el 19/10/2022). También se usó el índice del MAS basado en observaciones propuesto por Marshall (2003), brindado por el 'British Antarctic Survey' (BAS, <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>, accedido el 19/10/2022).

2.2. Metodología

El procesamiento de datos, análisis estadísticos

y visualización fue realizada utilizando el software de código libre 'R' (R Core Team, 2022). En particular, haciendo uso de los paquetes *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *lubridate* (Grolemund & Wickham, 2011), *metR* (Campitelli, 2018), *BreakPoints* (Hurtado et al., 2020), *trend* (Pohlert et al., 2016) y *forecast* (Hyndman et al., 2020).

2.2.1. Rellenado de datos faltantes

Entre los métodos evaluados para rellenar los datos faltantes se incluyen los basados en la autoregresión de la variable (ARIMA), de regresión lineal múltiple (MLR, por sus siglas en inglés) con múltiples variantes en las variables predictoras, y de valores medios (Valor_Medio, Cerrudo et al., 2017). Adicionalmente, se evaluó el rellenado de faltantes utilizando datos provistos por el reanálisis hidrológico de alta resolución 'Global Flood Awareness System' (GloFAS, Alfieri et al., 2020) mediante un método de regresión lineal simple (GloFAS_Reg) y utilizando el valor del dato reanalizado en el punto de grilla más cercano (GloFAS_Raw). Los métodos considerados en el análisis se describen en la Tabla II.

| Modelo | Descripción |
|-------------|--|
| ARIMA | Modelo autorregresivo integrado de medias móviles |
| MLR_Ord | Regresión lineal múltiple utilizando como predictores los registros de las otras dos estaciones de la cuenca |
| MLR_Ds | Regresión lineal múltiple utilizando como predictores los registros desfasados en el tiempo de las otras dos estaciones de la cuenca |
| MLR_Ar | Regresión lineal múltiple utilizando como predictores los registros desfasados de la propia estación a rellenar y de las otras dos estaciones de la cuenca |
| Valor_Medio | Promedio entre el registro del día previo y posterior al valor a rellenar |
| GloFAS_Raw | Salida del reanálisis GloFAS en el punto de grilla más cercano a la estación a rellenar |
| GloFAS_Reg | Regresión lineal simple usando GloFAS_Raw como predictor |

Tabla II: Modelos de rellenado de datos evaluados y su descripción. Filas sombreadas corresponden a métodos capaces de rellenar periodos continuos de datos faltantes.

De los modelos evaluados, hay algunos que no

son aptos para rellenar períodos continuos de datos faltantes. Los métodos ARIMA y MLR_Ar requieren de la existencia de registros en días previos y el método Valor_Medio requiere el anterior y posterior inmediatos, por lo que sólo son aplicables a datos faltantes aislados. Por tanto, se evaluó el método más adecuado para rellenar faltantes continuos y aislados de forma separada.

La validación de cada modelo se realizó con la técnica ‘Leave one out cross validation’ (Sammut & Webb, 2010). Para ello, se utilizaron métricas basadas en el error relativo, con el fin de poder compararlas entre estaciones. En particular, se calculó el error relativo medio (RME, por sus siglas en inglés) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo (RRMSE, por sus siglas en inglés), definidos de la siguiente forma:

$$RME_{i,j} = \sum_{t=1}^N \left[\frac{Mod_{i,j}(t) - Obs_i(t)}{Obs_i(t)} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$RRMSE_{i,j} = \sqrt{\sum_{t=1}^N \left[\left(\frac{Mod_{i,j}(t) - Obs_i(t)}{Obs_i(t)} \right)^2 \right]} \times 100 \quad (2)$$

donde Mod y Obs representan los valores modelados y observados, respectivamente. El subíndice i representa la estación, j al modelo de rellenado y N representa la cantidad de observaciones. La métrica RME brinda información del sesgo relativo medio y el RRMSE de la magnitud del error relativo medio. Cabe destacar que el RME debe ser evaluado teniendo en consideración que los valores negativos y positivos pueden contrarrestarse entre sí y dar una magnitud más pequeña que el error real. Por su parte, el RRMSE no es una métrica resistente y tiende a poner peso en errores grandes (Li & Heap, 2011).

Con el fin de determinar si existen diferencias en el desempeño de los métodos entre temporadas

de altos y bajos caudales, los errores se calcularon de forma separada para el semestre de bajos caudales (enero a junio) y para el semestre de altos caudales (julio a diciembre), siguiendo la clasificación de temporadas de alto y bajo caudal de Compagnucci & Araneo (2007).

2.2.2. Ciclo anual y fases

Para identificar las fases que componen el ciclo anual del caudal se propuso una metodología de detección objetiva de las fases que componen el ciclo anual diario de una variable hidrometeorológica. Para ello, se construyó un ciclo anual característico (Ciclo_med) usando la mediana diaria del caudal (percentil 50 de las distribuciones de caudal de cada día del año). La elección de la mediana en lugar del valor medio se basa en que la distribución del caudal medio diario tiene asimetría positiva, por lo que el valor medio no resulta representativo de la distribución. El ciclo anual suavizado considerado para identificar las fases (Ciclo_arm) se armó con los primeros armónicos obtenidos con la transformada rápida de Fourier sobre Ciclo_med. Se utilizaron los primeros cinco armónicos, siendo este el número mínimo que representó correctamente la forma del ciclo anual según un análisis visual.

Dado que puede entenderse a una fase como un conjunto de elementos pertenecientes a la misma población estadística, se determinaron las fases aplicando la metodología multi quiebre propuesta por Hurtado et al. (2020) sobre el ciclo anual suavizado Ciclo_arm. Para ello, se utilizaron los test de Pettit, Buishand-R y Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), siendo estos los test de mejor desempeño en las simulaciones del mencionado trabajo. Los quiebres se identificaron sobre Ciclo_arm, dado que en él se filtran oscilaciones de alta frecuencia asociadas a procesos aleatorios y variabilidades de escalas que no son de interés en el ciclo anual.

Como el principal objetivo de este trabajo es el estudio de los forzantes de baja frecuencia que modulan la variabilidad de los caudales en

la CRN, para cada fase detectada se acumuló el caudal en trimestres contenidos dentro de la fase. Así, para cada estación de aforo se obtuvieron series interanuales de acumulados trimestrales representativas de cada fase del ciclo anual.

2.2.3. Análisis estadístico de las series de caudal

Para analizar cambios en la estacionariedad de las series temporales, se llevó a cabo un análisis de puntos de quiebre sobre las series interanuales de caudal acumulado usando los test mencionados en la subsección anterior. Dada su corta extensión, se evaluó la existencia de un único punto de quiebre con un intervalo de confianza del 90%. Como las metodologías de puntos de quiebre en series cortas tienen un error mayor en la correcta identificación del momento en que ocurre el quiebre (Hurtado et al., 2020), la ubicación exacta del mismo se confirmó visualmente.

Se evaluó la existencia de tendencias monótonas de las series a partir de las pendientes de la regresión de Theil-Sen (Sen, 1968), debido a su resistencia, del test no paramétrico de Mann Kendall (Hipel & McLeod, 1994) y del test de correlación de Spearman con la recta de regresión (Lauro et al., 2015), utilizando en ambos test un nivel de significancia $\alpha=0,1$. En caso de obtener tendencias significativamente distintas de cero, estas fueron filtradas para asegurar la estacionariedad de la serie.

Se computó el test de correlación de Pearson entre las series de los distintos aforos para cada fase del ciclo anual, para determinar la coherencia entre las series en cada fase. También se analizó la varianza linealmente compartida entre las series de una misma estación en sus distintas fases usando el mismo test, con el fin de identificar la variabilidad compartida entre las series de las distintas fases en la misma estación de aforo.

Con el objetivo de determinar las periodicidades

dominantes de cada serie, se computó la potencia global de Wavelet de las series de caudal acumulado en cada fase (Labat, 2010). Para ello, se utilizó la transformada de Wavelet usando la ondeleta de Morlet de frecuencia 6 (Torrence & Compo, 1998). Los espectros fueron testeados mediante remuestreo de la serie o 'bootstrapping' usando 10.000 simulaciones y un nivel de significancia $\alpha=0,1$. La hipótesis nula establece que la potencia asociada a una dada frecuencia se debe a procesos aleatorios.

2.2.4. Análisis de potenciales forzantes

Para evaluar la relación de las series de caudal acumulado con los potenciales forzantes climáticos, se empleó el test de correlación de Pearson entre las series de caudal y los índices climáticos promediados trimestralmente, usando un intervalo de confianza del 90%. Para cada fase del ciclo anual se consideraron series de los índices promediados en el trimestre representativo de cada fase y promedios trimestrales desfasando de a un mes hasta 4 meses previos, para dar cuenta del potencial desfase entre el forzante y la respuesta en el caudal.

