

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**VARIABILIDAD MULTI-ANUAL DE CAUDALES EN RÍOS DE LA
CUENCA DEL PLATA**

Fernanda Maciel, Alvaro Díaz y Rafael Terra

*IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
fmaciell@fing.edu.uy, adiaz@fing.edu.uy, rterra@fing.edu.uy*

RESUMEN: Se analizó la variabilidad multi-anual de caudales de tres ríos en la cuenca del Plata: Paraná (1901-1999), Uruguay (1909-2007) y Negro (1908-2007), tanto en base anual como estacional. Para las series anuales, se utilizaron: el análisis de espectro singular (AES), el método de máxima entropía (MME), el método multi-taper y el análisis de wavelets, obteniendo patrones oscilatorios y componentes de baja frecuencia (CBFs). Se diagnosticó la relación entre estos modos y los de índices climáticos de escala global, Niño 3.4 y PDO (del inglés: Pacific Decadal Oscillation). Los siguientes resultados fueron significativos por lo menos al 90 %: 1) para los tres ríos, pseudo-períodos entre 2.5 y 6.5 años, probablemente asociados al fenómeno El Niño-Oscilación Sur; 2) para el Paraná y el Uruguay, CBFs asociadas a escalas temporales mayores a 30 años, y 3) para el Paraná y el Negro, cuasi-períodos entre 8 y 9 años. No se detectó un vínculo claro entre la señal de PDO y la de los ríos. Para las series trimestrales de los ríos, se usaron AES y MME. Los resultados presentan una clara estacionalidad. En los tres ríos, los pseudo-períodos entre 3.5 y 4 años aparecen principalmente entre la primavera y comienzo del verano. En el Uruguay, durante invierno y primavera se detecta un cuasi-período de 6 años. Tanto en el Negro como en el Uruguay se obtienen pseudo-períodos de entre 8.5 y 9 años, en invierno y otoño respectivamente. Todos los ríos presentan CBFs en alguna época del año, siendo muy notoria su presencia entre mayo y diciembre en el Paraná y, complementariamente entre diciembre y abril en el Uruguay. No se encuentran pseudo-períodos significativos mayores a 10 años para series anuales ni trimestrales.

ABSTRACT: Streamflow variability in multi-annual timescales was analyzed for three rivers in La Plata Basin: Paraná (1901-1999), Uruguay (1909-2007) and Negro (1908-2007), both for annual and seasonal time series. Singular spectral analysis (SSA), maximum entropy method (MEM), multi-taper method and wavelet analysis were used for annual series. Oscillatory patterns and low-frequency components (LFCs) were obtained. The relation between these variability modes and those of N3.4 and PDO indices was analyzed. The following results were significant at the 90 % level: 1) for all the rivers, pseudo-periods between 2.5 and 6.5 years, linked to El Niño-Southern Oscillation; 2) for Paraná and Uruguay, LFCs associated to timescales longer than 30 years, and 3) for Paraná and Negro, quasi-periods between 8 and 9 years. No clear connection was detected between PDO and river variability. For seasonal streamflow timeseries, SSA and MEM were used. Results show a clear seasonality. Pseudo-periods between 3.5 and 4 years appear in the second half of the year in all rivers, in particular between spring and early summer. In Uruguay River, a quasi-period of 6 years is found. In Negro and Uruguay rivers, pseudo-periods of 8.5-9 years appear in winter and fall respectively. All the rivers present LFCs at some time of the year. A conspicuous feature is the complementary appearance of increasing LFCs from May to December in Paraná River and from December to April in Uruguay River. No significant pseudo-periods above 10 years are found either for annual or seasonal timeseries.

PALABRAS CLAVES: caudales, pseudo-períodos, variabilidad multi-anual

INTRODUCCIÓN

En la región de la Cuenca del Plata la energía eléctrica de origen hidráulico tiene el más bajo costo y una muy alta participación en la oferta energética. Sin embargo, debido a que las series de caudales presentan un comportamiento irregular, existe actualmente una gran incertidumbre acerca de la disponibilidad de agua en las represas hidroeléctricas, particularmente en las diversas escalas multi-anales, dificultando las tareas de planificación energética a largo plazo.

Estudios anteriores (Robertson y Mechoso, 1998) sugieren la existencia de oscilaciones multi-anales y tendencias de largo plazo en el clima de la región, que constituyen una oportunidad para disminuir dicha incertidumbre, facilitando los procesos de toma de decisión y permitiendo una mejor gestión del riesgo asociado.

OBJETIVOS

1. Caracterizar la variabilidad multi-anual de caudales de ríos en la cuenca del Plata, tanto en base anual como estacional, determinando patrones oscilatorios y componentes de baja frecuencia.
2. Diagnosticar la relación entre los modos de variabilidad que así se detecten con índices climáticos de escala global, cuya variabilidad es conocida.