Por otra parte, se calculó la coherencia global de Wavelet (CGW) entre las series de caudal acumulado y los índices climáticos promediados trimestralmente, obtenida a partir del espectro cruzado de Wavelet. Para ello, se suavizaron las series utilizando una ventana de Hamming de 5 puntos. La elección de la coherencia por sobre la potencia del espectro cruzado de Wavelet se basa en que la última no resulta adecuada para evaluar la interrelación entre dos procesos (Maraun & Kurths, 2004). La CGW fue testada bajo la hipótesis nula de que la coherencia entre series asociada a una frecuencia dada es debida al azar. Para simular la distribución nula se realizaron 1.000 remuestreos o 'bootstrapping' de las series temporales y se consideró un $\alpha=0,05$.

La relación estadística entre las series de caudal acumulado y los índices climáticos se consideró

confiable si para ese trimestre se rechazaron las hipótesis nulas del test de correlación y el de coherencia para el intervalo de confianza considerado en cada caso.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación de los métodos de rellenado

La Figura 2 muestra las métricas de error de cada método evaluado, para las distintas estaciones en la temporada de altos y bajos caudales. Considerando la métrica RRMSE, los métodos capaces de rellenar faltantes aislados (ARIMA, Valor_Medio y MLR_Ar) muestran los menores errores en ambas estaciones y temporadas (del orden del 10%). Respecto a los métodos capaces de rellenar periodos completos sin datos, en ambas estaciones y temporadas, GloFAS_Raw y GloFAS_Reg muestran errores mayores que MLR_Ord y MLR_Ds (Figura 2, paneles inferiores). En particular, los modelos basados en el reanálisis GloFAS muestran valores de RRMSE superiores al 50% en todos los casos. Considerando esta métrica, no existen diferencias sustanciales entre MLR_Ord y MLR_Ds, pero ambas muestran una diferencia marcada entre temporadas. Durante la temporada de alto caudal ambos modelos muestran errores relativos menores (del orden del 40% en AND y 25% en BDA), mientras que en la temporada de bajo caudal los errores presentan valores del 75% en AND y 45% en BDA.

Examinando la métrica RME, nuevamente los métodos de rellenado de faltantes aislados son los que en promedio menor sesgo relativo presentan, resultando en todos los casos positivos y del orden del 5%, lo que evidencia una leve sobreestimación del caudal observado (Figura 2, paneles superiores). Respecto a modelos para faltantes continuos, MLR_Ord y MLR_Ds presentan errores mayores para la temporada de bajo caudal. Ambos métodos muestran valores positivos en todos los casos y del orden del 10% (3% en AND (BDA)

durante la temporada de alto y del 30% (20%) en AND (BDA) en temporada de bajo caudal. El modelo GloFAS_Reg muestra sesgo positivo en todos los casos, aunque con una variación grande entre temporadas. Para la temporada de alto se mantiene debajo del 15% en ambas estaciones, mientras que en la de bajo caudal supera el 30%. Por su parte, el modelo GloFAS_Raw exhibe una notable diferencia entre temporadas y estaciones. En la estación AND los errores en ambas temporadas resultan negativos, siendo de -13% y -2% en temporada de bajos y altos caudales, respectivamente. En BDA los errores en ambas temporadas son del orden del 35%, pero positivos en la temporada de altos caudales y negativos en la de bajos. En este punto cabe señalar la importancia de la separación en temporadas para el análisis realizado. Si se hubiesen considerado métricas promedio de todo el año, los sesgos se hubiesen contrarrestado entre sí, obteniéndose valores cercanos a cero, lo que conduciría a una interpretación errónea del sesgo relativo del modelo.

En base al análisis, los datos faltantes aislados fueron rellenados con el modelo MLR_Ar, mientras que los faltantes continuos con el modelo MLR_Ds, siendo estos los métodos que menores métricas de error presentaron para cada tipo de datos faltantes. La Figura 3 muestra la serie temporal de la estación AND, con una ampliación en el periodo 2004-2007. El análisis realizado permitió recuperar la serie histórica sin comprometer los análisis estadísticos y climáticos subsecuentes.

3.2. Identificación de las fases del ciclo anual

La Figura 4 muestra el ciclo anual característico obtenido a partir de la mediana diaria de caudal (Ciclo_med, línea azul) y el ciclo anual suavizado (Ciclo_arm, línea negra) para las tres estaciones de aforo diario. Además, se sombreó el área comprendida entre el percentil 25 y 75 de la distribución diaria de caudal (sombreado rosa) para evaluar la dispersión respecto a Ciclo_arm. Las líneas punteadas verticales representan los

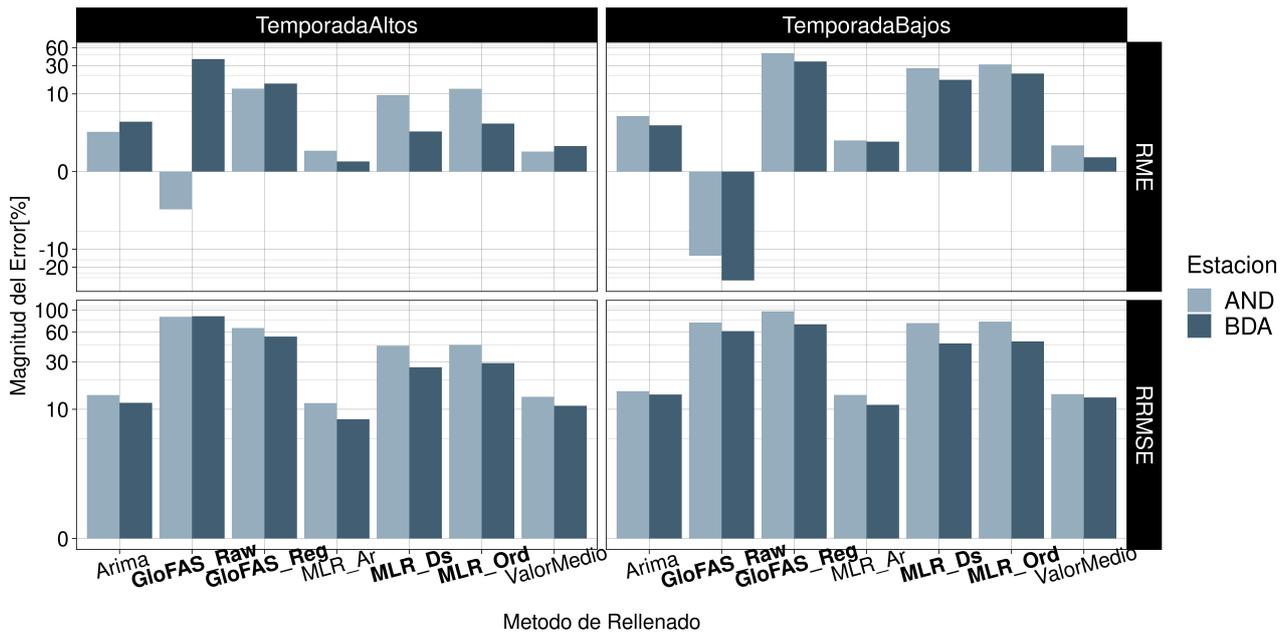


Figura 2: RRMSE (paneles inferiores) y RME (paneles superiores) de los modelos evaluados para rellenar datos faltantes en la temporada de alto (paneles izquierdos) y bajo caudal (paneles derechos) de las estaciones AND y BDA (azul claro y oscuro, respectivamente). Los modelos en negrita son capaces de rellenar periodos continuos con faltantes. Se utiliza una escala de arcoseno hiperbólico para mejor visualización de los bajos errores.

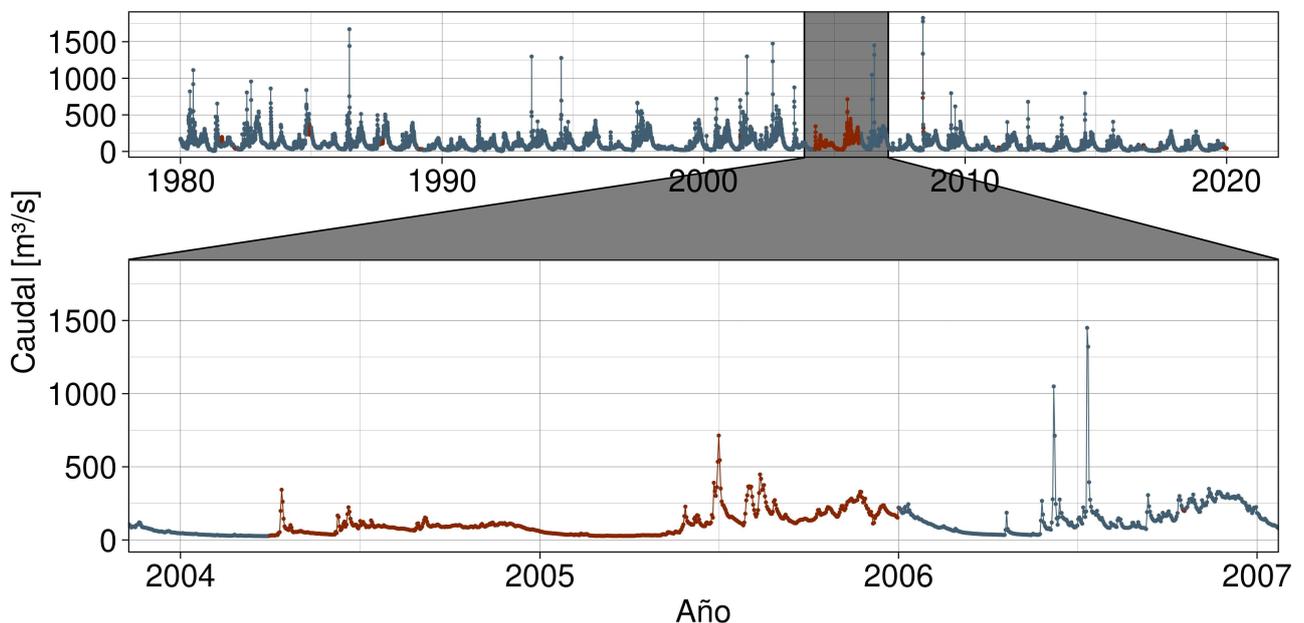


Figura 3: Serie temporal de la estación AND para el periodo de estudio. Los valores en rojo son datos faltantes que fueron rellenados con el método más adecuado. El panel inferior muestra ampliado el periodo comprendido entre el año 2004 y 2007.

quiebres identificados por los distintos test y la línea vertical negra marca la fecha promedio de cada quiebre.

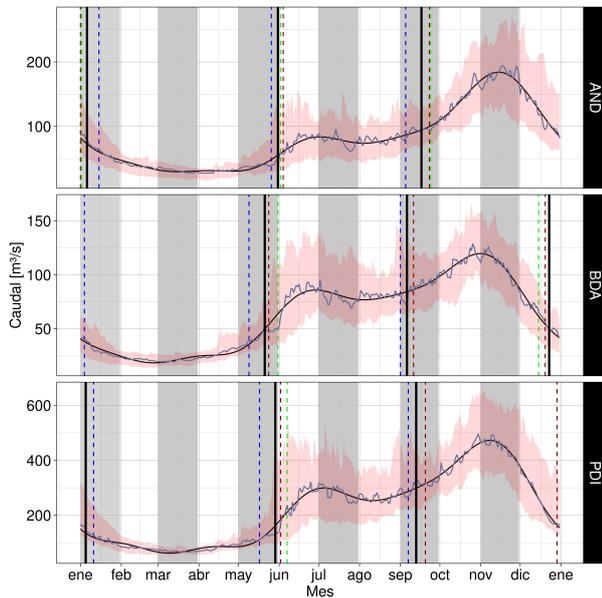


Figura 4: Ciclo_med (línea azul) y Ciclo_arm (línea negra) obtenidos a partir de caudales diarios. Área entre el percentil 25 y 75 de la distribución de caudales de cada día del año (sombreado rosa). Quiebres identificados por los test de Pettit (línea punteada azul), Buishand-R (línea punteada verde) y SNHT (línea punteada roja). Las líneas verticales negras muestran el promedio de las fechas de cada quiebre. Bandas verticales blancas y grises representan los 12 meses del año.

La metodología propuesta identifica claramente tres fases del ciclo anual, en total concordancia con el régimen pluvio-nival del curso. Puede observarse que en general tanto los ciclos anuales como las fechas de inicio de fases son muy próximas entre las estaciones de aforo, por lo que es plausible una generalización. En la Tabla III se muestran las fechas de inicio de cada fase del ciclo anual y su duración de acuerdo con la metodología propuesta. Así, la fase de mínimo caudal inicia entre fines de diciembre y principios de enero y se extiende hasta el inicio de la fase de máximo relativo a fines de mayo, siendo la fase más extensa con una

duración promedio de 146 días. La fase de máximo relativo tiene lugar hasta mediados de septiembre, donde inicia la fase de máximo absoluto que tendrá lugar hasta inicios del año siguiente. Las duraciones promedio de estas fases son de 109 y 111 días, respectivamente.

| | mínimo | | máximo relativo | | máximo absoluto | |
|-----|--------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| | Fecha inicio | Duración media [días] | Fecha inicio | Duración promedio [días] | Fecha inicio | Duración promedio [días] |
| AND | 06/01 | 145 | 31/05 | 109 | 17/09 | 111 |
| BDA | 23/12 | 149 | 21/05 | 108 | 06/09 | 108 |
| PDI | 05/01 | 144 | 29/05 | 107 | 13/09 | 114 |

Tabla III: Fecha de inicio y duración promedio de cada fase del ciclo anual obtenidos a partir de la metodología propuesta.

Dado que el objetivo del presente trabajo consiste en identificar los forzantes que modulan la variabilidad de baja frecuencia de los caudales en las distintas fases que componen el ciclo anual, se estimaron series interanuales de los caudales acumulados en trimestres completos contenidos dentro de cada fase. De esta manera, el caudal acumulado en el trimestre febrer-oabril (Fase_min) es representativo de la fase de mínimo caudal de los cursos de agua de la CRN, el de junio-agosto (Fase_int), representativo de la fase de máximo relativo y el del trimestre octubre-diciembre (Fase_max), de la fase de máximo absoluto.

3.3. Análisis de las series de caudal acumulado en fases

3.3.1. Tendencias y quiebres

La Figura 5 muestra las series interanuales de caudal acumulado trimestralmente, estimadas para cada estación y fase del ciclo anual de acuerdo al criterio de la sección anterior. También se muestran en líneas verticales las fechas identificadas por los distintos test de quiebre, junto con la recta de tendencia lineal, antes y después del quiebre.

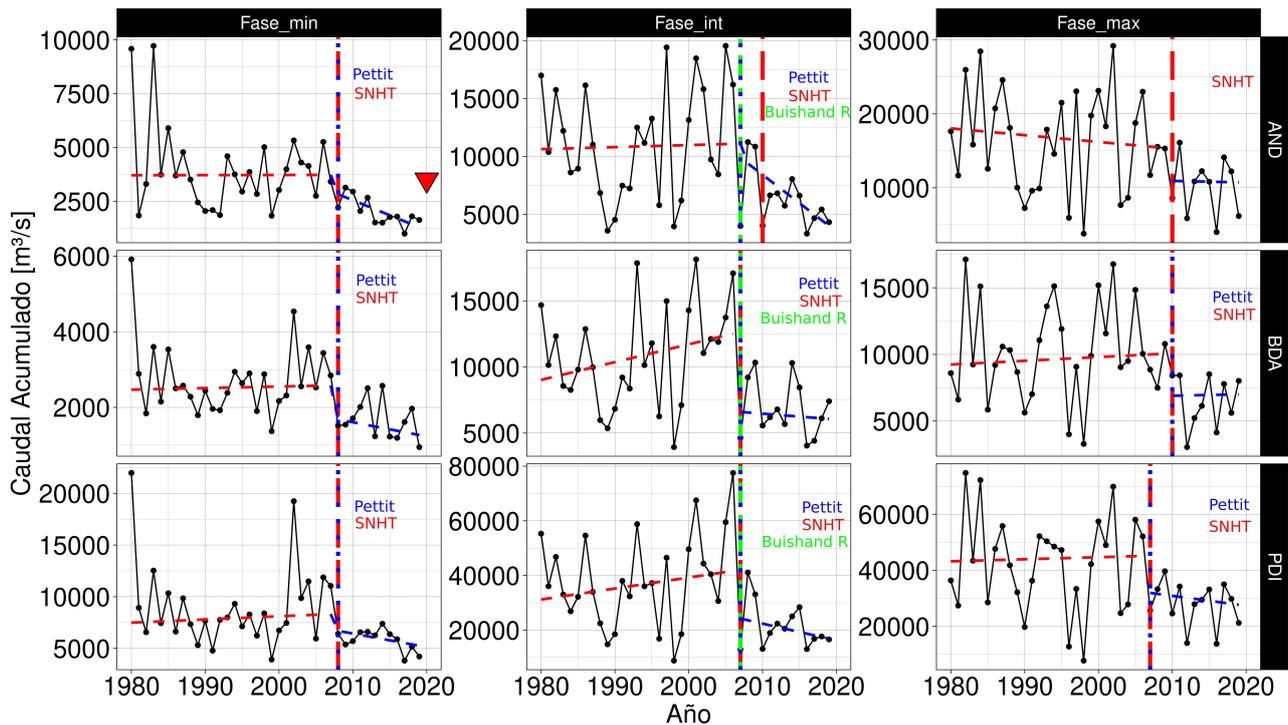


Figura 5: Series temporales de caudal acumulado en las distintas fases del ciclo anual (curva negra). Inhomogeneidades detectadas por las metodologías Pettit (línea vertical azul), Buishand-R (línea vertical verde) y SNHT (línea vertical roja). El texto en cada panel refiere a el/los test que identificaron un quiebre en cada serie temporal. Rectas de tendencia lineal antes y después del quiebre identificado (líneas discontinuas rojas y azules, respectivamente). El triángulo indica tendencia significativa al 90% de confianza.