DATOS

Los datos que se utilizan para este estudio son los caudales mensuales de los ríos Negro (1908-2007), Uruguay (1909-2007) y Paraná (1901-1999), medidos en las represas de Rincón del Bonete y Salto Grande y en la localidad de Posadas, respectivamente (ver figura 1). Esta última se encuentra a unos 100 km aguas arriba de la represa de Yacyretá, y unos 290 km aguas abajo de la represa de Itaipú. Se trabaja con series anuales y trimestrales, considerando para estas últimas trimestres solapados. Se analizan también, con el propósito de encontrar potenciales vínculos entre los caudales y el clima global, los siguientes índices: (Niño 3.4, 1900-2007) y Pacific Decadal Oscillation (PDO, 1900-2008). En estos casos se utilizan mayoritariamente series anuales.



Figura 1.- Región de la Cuenca del Plata y lugares de medición de los caudales.

MÉTODOS

La determinación de los modos de variabilidad predominantes en escala multi-anual de series climáticas relativamente cortas, ha sido encarada recientemente a través de métodos modernos de análisis de series temporales.

Uno de estos métodos es el análisis espectral singular (AES, Ghil et al., 2002, Vautard et al., 1992), que se destaca de métodos espectrales clásicos en que construye auto-elementos “adaptados a los datos”, en vez de utilizar bases de funciones predeterminadas (ej., senos y cosenos), como el análisis de Fourier. Por ello, es más eficiente en extraer información de series de tiempo relativamente cortas y ruidosas, permitiendo aumentar la relación señal/ruido de la serie, separándola en componentes aditivos estadísticamente independientes, a saber: *tendencias* (no necesariamente lineales, denominadas en este artículo como “componentes de baja frecuencia (CBFs)”), *oscilaciones* (no necesariamente armónicas, y que pueden estar moduladas en amplitud y fase), y “*ruido*”.

A continuación se realiza una breve descripción del AES, para aclarar su aplicación en este trabajo. La utilización del método requiere, en primer lugar, la elección de un tamaño de ventana (M años), tomando en cuenta dos consideraciones: cantidad de información a extraer (mejor cuanto mayor sea M), y el grado de confianza estadística en dicha información (mejor cuanto menor sea M). Es recomendable realizar análisis con varios valores de M , y que no excedan la tercera parte de la longitud de la serie (Vautard et al., 1992). La persistencia de los resultados es una medida de la robustez de la señal presente en los datos. En este contexto, los CBFs son aquellos que presentan potencia espectral significativa en frecuencias menores a $1/M$ ciclos por año (o lo que es equivalente, en períodos mayores a M años).

A partir de los datos y del valor de M , el método construye una matriz de covarianza para hallar las funciones empíricas ortogonales (EOFs) o vectores propios, y los componentes principales (CPs) asociados. Los valores propios asociados son sometidos a un test de Monte Carlo (MC) de significancia estadística de la siguiente manera: se ajusta un proceso auto-regresivo de orden 1 (AR-1) a la serie de datos y se calculan sus respectivos valores propios. Con el fin de construir una distribución para cada uno de los M valores propios, se repite este procedimiento muchas veces (1000 en este caso), variando la componente aleatoria del AR-1. Luego se compara cada valor propio de la serie original con su correspondiente distribución de simulados, observando en qué percentil se encuentra. Cuando está por encima del percentil 95 %, se dice que tiene un nivel de significancia del 90 % (test de dos extremos). La razón por la que se compara la serie de tiempo con un AR-1 (o ruido rojo) se debe a que usualmente las series de tiempo climáticas presentan potencias espectrales mayores en las bajas frecuencias (Gilman et al., 1963, Ghil et al., 2002.) Para cada valor propio se estima una pseudo-frecuencia característica maximizando la correlación de su EOF asociado con una senoide.

Asimismo, el AES permite reconstruir la parte de la serie original asociada a uno o varios EOFs (se eligen aquellos cuyos valores propios alcancen un alto nivel de significancia, en general superior al 90 %), obteniéndose reconstruidos (RCs) de igual longitud que la serie original y que conserva la información de fase. Estos RCs tienen la propiedad de ser de banda espectral angosta. Se interpreta que estos RCs, o la suma de los que se elijan, tienen una mayor relación señal/ruido que la serie original.

Un método muy eficaz para determinar espectros de series de banda angosta, como los RCs, es el método de máxima entropía (MME, Vautard et al., 1992; Ghil et al., 2002), que logra disminuir en gran medida la aparición de picos espectrales espurios. Es un método paramétrico que se basa en aproximar la serie de tiempo por un proceso autorregresivo de orden M' (AR- M'). La elección de

M' es arbitraria y debe ser optimizada teniendo en cuenta que valores muy bajos suavizan demasiado el espectro y, por el contrario, valores muy altos incrementan el número de picos espurios, por lo que se recomienda que M' sea menor a la mitad de la longitud de la serie (Ghil et al., 2002). Este método no tiene asociado un test de significancia estadística.

En este estudio se ha utilizado extensamente AES seguido del ajuste de los EOFs con sinusoides, o AES seguido por la aplicación de MME (AES-MME) a los RCs asociados a los valores propios de mayor significancia estadística. Para las series anuales se han utilizado, además, otros métodos para analizar la robustez de los resultados, que son brevemente descritos a continuación.

Un método no-paramétrico de análisis espectral alternativo al AES es el método multi-taper (MMT, Ghil et al 2002, Vautard et al., 1992), que utiliza un conjunto de “tapers” (en vez de uno solo, como el periodograma clásico), logrando así reducir la varianza de las estimaciones espectrales. La elección del número de tapers (K) es un compromiso entre mayor resolución espectral y mayor reducción de la varianza. Para series de unos pocos cientos de puntos, se recomienda la elección de $K=3$.

Otro método de análisis espectral relativamente moderno es el análisis de wavelets (AW) (Torrence y Compo, 1998). Ésta es una herramienta adecuada para el estudio de series de tiempo no estacionarias que presentan múltiples escalas y ocurren en dominios temporales finitos. A pesar de que utiliza bases de funciones predeterminadas, la ventaja que posee frente al análisis de Fourier clásico es que permite no sólo identificar oscilaciones significativas con períodos dominantes sino también localizar temporalmente su ocurrencia.

RESULTADOS

Series anuales

Se considera el año calendario para los ríos Negro y Uruguay, mientras que para el Paraná se considera el año de setiembre a agosto ya que el máximo de los caudales ocurre a principio de año (ver fig. 2). En el caso del índice Niño 3.4 sucede algo similar que con el Río Paraná, su máximo se da cerca de fin del año calendario, por lo que se decide considerar su serie anual de agosto a julio. Para el índice PDO, se considera el año igual al del Niño 3.4, de agosto a julio.

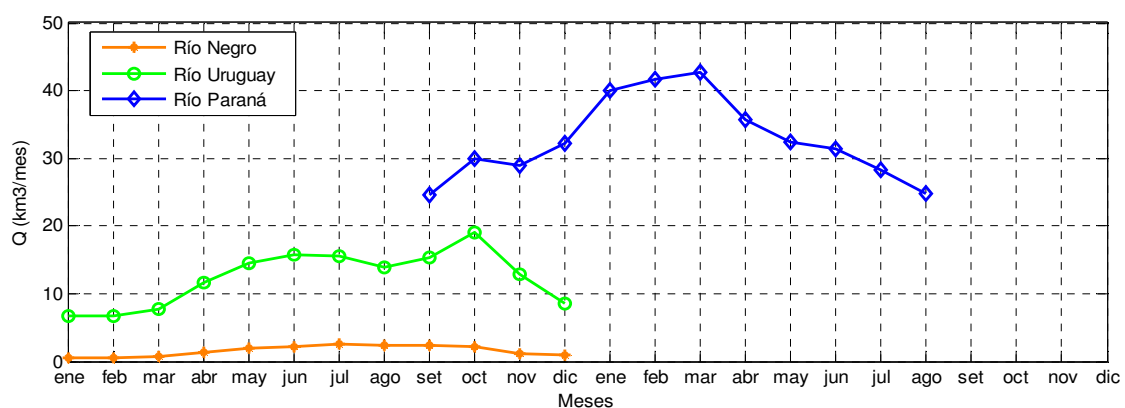


Figura 2.- Ciclos anuales de la media para los tres ríos.

AES, AES-MEM y MMT se utilizaron para obtener los pseudo-períodos dominantes y las CBFs de las series anuales de los tres ríos y de los índices globales. Los resultados obtenidos de las tres formas son esencialmente consistentes, y se presentan en la tabla 1, incluyendo para AES solamente los significativos en al menos un 90 % según MC.

Para la aplicación de AES (sólo o en conjunto con MME) se utilizaron, en cada caso, varios tamaños de ventana (M) (ver Sección 4): 15, 20 y 30 para los tres ríos y el índice Niño 3.4; y 20, 30 y 35 para el índice PDO, por tener una serie más larga, con lo que es posible detectar pseudo-períodos de mayor longitud.

Teniendo en cuenta lo mencionado, es posible evaluar la robustez de los resultados para cada serie desde dos puntos de vista: 1) al variar el valor de M en la aplicación de AES (columnas 2 y 3 de tabla 1), y 2) utilizando distintos métodos de análisis espectral, como se ilustra en la figura 3.

Los pseudo-períodos dominantes se encuentran en el rango de 2.5 a 6.5 años, pertenecientes a la escala de tiempo típica del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS). Se obtienen también, para los ríos Negro y Paraná, pseudo-períodos de aproximadamente 8 y 9 años. Un resultado muy robusto para los ríos, y que también está fuertemente presente en el Niño 3.4, es un pseudo-período de alrededor de 3.6 años. Las correlaciones entre el RC (asociado a dicho pseudo-período) del Niño 3.4 con el de cada río son altas para el Uruguay y Paraná (del orden de 0.7) y notoriamente más baja, aunque significativa, para el Negro.