La determinación objetiva de puntos de quiebre arrojó, con al menos dos de los tres test empleados, que las series de todas las estaciones y fases del ciclo anual presentan un quiebre entre el 2007 y el 2010. La excepción es la serie de AND en Fase_max, en la cual sólo SNHT identificó un quiebre. De esta forma, las series de Fase_min presentan un quiebre sincrónico en el 2008, las de Fase_int, un quiebre sincrónico en el año 2007 y las series de Fase_max un quiebre en el 2010 en AND y BDA y en el 2007 para PDI.

Puede advertirse una abrupta disminución de los caudales acumulados en todas las fases del ciclo anual luego del quiebre, indicando un salto del caudal hacia menores valores acumulados. En todas las estaciones de aforo las medias del caudal en las Fase_int y Fase_max mostraron

un desplome significativo después del quiebre. Por ejemplo, el valor medio de Fase_int muestra una reducción del 50% en el caudal de AND y el valor medio de Fase_max un descenso del 35% en el caudal de PDI. Cabe destacar que el valor exacto de la reducción porcentual del valor medio de AND mencionada puede variar ligeramente, debido a que la serie está afectada por el rellenado de los datos faltantes entre abril de 2004 y enero del 2006. A pesar de la gran relevancia que reviste el cambio abrupto en el régimen de caudal identificado, su estudio escapa a los objetivos del presente trabajo, por lo que será estudiado en futuros trabajos.

Respecto a las tendencias, resultaron mayoritariamente nulas en el período antes del quiebre (AQ) y negativas en el período posterior (DQ), aunque no significativas. La excepción es

la serie de AND en Fase_min durante el periodo DQ, donde resulta significativamente distinta de cero con un intervalo de confianza del 90% (ver tabla IV).

Teniendo en cuenta que la totalidad de las series mostraron un quiebre hacia menores valores entre los años 2007 y 2010 y que el objetivo del trabajo es el estudio de la variabilidad de los caudales acumulados en períodos homogéneos, en adelante se estudiarán las series correspondientes al periodo AQ. Se descarta el análisis de las series en el periodo DQ, ya que no resultan suficientemente largas para extraer conclusiones climatológicamente válidas.

3.3.2. Potencia espectral

En la Figura 6 se exhibe la potencia global de Wavelet de las series de caudal acumulado para las distintas fases del ciclo anual y estaciones consideradas. Se puede apreciar que para ningún aforo las periodicidades significativas son comunes entre las distintas fases. Es decir, la variabilidad de baja frecuencia de las series es distinta entre fases, a pesar de pertenecer al mismo aforo. Por otro lado, los espectros globales de cada fase mostraron una mayor similitud entre estaciones, aunque solo los espectros del caudal de Fase_max de PDI y BDA compartieron potencias significativas.

Las series de caudal acumulado en Fase_min, a pesar de exhibir un pico espectral en torno a 2,5 años, no muestran potencias significativamente distintas del espectro nulo en ninguna de las estaciones de caudal. Por su parte, los espectros de las series de Fase_int muestran semejanza entre aforos, ya que en las tres estaciones existe un pico de potencia en torno a 4 años, resultando significativo solo en la estación AND. Respecto a las series de Fase_max, las tres estaciones muestran un pico espectral en torno a 2,5 años, resultando significativo solo en la estación AND. Además, la estación BDA muestra potencias significativamente distintas del espectro nulo para periodicidades en torno a 6 y 8 años,

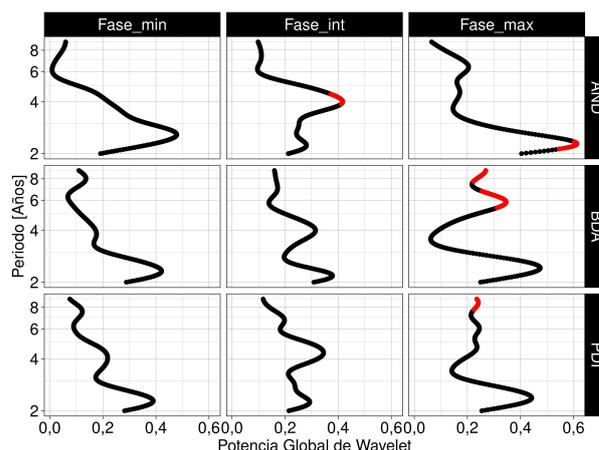


Figura 6: Potencia espectral global obtenida con la transformada de Wavelet de las series de caudal acumulado en las distintas fases del ciclo anual (línea negra). Potencias significativamente distintas del espectro nulo con una confianza del 90% (puntos rojos).

estando esta última señal también presente en la estación PDI.

3.3.3. Coherencia espacial y temporal

El panel superior de la Figura 7 muestra la matriz de correlación entre las series de caudal de las distintas fases del ciclo anual para cada estación de aforo. Debe resaltarse que se correlacionaron las series de distintas fases pertenecientes al mismo año hidrológico (considerando su inicio al comenzar la Fase_int). De este modo, para cada aforo, las series de caudal de Fase_min se correlacionaron con las series de las fases restantes desfasadas un año hacia atrás. Puede observarse que las series de Fase_max representan entre un 18 y 42% de la varianza de las series de Fase_int (coeficiente de correlación entre 0,43 y 0,65) y entre un 31 y 40% de las series de Fase_min (correlaciones entre 0,56 y 0,64). Asimismo, las series de Fase_int representan entre un 36 a 57% de la varianza de las series de Fase_min (coeficiente de correlación entre 0,6 y 0,76). Se evidencia así la necesidad de analizar de forma separada la variabilidad del caudal en las distintas fases del

| Caudal | | | Parámetro | | | |
|----------|----------|---------|------------------------------|---------------|-------|---------------|
| Estación | Fase | Periodo | Magnitud [m ³ /s] | valor p [M-K] | Cor | valor p [Cor] |
| AND | Fase_min | AQ | 0,52 | 1,00 | 0,00 | 0,96 |
| | | DQ | -139,76 | 0,03 | 0,68 | 0,01 |
| | Fase_int | AQ | 15,99 | 0,85 | 0,05 | 0,79 |
| | | DQ | -173,87 | 0,37 | 0,33 | 0,34 |
| | Fase_max | AQ | -91,66 | 0,67 | 0,08 | 0,67 |
| | | DQ | -22,38 | 0,86 | 0,08 | 0,84 |
| BDA | Fase_min | AQ | 4,04 | 0,80 | 0,06 | 0,76 |
| | | DQ | -37,58 | 0,54 | 0,28 | 0,38 |
| | Fase_int | AQ | 134,65 | 0,21 | 0,27 | 0,17 |
| | | DQ | -44,08 | 0,76 | 0,17 | 0,57 |
| | Fase_max | AQ | 28,10 | 0,64 | 0,11 | 0,55 |
| | | DQ | 11,25 | 1,00 | -0,10 | 0,78 |
| PDI | Fase_min | AQ | 30,86 | 0,80 | 0,05 | 0,80 |
| | | DQ | -131,17 | 0,19 | 0,48 | 0,11 |
| | Fase_int | AQ | 402,73 | 0,36 | 0,20 | 0,30 |
| | | DQ | -614,08 | 0,50 | 0,21 | 0,48 |
| | Fase_max | AQ | 73,40 | 0,93 | 0,02 | 0,90 |
| | | DQ | -353,53 | 0,67 | 0,19 | 0,54 |

Tabla IV: Magnitud de la pendiente de la regresión lineal, valor p del test de Mann-Kendall (valor p [M-k]), coeficiente de correlación de Spearman con la recta de regresión (Cor) y valor p del test de correlación de Spearman (valor p [Cor]) del caudal en las distintas estaciones de aforo y fases del ciclo anual antes y después del quiebre identificado (AQ y DQ, respectivamente). Los valores sombreados en gris corresponden a tendencias significativamente distintas de cero con una confianza del 90 %.

ciclo anual, ya que gran parte de la varianza de las series de una fase no es representada por las demás. Este análisis es consistente con las potencias espectrales de la sección anterior, donde en ninguna estación de aforo distintas fases comparten potencias espectrales significativas.