Por otro lado, no parece haber un vínculo claro entre la señal de PDO y la de los ríos. Si aparece un pseudo-período común de 5.4 años entre PDO y Niño 3.4. Otro resultado relevante es que no se encuentran pseudo-períodos significativos mayores a 10 años. En cambio, es importante resaltar que todos los ríos presentan CBFs, asociadas a escalas temporales mayores a 30 años, y más robustas para el Uruguay y Paraná.

En la tabla 2 se muestra el porcentaje de varianza de las series originales explicado por la suma de los RCs de componentes significativas según MC. Para los ríos, se observa que se encuentra en el rango 25-35 %, y que participan entre 3 y 5 componentes de los RCs.

En la figura 4 se ilustran los RCs asociados a las CBFs para cada río, junto a sus series anuales crudas de anomalías. Para los ríos Uruguay y Paraná, los RCs presentan un leve mínimo en los años 50 y luego un crecimiento continuo hasta casi el final de los años de registro, donde presentan una leve tendencia a decrecer. En el caso del Río Negro parece haber un comportamiento similar, pero menos pronunciado. El porcentaje de varianza de la serie original explicado por los RCs es: 6.8 % para el Río Negro, 10.9 % para el Río Uruguay y 19.5 % para el Río Paraná.

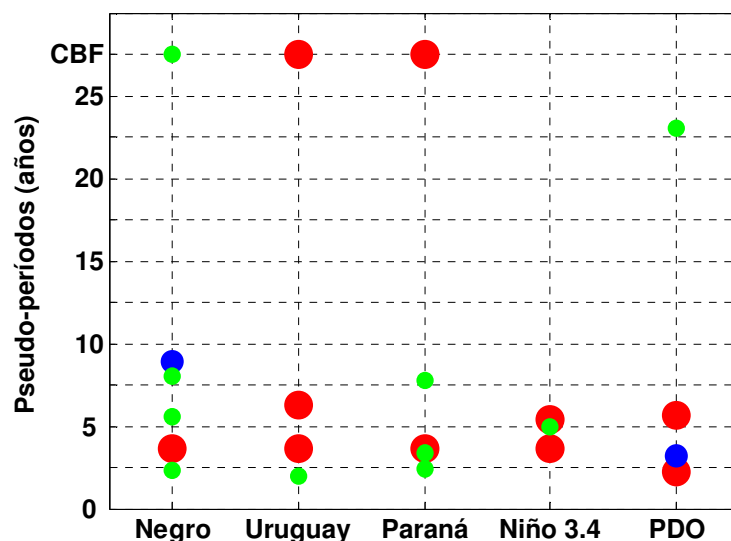


Figura 3.- Pseudos-períodos y componentes de baja frecuencia (CBFs) para las series anuales de los ríos e índices globales, analizadas con los métodos: AES, AES-MEM y MMT. El tamaño de los marcadores indica, en orden decreciente, si los resultados aparecen en 3, 2 o 1 de los métodos utilizados.

Tabla 1.- Pseudo-períodos (en años) y componentes de baja frecuencia (CBFs) de las series anuales, que se obtienen al aplicarles AES seguido del ajuste de una sinusoide a cada EOF, AES en conjunto con MME y MMT. En la columna 2 se presenta, entre paréntesis, el nivel de significancia según MC de los modos asociados a cada resultado. MME se aplicó solamente a los RCs de valores propios significativos (90 %) según MC. La utilización de negrita (negrita más delineación) en las columnas 2 y 3 indica cuándo el nivel de significancia es alcanzado para dos (tres) valores de M distintos. En la última columna se muestra el nivel de significancia (entre paréntesis) superado por cada resultado al utilizar el MMT.

	AES	AES-MME	MMT
Negro	3.6 (90%) 8.7 (90%) 9.1 (90%)	3.6 8.9 CBF	3.6 (99%) 2.3 (95%) 5.6 (90%) 8 (90%)
Uruguay	3.6 (90%) CBF (90%) 6.3 (90%)	6.2 CBF 3.6	3.6 (99%) 6.4 (95%) 2 (95%) CBF (90%)
Paraná	CBF (90%) 3.6 (96%)	CBF 3.6 3.4	3.6 (99%) 2.4 (99%) 7.8 (95%) CBF (90%)
Niño 3.4	5.4 (98%) 3.6 (96%)	5.6 3.6 5	5.3 (99%) 3.6 (95%)
PDO	5.7 (90%) 2.2 (90%)	5.7 2.2 23 3.2	5.4 (99%) 2.1 (95%) 3.2 (90%)

Tabla 2.- Porcentaje de varianza de las series anuales explicada por los RCs de los modos más significativos (igual o superior al 90 %) según MC. Se utilizaron tamaños de ventana M=20 para los ríos y M=30 para los índices globales.

Series anuales	% de varianza explicada por los RCs
Negro	25.4 RC de las componentes: (1, 2, 3, 4)
Uruguay	34.9 (1, 2, 3, 4, 5)
Paraná	29.2 (1, 5, 6)
Niño 3.4	26.4 (1, 2, 3, 4)
PDO	8.6 (3, 5, 14, 18)

Robertson y Mechoso (1998) analizaron, para el período 1911-1993, las series anuales de caudales promediados (y previamente normalizados) de los ríos: 1) Negro-Uruguay, y 2) Paraná-Paraguay, utilizando dos métodos: MMT y AES. Para el primer caso (Negro-Uruguay) obtuvieron modos de variabilidad predominantes en escalas de tiempo de ENOS, alrededor de 3.5 y 6 años. Para el segundo caso (Paraná-Paraguay) también encuentran variabilidades en escalas de tiempo de ENOS, pero las más dominantes son: una tendencia no-lineal (CBF, con período mayor a 40 años), y un pseudo período cercano a 9 años. Si bien en este estudio se consideraron los ríos Negro, Uruguay y Paraná individualmente, los resultados obtenidos son consistentes con los de Robertson y Mechoso (1998).

Los resultados de la figura 3 se pueden comparar con los obtenidos mediante AW (ver figura 5). Se debe considerar que el AW permite determinar la variación temporal de la potencia espectral en un período dado. Para el Río Negro (figura 5, panel superior) los resultados significativos aparecen de forma intermitente a lo largo de los años de registro. Los períodos asociados van desde alrededor de 4 a 8 años, en concordancia con los pseudo-períodos obtenidos al aplicar los demás métodos. Los resultados para los ríos Uruguay y Paraná también son consistentes con los obtenidos anteriormente (figura 3). Para éste último se aprecia (figura 5, panel inferior) que se alcanzan potencias espectrales significativas solamente en las últimas décadas de registro. Se hace notar, como indica el cono de

influencia, que la variabilidad asociada a escalas de tiempo mayores a 30 años no es capturada por este método debido a la longitud de las series de tiempo.

Cuando se considera el espectro global de wavelet, se obtiene que solamente el período de 3.6-3.8 años es significativo al 95 % para el Río Uruguay, mientras que para los otros ríos se acerca mucho a dicho nivel de significancia.