En el panel inferior de la Figura 7 se muestra la matriz de correlación entre las series de las distintas estaciones durante cada fase del ciclo anual. Puede observarse que en las tres fases existe una alta coherencia espacial. La estación PDI presenta el máximo valor de correlación con los demás aforos en todas las fases, indicando

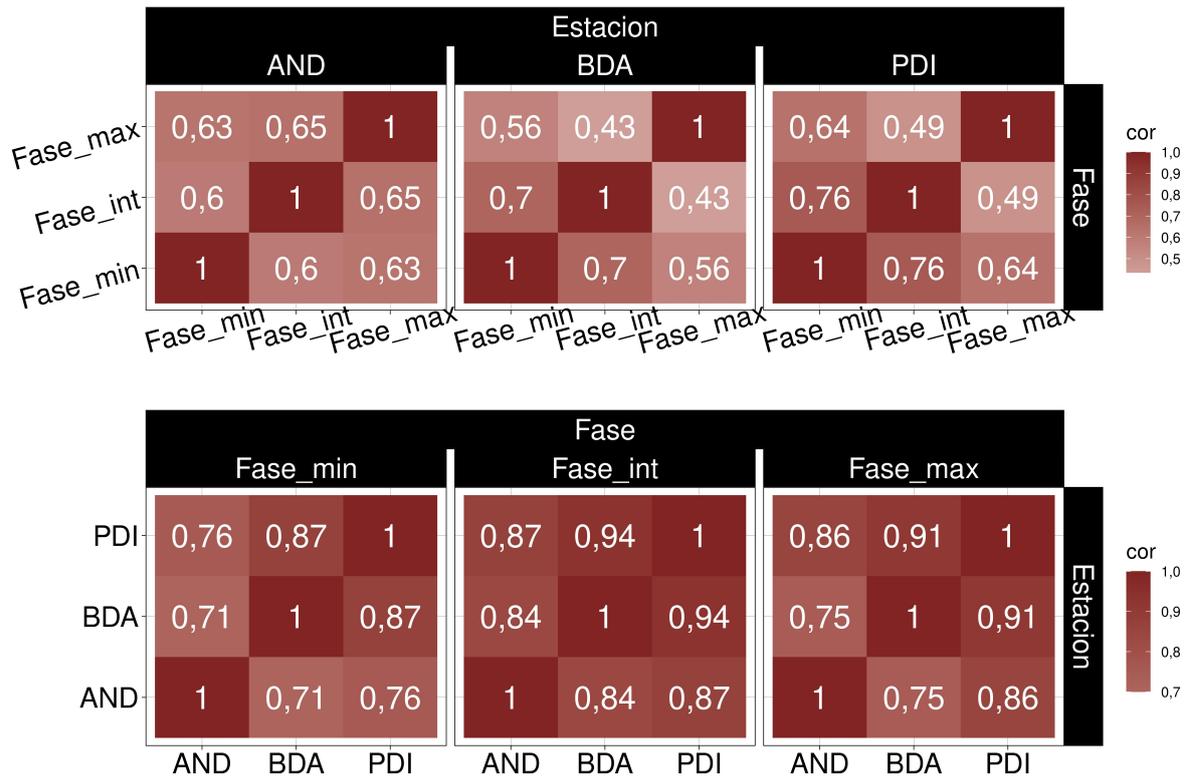


Figura 7: Matriz de correlación entre las series temporales de Fase_min, Fase_int y Fase_max, para cada estación de aforo (panel superior). Matriz de correlación entre las series temporales de AND, BDA y PDI, para cada fase del ciclo anual (panel inferior). Valores de correlación en color blanco, significativos al 90% de confianza. En todos los casos se consideraron las series en el periodo previo al quiebre.

que gran parte de la variabilidad de los caudales en la CRN en las distintas fases puede ser explicado por las series de PDI. Esto tiene sentido físico, dado que la subcuenca de PDI contiene a las subcuencas de las otras dos estaciones de aforo (ver sección 2.1 y Figura 1). En particular, las series de Fase_int y Fase_max de PDI representan más del 80% de la varianza de las series de BDA (coeficiente de correlación entre 0,91 y 0,94) y aproximadamente el 75% de las de AND (correlaciones entre 0,86 y 0,87). En consecuencia, para la exploración de forzantes se utilizarán las estaciones PDI y AND. La primera porque es la que mayor varianza representa de las otras dos estaciones y la segunda debido a que es la que menor varianza comparte con la primera.

3.4. Análisis de los potenciales forzantes del sistema acoplado océano-atmósfera

La Figura 8 muestra la correlación entre las series de caudal acumulado en las distintas fases del ciclo anual y los índices climáticos promediados trimestralmente para las estaciones AND y PDI. En las tres fases se correlacionó el caudal acumulado con los índices promediados en el trimestre representativo de cada fase y los 4 trimestres previos. También se muestran los trimestres para los cuales la CGW entre la serie de caudal y el índice climático resultó significativamente distinta de la distribución nula para un intervalo de periodicidades de 2 a 4 años, de 4 a 7 años y mayores a 7 años.

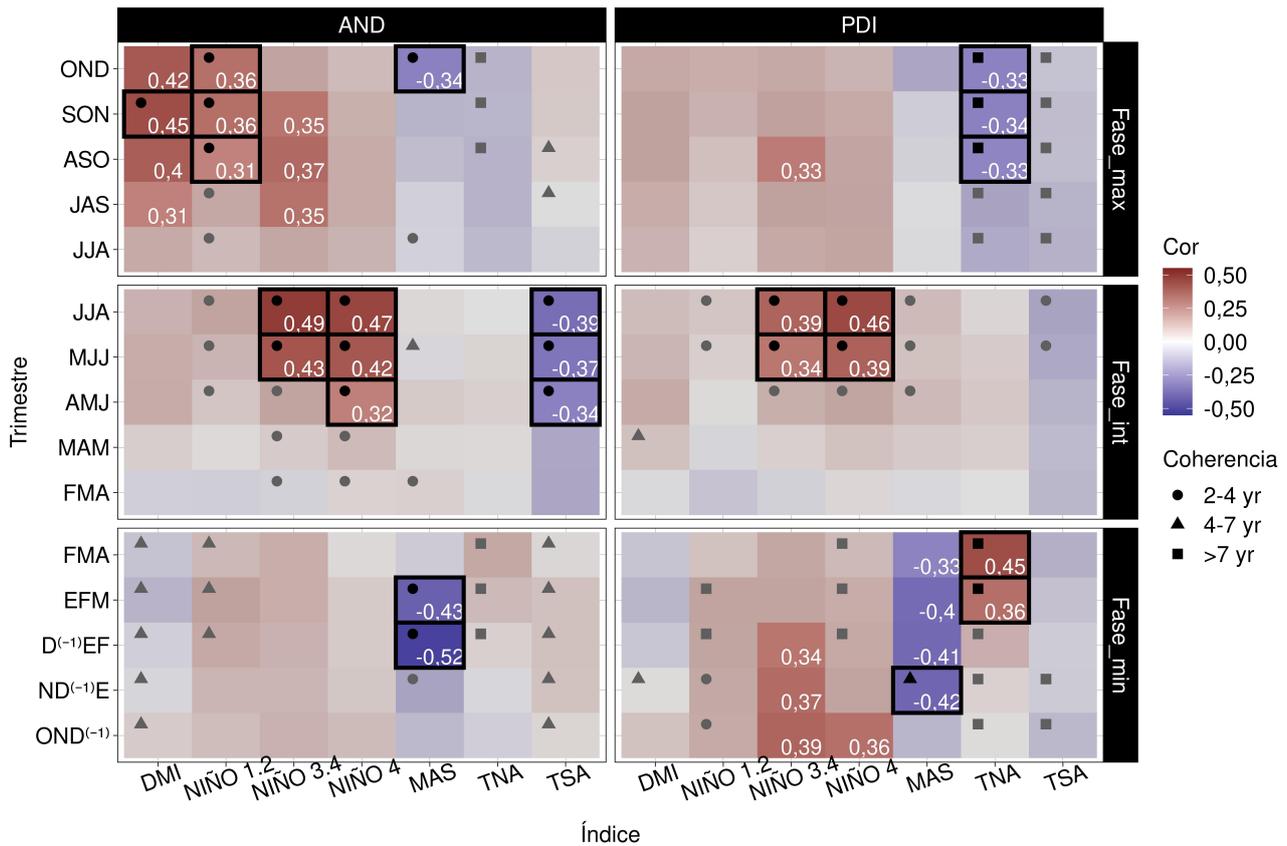


Figura 8: Correlación (en colores) entre las series de caudal acumulado en cada fase del ciclo anual de la estación AND (panel izquierdo) y PDI (panel derecho) y los índices climáticos promediados trimestralmente. Valores escritos en blanco indican correlaciones significativamente distintas de cero con un intervalo de confianza del 90%. Las figuras geométricas indican los trimestres en que la CGW entre la serie de caudal y el índice climático resultó significativamente distinta de la distribución nula con una confianza del 95% para periodicidades de 2 a 4 años (círculos), de 4 a 7 años (triángulos) y mayores a 7 años (cuadrados). Los trimestres en los que tanto la correlación como la coherencia mostraron relaciones significativas entre los índices climáticos y el caudal aparecen recuadrados en negro.