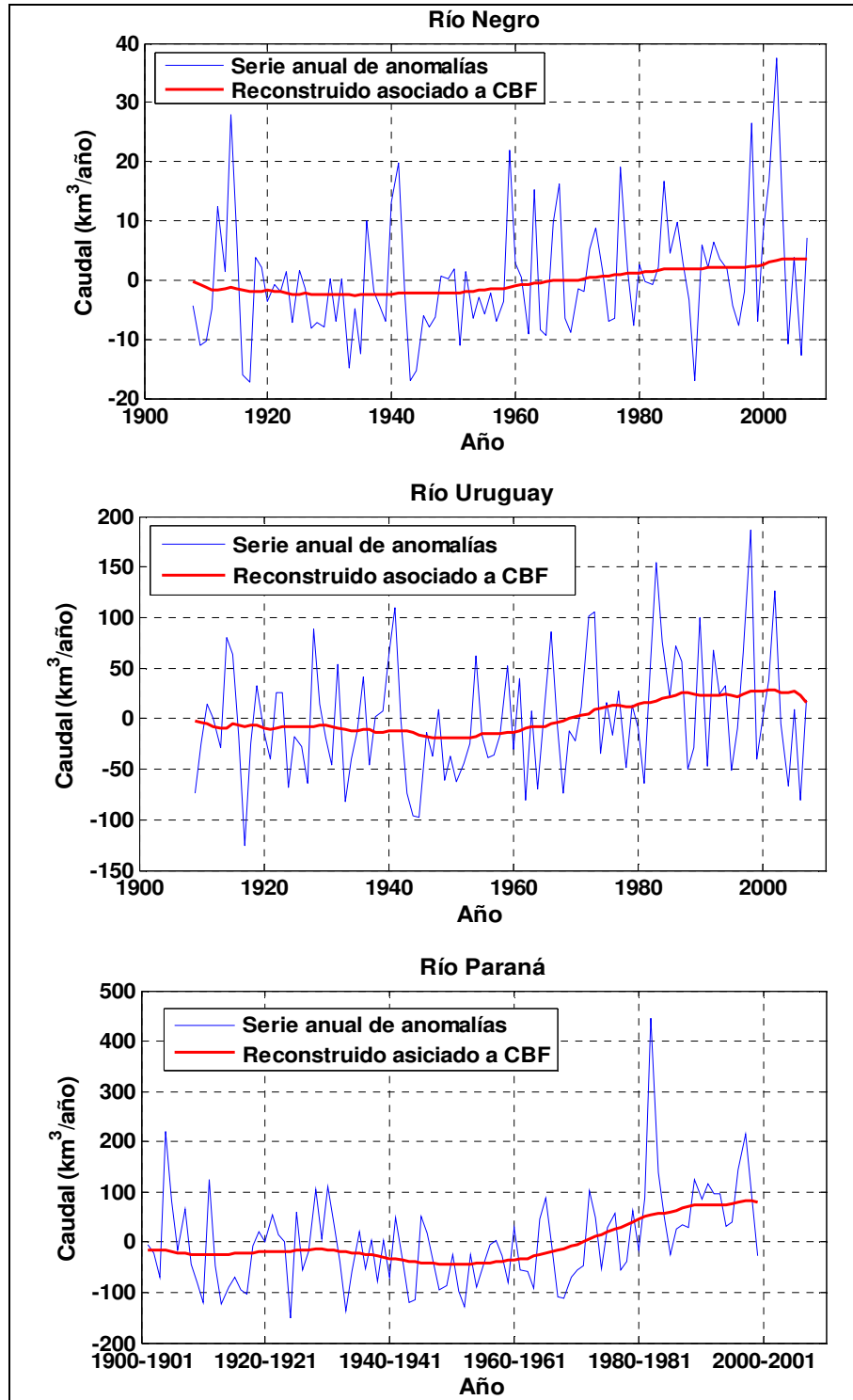


Figura 4.- Series anuales crudas de anomalías de los ríos y RCs asociados a componentes de baja frecuencia (CBFs). Los valores de M utilizados fueron: M=30 para el Río Negro y M=20 para los ríos Uruguay y Paraná. Los RCs del Río Negro y Uruguay están filtrados.

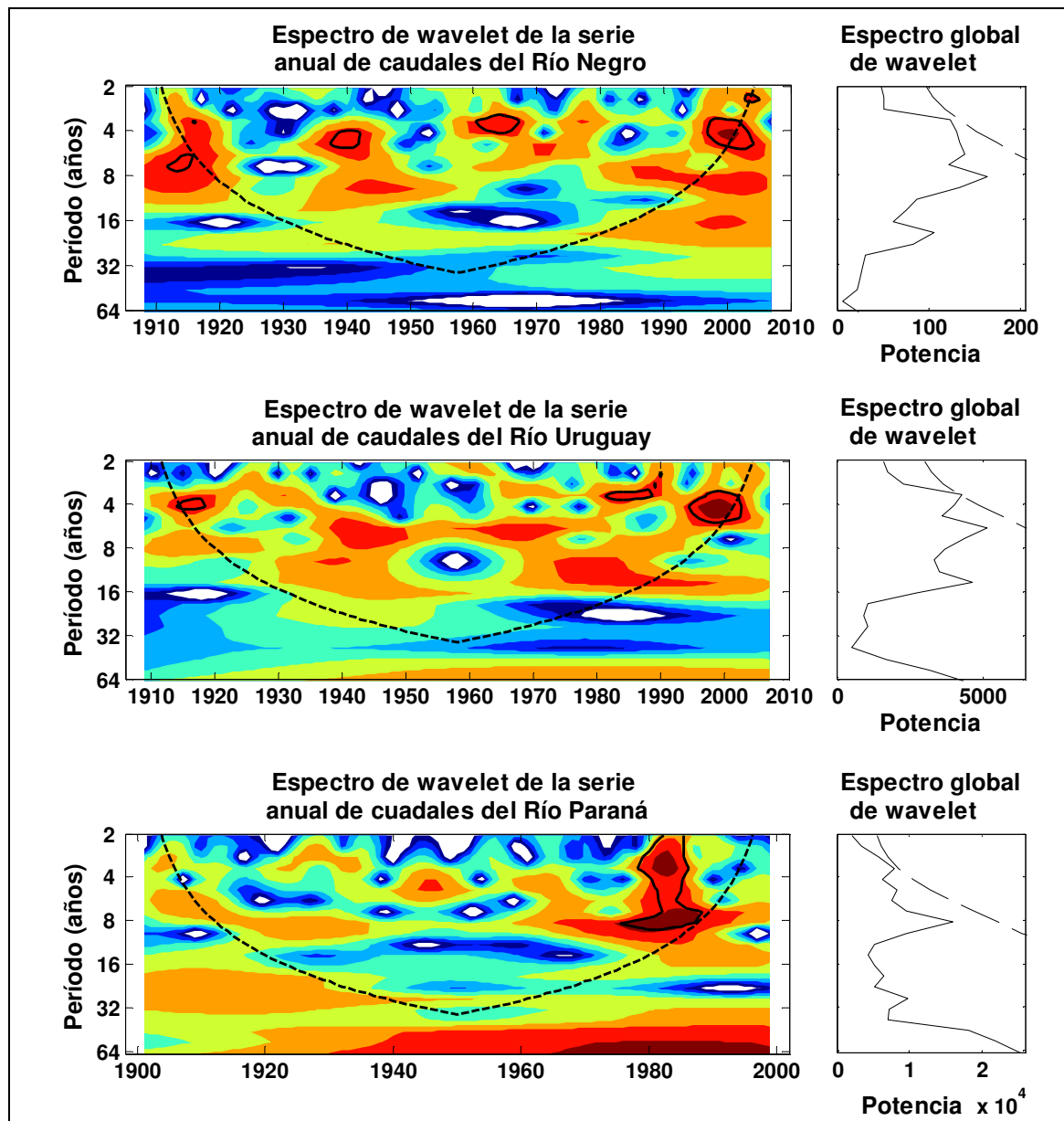


Figura 5.- Espectro de potencia de wavelet para las series anuales de los ríos (paneles a la izquierda). El nivel de significancia del 95 % está delimitado con trazo continuo, y en trazo punteado se presenta el cono de influencia que indica la región en la que los resultados son confiables. El espectro global de wavelet (paneles a la derecha) es el promedio temporal del espectro de wavelet para un período dado.

Series trimestrales

Para estudiar los patrones de variabilidad multi-anual presentes en el ciclo anual, se aplica AES y AES-MME a las 12 series de trimestres solapados de cada río. Los resultados de aplicar el segundo se presentan, para cada río, en las figuras 6 a 8.

Para el Río Negro (figura 6), pseudo-períodos entre 2.5 y 6 años ocurren principalmente en la segunda mitad del año. Los más dominantes (con mayor potencia espectral) se incrementan desde 3.5 años en el trimestre JJA a 5 años en DEF. En invierno aparecen modos aislados, asociados a pseudo-períodos de 8.5 años aproximadamente, mientras que a fines de primavera y en el verano, surgen CBFs.

Para el Río Uruguay (figura 7), los modos dominantes ocurren en invierno y comienzos de primavera (alrededor de 6 años), y entre fines de primavera mediados de otoño (CBFs). Aparecen

pseudo-períodos aislados cercanos a 8.5 y 9 años, pero a diferencia del Río Negro, éstos ocurren en otoño. También se presentan pseudo-períodos cercanos a 3.6 años (siendo el más dominante en primavera), y de 2 años concentrados principalmente en otoño-invierno.

Para el Río Paraná (figura 8), al contrario que para los ríos Negro y Uruguay, las CBFs aparecen en el otoño y persisten hasta principios del verano. Pseudo-períodos de 3.6 años aproximadamente aparecen entre fines de invierno y principios de verano.

Los pseudoperíodos entre 3.5 y 4 años aparecen en los tres ríos en la segunda mitad del año, con mayor claridad entre la primavera (SON) y comienzo del verano (NDE). En esta época del año es cuando la relación entre ENOS y la precipitación en la región es más fuerte (Ropelewski y Halpert, (1987, 1989)).

Los resultados son consistentes con los obtenidos en el análisis de las series anuales, y al igual que para éstas, no se encuentran pseudo-períodos significativos de más de 10 años.

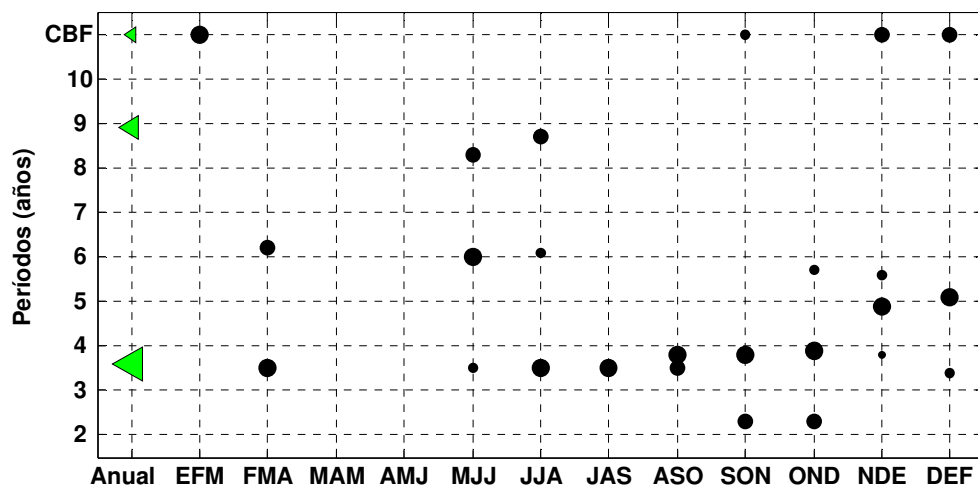


Figura 6.- Pseudo periodos y CBFs obtenidos al aplicarle AES (M=20 años)-MME a las series trimestrales del Río Negro. Se aplica MME solamente a los reconstruidos de AES asociados a componentes significativas en al menos un 90 %. El tamaño de los marcadores indica, en orden creciente, una mayor potencia espectral comparando los resultados de un mismo trimestre. Los indicadores triangulares de color verde son los resultados obtenidos anteriormente al aplicar AES-MME a la serie anual.