3.4.1. Fase_min

El caudal de Fase_min de las dos estaciones consideradas presentaron correlaciones negativas y coherencias significativas con el índice del MAS durante el verano previo, siendo ambas señales coherentes en periodicidades contenidas entre 2 y 7 años. Esto sugiere una relación entre mayor (menor) caudal acumulado en Fase_min y la ocurrencia de valores negativos (positivos) del índice del MAS. Asimismo, el caudal de PDI mostró correlaciones positivas y coherencias en periodicidades mayores a 7

años, significativas con el índice TNA en el propio trimestre y el previo. Esto sugiere una relación lineal, simultánea y directa de los caudales mínimos del río Neuquén con la TSM del Atlántico tropical norte entre enero y abril.

3.4.2. Fase_int

El caudal de ambas estaciones exhibió correlaciones positivas y coherencias en periodicidades de 2 a 4 años significativas con los índices Niño 3.4 y Niño 4 en el propio trimestre y el previo, evidenciando una relación

directa y simultánea entre la TSM del Pacífico central ecuatorial y el caudal en la Fase_int. De este modo, se insinúa una relación entre mayor (menor) TSM en el Pacífico ecuatorial y la ocurrencia de mayor (menor) caudal acumulado en el invierno. El caudal de la estación AND mostró también una señal estable de correlaciones negativas y coherencia en periodicidades de 2 a 4 años significativas con el índice TSA en el mismo trimestre y los dos anteriores. Esto es indicio de una aparente relación entre mayor (menor) caudal acumulado en la fase analizada y la ocurrencia de anomalías negativas (positivas) de TSM en el Atlántico tropical sur.

3.4.3. Fase_max

El caudal de Fase_max en la estación AND mostró correlaciones positivas y coherencia en periodicidades de 2-4 años significativas con el índice DMI del DOI en el trimestre SON. De esta manera, se encontró una relación estadísticamente significativa entre valores positivos (negativos) del índice DMI y acumulados mayores (menores) de caudal en Fase_max. También, el caudal de AND expuso correlaciones positivas y coherencia en periodicidades menores a 4 años con el índice Niño1.2 en el mismo trimestre y los dos trimestres previos. Además, durante el mismo trimestre OND se encontró correlación negativa y coherencia en periodicidades de 2 a 4 años con el índice del MAS. Al igual que en Fase_min, se sugiere una relación entre la ocurrencia de valores negativos (positivos) del índice del MAS y mayores (menores) acumulados en Fase_max.

Por su parte, el caudal de PDI mostró correlaciones negativas y coherencia en periodicidades mayores a 7 años con el índice TNA en el mismo trimestre y los dos anteriores. La Figura 9 muestra las series estandarizadas y filtradas con un filtro gaussiano de 8 términos del caudal acumulado en Fase_max de PDI y el índice TNA para los trimestres mencionados (previa eliminación de la tendencia lineal). En la figura puede identificarse la relación inversa

en todo el periodo que existe en baja frecuencia entre el índice y el caudal de Fase_max.

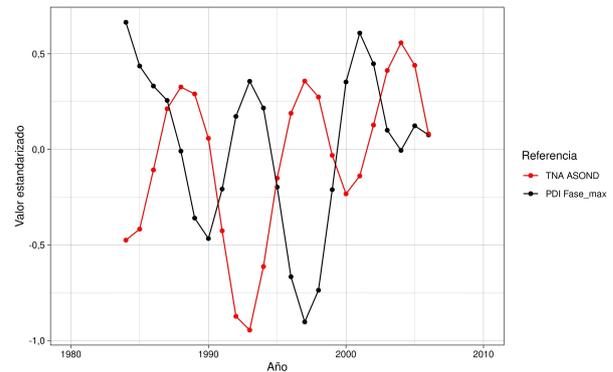


Figura 9: Series estandarizadas del caudal acumulado en Fase_max de la estación PDI (color negro) y del índice TNA del periodo ASOND con su tendencia lineal filtrada (color rojo). Ambas series fueron filtradas con un filtro gaussiano de 8 términos.

4. DISCUSIÓN

Del análisis de métodos de rellenado de datos faltantes se desprende que las regresiones lineales múltiples tienen el mejor desempeño en la CRN entre los métodos evaluados, por lo que los datos faltantes fueron rellenados con dicho método. Cabe destacar que no fue el objetivo de este estudio hacer un exhaustivo análisis comparativo del desempeño de la mayor cantidad de métodos de rellenado de datos de caudal utilizados en la bibliografía para la cuenca. Sin embargo, dicho análisis es imperioso debido a que el desempeño de los métodos de rellenado de datos en ciencias ambientales depende de factores tales como el ciclo anual, densidad espacial de datos y topografía, entre muchos otros (Li & Heap, 2011), y a que existe una gran variedad de diferentes métodos (ver diversos métodos de rellenado de datos de caudal en Lauro et al., 2015; Ismail et al., 2017; Sapliloglu & Kucukerdem, 2018; Hamzah et al., 2020, entre otros).

Las fases que componen el ciclo anual fueron identificadas a partir de una metodología objetiva basada en un análisis de puntos de

quiebre sobre un ciclo anual representativo, obtenido mediante los primeros armónicos de Fourier. La metodología no solo identificó las tres fases del ciclo anual, en total concordancia con el ciclo pluvio-nival del curso (Masiokas et al., 2019), sino que también permitió establecer una fecha de referencia de inicio y final de las mismas. De acuerdo a esta, la fase de mínimo caudal tiene lugar entre principios del año calendario y fines de mayo, cuando inicia la fase de máximo relativo que se extiende hasta mediados de septiembre. Por último, la fase de máximo absoluto inicia al finalizar la fase de máximo relativo y se extiende hasta principios del año calendario siguiente. La metodología propuesta no se limita a la variable caudal ni a la región de estudio, sino que puede ser utilizada en otras variables hidrometeorológicas como precipitación o temperatura y otras regiones de estudio, construyendo el ciclo anual a partir del mínimo número de armónicos que permitan describir el ciclo anual de la variable en cuestión.

Las series estimadas representativas de cada fase mostraron la presencia de un punto de quiebre hacia menores valores acumulados, entre los años 2007 y 2010. Esto es coherente con los trabajos de Bais (2017) y Masiokas et al. (2019), quienes señalan que el déficit de caudal ocurrido en los años posteriores a 2010 y 2007, respectivamente, solo se encuentran en registros de principios del siglo XX. Tal déficit no parece limitarse al caudal de los ríos de la Patagonia norte, ya que algunas cuencas andinas de Mendoza (Rivera et al., 2018, 2021) y Chile (Garreaud et al., 2017; Valdés-Pineda et al., 2020) sufrieron importantes sequías luego del año 2010, con serias implicancias económicas, sociales y ambientales. En ese sentido, la literatura documenta una sostenida reducción del manto de nieve y de los glaciares en los Andes patagónicos (Braun et al., 2019; Saavedra et al., 2018; Masiokas et al., 2008), mostrando una significativa aceleración en la reducción a partir del 2006 (Cordero et al., 2019). Esto permite elaborar la hipótesis de que los quiebres detectados entre 2007 y 2010 se podrían asociar a un cambio de régimen en la precipitación en

los Andes patagónicos, especialmente durante el periodo invernal, lo que redundaría en un cambio del régimen de caudales. Dada su relevancia, la naturaleza del quiebre identificado debe ser analizada de forma exhaustiva. No obstante, su estudio excede los objetivos del presente trabajo y será llevado a cabo en futuros trabajos.

Las series no mostraron tendencias significativamente distintas de cero en cada uno de los periodos homogéneos analizados, lo cual contrasta con Lauro et al. (2019), quienes hallaron que el caudal de primavera del río Neuquén presenta tendencia negativa y significativamente distinta de cero. Las diferencias pueden atribuirse a la inclusión en este trabajo de otra estación de aforo y a diferencias en los periodos de estudio, siendo que las series analizadas por Lauro et al. (2019) corresponden al periodo 1970-2011, de modo que concluyen próximas al año del quiebre encontrado. Dado que la presencia de un quiebre hacia menores valores puede inducir una tendencia negativa y significativamente distinta de cero (Hurtado et al., 2020), se evaluó la tendencia del periodo de estudio omitiendo la presencia del quiebre a fin de probar tal hipótesis. En la Figura 10 puede verse que al omitirse el quiebre, la totalidad de las series presentan tendencias negativas y significativamente no nulas. De este modo, el quiebre ocurrido entre el 2007 y 2010 induce una tendencia negativa y significativa al 95 % de confianza, aunque espuria. Esto ratifica lo establecido por Masiokas et al. (2019), quienes atribuyen la tendencia negativa del caudal histórico de la región de estudio a la década más seca de su serie histórica, que tuvo lugar entre 2006 y 2015.

El estudio de los forzantes de la variabilidad del caudal de Fase_min arrojó una relación inversa con el índice del MAS del verano previo. Este resultado coincide parcialmente con Rivera et al. (2018), quienes encuentran una relación directa entre tal índice en escala decadal y la ocurrencia de condiciones hidrológicas más secas

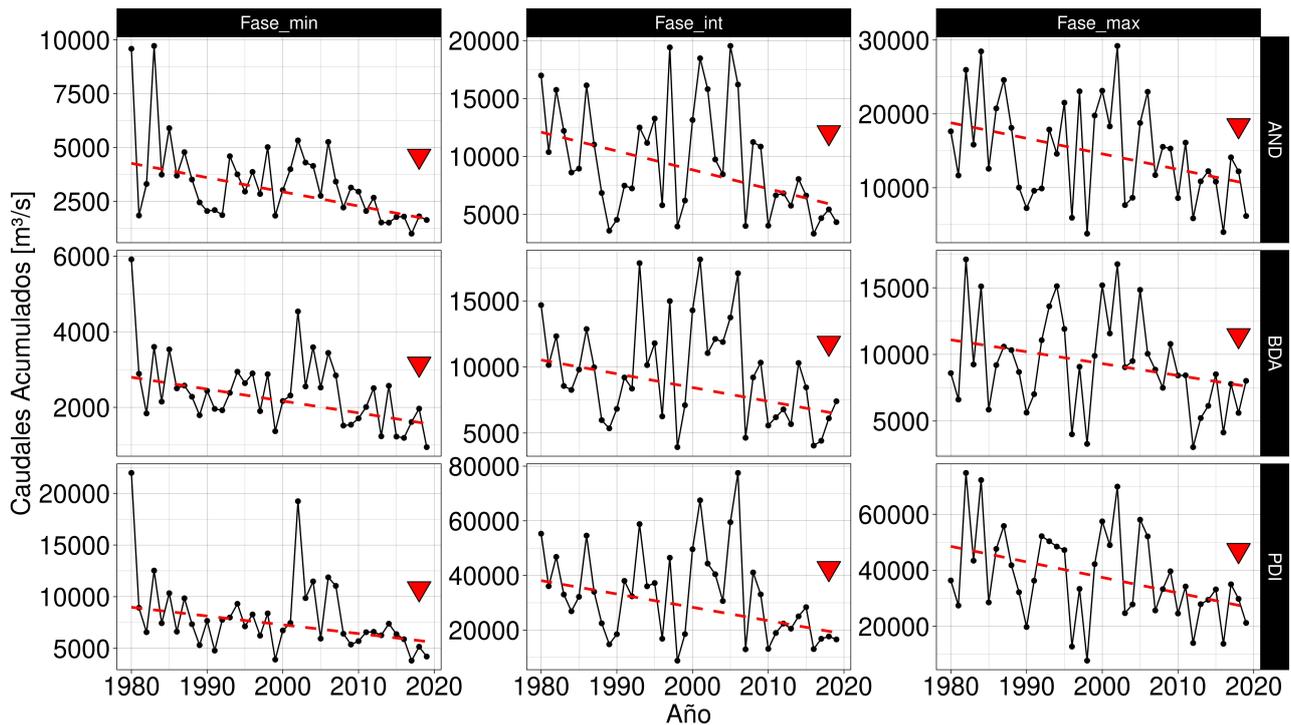


Figura 10: Series de caudal acumulado en las distintas fases del ciclo anual (línea negra) y rectas de regresión de Theil-Sen (líneas discontinuas rojas) omitiendo la presencia del quiebre en la serie. Los triángulos rojos indican tendencias significativamente distintas de cero al 95 % de confianza.

en la región, mientras que la relación hallada en este trabajo es en mayor frecuencia. Además, se encontró una relación negativa y simultánea entre el caudal de Fase_max y el índice del MAS, en total concordancia con Lauro et al. (2019). La fase negativa (positiva) del MAS está asociado a flujo de los oestes incrementado (debilitado) en latitudes medias (Fogt & Marshall, 2020), que modula la propagación de los transientes baroclínicos (Carvalho et al., 2005; Reboita et al., 2009), los cuales generan gran parte de la precipitación en la región. En este sentido, es posible que el MAS module a través de los transientes baroclínicos el caudal en la región, aunque para afirmar esto es necesario un mayor estudio dinámico.

Se hallaron relaciones directas en escala interanual entre los índices centrales del evento ENOS y el caudal de Fase_int y entre el índice Niño1.2 y el caudal de Fase_max, para

los mismos trimestres y los previos. Esto resulta coherente con las potencias espectrales significativas encontradas en este trabajo en torno a 4 años para la Fase_int y a 2 años en Fase_max, siendo las periodicidades características del ENOS (Torrence & Compo, 1998). Estos resultados también concuerdan con Compagnucci y Araneo (2007), quienes detectan una relación simultánea entre el caudal del río Neuquén y el índice Niño3.4. Además, concuerdan con Berri et al. (2019), quienes muestran una relación lineal y directa entre la ocurrencia de eventos El Niño (La Niña) y anomalías positivas (negativas) de caudal medio mensual del río Neuquén, siendo estas máximas durante el pico de mitad del año.

El caudal de Fase_max mostró una relación directa en escala interanual con el índice DMI del DOI el trimestre previo, de modo que valores positivos (negativos) del DMI se asocian

a mayor (menor) caudal en la Fase_max. Esto es coherente con el pico espectral significativo en torno a 2 años encontrado en esta fase, ya que el DOI presenta una variabilidad cuasi-bienal (Behera & Yamagata, 2003). Este resultado coincide con Romero et al. (2014), quienes identifican mayor precipitación en la región de estudio durante la primavera bajo condiciones de DOI positivo. El modo en que el DOI impactaría en el caudal de la región es a través de ondas de Rossby cuasi-estacionarias forzadas producto del calentamiento anómalo de la cuenca del océano Índico (Reboita et al., 2021).

Por último, se identificó una relación inversa en baja frecuencia entre el índice TNA del océano Atlántico Norte y el caudal de Fase_max, coherente con la potencia espectral significativa en torno a 8 años identificada en las series de Fase_max, que es característica de la variabilidad del Atlántico (Enfield et al., 1999). Esta relación entre la TSM del Atlántico norte y el caudal de la región norte de la Patagonia es registrada por Masiokas et al. (2019), quienes detectaron una correlación negativa y significativa con el índice de la Oscilación Multidecadal del Atlántico. Sin embargo, en tal trabajo las correlaciones con el índice TSA no resultan significativas, mientras que en el presente estudio se hallaron relaciones inversas y significativas entre dicho índice y el caudal de Fase_int. Cabe destacar que la dinámica detrás de esta relación estadística encontrada no es trivial y debe ser explorada para determinar el modo en que el Atlántico impacta en el caudal del río Neuquén.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo llevó adelante una caracterización estadística de las series temporales del caudal del río Neuquén en las distintas fases de su ciclo anual usando datos de caudal medio diario del periodo 1980-2019, previa evaluación del mejor método de rellenado de datos para la región. También, se examinaron los potenciales forzantes del

sistema océano-atmósfera que modulan la variabilidad del caudal del río Neuquén en las distintas fases. Los principales resultados obtenidos se listan a continuación:

- Entre los métodos de rellenado de datos de caudal medio diario analizados, las regresiones lineales múltiples (MLR) resultaron las más adecuadas para la cuenca.
- La metodología objetiva propuesta para identificar las fases que componen el ciclo anual del curso permitió determinar las fechas de inicio y final de las tres fases que componen el ciclo anual pluvio nival del río Neuquén.
- Las series de caudal acumulado en las distintas fases del ciclo anual mostraron un quiebre o salto abrupto hacia menores caudales entre el año 2007 y 2010, alcanzando reducciones en el valor medio de hasta 50 % luego del quiebre.
- En los periodos homogéneos antes y después del quiebre, las series no mostraron tendencias significativas. Sin embargo, el quiebre induce una tendencia negativa y significativa al tomar el período completo, de naturaleza espuria.
- Las series temporales de cada fase mostraron buena coherencia espacial entre los distintos aforos estudiados, mientras que las series de las distintas fases mostraron variabilidad distinta entre sí.
- El caudal de la fase mínima mostró estar potencialmente modulado por el MAS y la TSM del norte del océano Atlántico tropical, mientras que el de fase intermedia por el ENOS y la TSM del sur del océano Atlántico tropical. Por su parte, el caudal de fase máxima exhibió estar influenciado por el ENOS, DOI, MAS y la TSM del norte del Atlántico tropical.

Este trabajo brinda información sobre el cambio del régimen hidrológico del río Neuquén y

su variabilidad, relevante para la gestión del recurso hídrico en un curso estratégico para la región que actualmente se encuentra bajo emergencia hídrica. Resta para futuros trabajos estudiar la dinámica climática subyacente a la variabilidad del caudal del río Neuquén, con el fin de determinar el modo específico en que los forzantes remotos identificados estadísticamente en este trabajo impactan tanto en el caudal como en el quiebre identificado.

Agradecimientos: El presente trabajo fue realizado en el contexto de una beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN), enmarcado en el proyecto PPID-UNLP G006 “Variaciones multiescala de la precipitación y sus extremos sobre Argentina y su relación con el almacenamiento de agua continental”. Los resultados de este trabajo forman parte de la tesis de grado de Lorenzo Ricetti, quien agradece a la Dra. Josefina Blázquez y al Dr. Pablo Luis Antico, jurado de la misma, por sus valiosas correcciones y comentarios. Los autores agradecen al Dr. Pablo Gabriel Zaninelli y a dos revisores anónimos, por la fructuosa discusión compartida durante el proceso de escritura de este manuscrito. También agradecen al proyecto PPID-UNLP G008 “Extremos húmedos y secos en Argentina. Análisis de los cambios proyectados para fines del siglo XXI”, por el apoyo financiero y a la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación por la provisión de los datos utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., ... & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change*, 155, 417-435.
- Alferi, L., Lorini, V., Hirpa, F. A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2020). A global streamflow reanalysis for 1980–2018. *Journal of Hydrology X*, 6, 100049.
- Araneo, D. C., & Compagnucci, R. H. (2008). Atmospheric circulation features associated to Argentinean Andean rivers discharge variability. *Geophysical Research Letters*, 35(1).
- Bais, F. M. (2017). Informe técnico final. Caracterización de sequías hidrológicas en cuencas de la patagonia de la república argentina. Facultad de Ciencias exactas, físicas y naturales, Universidad Nacional de Córdoba, p36. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/5100>.
- Behera, S. K., & Yamagata, T. (2003). Influence of the Indian Ocean dipole on the Southern Oscillation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 81(1), 169-177
- Berri, G. J., Bianchi, E., & Müller, G. V. (2019). El Niño and La Niña influence on mean river flows of southern South America in the 20th century. *Hydrological Sciences Journal*, 64(8), 900-909.
- Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., ... & Seehaus, T. C. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130-136.
- Campitelli, E. (2018). metr-visualización y manejo de datos meteorológicos. In Conferencia Latinoamericana sobre Uso de R en Investigación+Desarrollo (LatinR 2018)-JAIIO 47 (CABA, 2018).
- Carvalho, L. M., Jones, C., & Ambrizzi, T. (2005). Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. *Journal of climate*, 18(5), 702-718.
- Cerrudo, C. G., Díaz, G. M., Juárez, S. H., & Ferreira, L. J. (2017). Análisis de la relación espacio temporal entre la precipitación estimada por el satélite TRMM (3B42RT) y el caudal medio diario en la cuenca del Río Iguazú. *Meteorológica*, 42(1), 39-52.
- Chan, S. C., Behera, S. K., & Yamagata,

- T. (2008). Indian Ocean dipole influence on South American rainfall. *Geophysical Research Letters*, 35(14).
- Compagnucci, R. H., & Araneo, D. C. (2007). Alcances de El Niño como predictor del caudal de los ríos andinos argentinos. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(3), 23-35.
- Cordero, R. R., Asencio, V., Feron, S., Damiani, A., Llanillo, P. J., Sepulveda, E., ... & Casassa, G. (2019). Dry-season snow cover losses in the Andes (18–40 S) driven by changes in largescale climate modes. *Scientific Reports*, 9(1), 16945.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A., & Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7841-7848.
- Finessi, F. G. & Groch, D. (2018). Tesis de licenciatura. Estudio hidrológico de la cuenca alta del río Neuquén. Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue, p19. [http://rdi.uncoma.edu.ar/bitstream/handle/uncomaid/5825/Tesis%20Finessi%20%20Groch%20\(2018\).pdf?sequence=1](http://rdi.uncoma.edu.ar/bitstream/handle/uncomaid/5825/Tesis%20Finessi%20%20Groch%20(2018).pdf?sequence=1).
- Fogt, R. L., & Marshall, G. J. (2020). The Southern Annular Mode: variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(4), e652.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12), 6307-6327.
- González, M. H., & Vera, C. S. (2010). On the interannual wintertime rainfall variability in the Southern Andes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(5), 643-657.
- Grolemund, G. & Wickham, H. (2011). Dates and times made easy with lubridate. *Journal of statistical software*, 40(1), 1–25.
- Hamzah, F. B., Mohd Hamzah, F., Mohd Razali, S. F., Jaafar, O., & Abdul Jamil, N. (2020). Imputation methods for recovering streamflow observation: A methodological review. *Cogent Environmental Science*, 6(1), 1745133.
- Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier.
- Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., & Agosta, E. A. (2020). A multi-breakpoint methodology to detect changes in climatic time series. An application to wet season precipitation in subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 241, 104955.
- Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., Agosta, E. A., & Ricetti, L. (2021). Infilling methods for monthly precipitation records with poor station network density in Subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 254, 105482.
- Hyndman, R. J., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of statistical software*, 27, 1-22.
- Ismail, W. N. W., Zin, W. Z. W., & Ibrahim, W. (2017). Estimation of rainfall and stream flow missing data for Terengganu, Malaysia by using interpolation technique methods. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(3), 213-217.
- Labat, D. (2010). Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 269-278.
- Lauro, C., Vich, A., & Moreiras, S. M. (2015). 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. *Hydrological Sciences Journal*, 64(5), 607619.
- Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6(3-4), 228-241.
- Maraun, D., & Kurths, J. (2004). Cross wavelet

- analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11(4), 505-514.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of climate*, 16(24), 4134-4143.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., & Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern patagonia. *Global and Planetary Change*, 60(1-2), 85-100.
- Masiokas, M. H., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B. H., Toum, E., ... & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18-55 S) during the instrumental era. *Scientific Reports*, 9(1), 17879.
- Ng, W. W., Panu, U. S., & Lennox, W. C. (2009). Comparative studies in problems of missing extreme daily streamflow records. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(1), 91-100.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas - ORSEP (2020). Diques argentinos en realidad aumentada. Secretaria de Infraestructura y Política Hídrica. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/orsep-diques_argentinos_en_ra.pdf
- Pessacg N, Flaherty S, Solman S, Pascual M (2020) Climate change in Northern Patagonia: critical decrease in water resources. *Theoretical and Applied Climatology* (140), 807-822 .
- Pohlert, T., Pohlert, M. T., & Kendall, S. (2016). Package 'trend'. Title Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. Available at: <https://cran.r-project.org/package=trend>.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Raggio, G. A., & Saurral, R. I. (2021). Probable intensificación de las condiciones de déficit hídrico sobre la región del Comahue ante diversos escenarios de Cambio Climático. *Meteorológica*; 46; 1; 6-2021; 48-71
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. D. (2009). Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. *Revista Brasileira de Meteorológica*, 24, 48-55.
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Ferreira, G. W. D. S., Rehbein, A., ... & Souza, C. A. D. (2021). Impacts of teleconnection patterns on South America climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1504(1), 116-153.
- 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.
- Rivera, J. A., Otta, S., Lauro, C., & Zazulie, N. (2021). A decade of hydrological drought in Central-Western Argentina. *Frontiers in Water*, 3, 640544.
- Romero, P. E., & González, M. H. (2016). Relación entre caudales y precipitación en algunas cuencas de la Patagonia norte. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (36), 7-13.
- Romero, P. E., Gabarini E. M., González M. H. (2014). Características hídricas y climáticas del norte Patagónico. Tagliavini et al., eds. II Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos, 9-10. Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *The Cryosphere*, 12(3), 1027-1046.
- Sammur, C., & Webb, G. I. (2010). Leave-one-out cross-validation. *Encyclopedia of machine learning*. Springer, Boston, MA, pags 600-6001.
- Saplioglu, K., & Kucukerdem, T. S. (2018). Estimation of missing streamflow data using ANFIS models and determination of the number of datasets for ANFIS: the case of Yeşilirmak River.
- Scarpati, O. E., Spescha, L., Fioriti, M. J., & Capriolo, A. D. (2001). El niño driven climate variability and drainage anomalies in

- Patagonian region Argentina. Cuadernos de Investigación Geográfica, 27, 179-191.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American statistical association, 63(324), 1379-1389.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological society, 79(1), 61-78.
- Valdés-Pineda, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., & Pizarro-Tapia, R. (2020). The first drying lake in Chile: causes and recovery options. Water, 12(1), 290.
- Vich, A. I. J., Bizzotto, F., Vaccarino, E., Correas, M., Manduca, F., Paoli, C. U., & Malinow, G. V. (2010). Tendencias y cambios abruptos en el escurrimiento de algunos ríos con nacientes en la cordillera y serranías del oeste argentino. Criterios para la determinación de crecidas de diseño en sistemas climáticos cambiantes. Carlos Ubaldo Paoli et al. 1a ed.-Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral, 149-166.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., et al. (2019). Welcome to the tidyverse. Journal of open source software, 4(43), 1686.