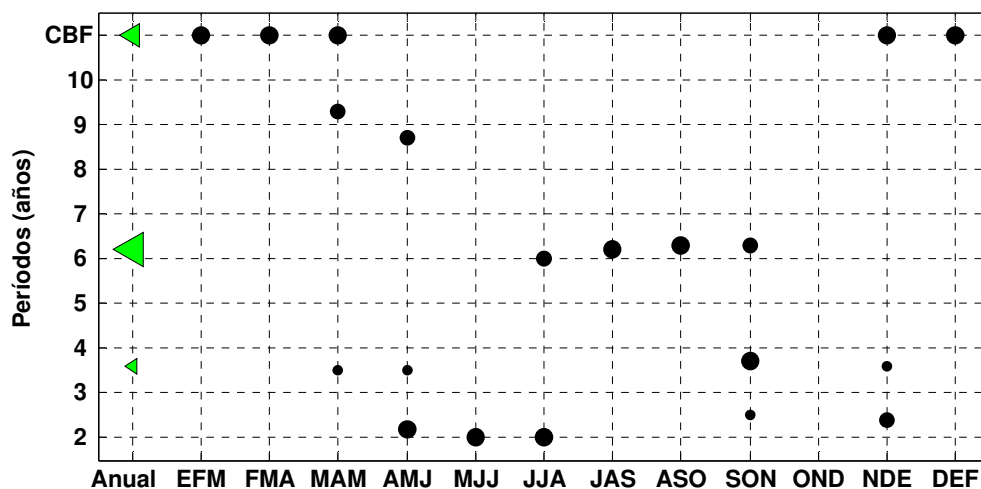


Figura 7.- Igual que la figura 6 pero para el Río Uruguay.

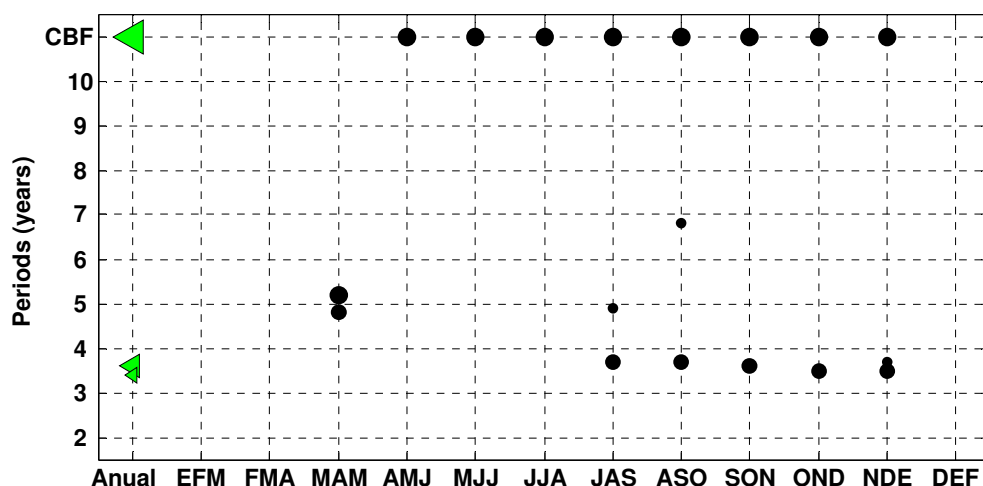


Figura 8.- Igual que la figura 6 pero para el Río Paraná.

Es importante notar que los principales resultados para los tres ríos presentan una clara estacionalidad. Por este motivo se analizan las series de tiempo de épocas del año que presentan CBFs o pseudo-períodos persistentes durante varios trimestres (por ejemplo, la serie de mayo a diciembre para el Río Paraná). Asimismo, como elemento de comparación, se analizan las series de tiempo que cubren el resto del año (ej. serie de enero a abril para el Río Paraná). Los resultados se presentan en la tabla 3, y son consistentes con los de las figuras 6 a 8.

Tabla 3.- Pseudo-períodos (en años) y CBFs obtenidos para series de los tres ríos en determinadas épocas del año (primera columna en cada caso). Se aplicó AES con $M=20$ y $M=30$; caracteres en negrita indican que el modo de variabilidad fue capturado por ambos tamaños de ventana. En la segunda columna para cada río se presentan los niveles de significancia según MC (solamente se incluyen resultados que superan el 90 %). Los resultados de la tercera columna para cada río se obtienen aplicando MME a los RCs de AES asociados a componentes significativos.

Serie del Río Negro	AES	AES-MME	Serie del Río Uruguay	AES	AES-MME	Serie del Río Paraná	AES	AES-MME
Dic-Feb	5.1 (95%) CBF (90%) 3.4 (90%)	5.1 CBF 3.4	Dic-Abril	CBF (98%)	CBF	Mayo-Dic	CBF (98%) 3.6 (98%)	CBF 3.7 8.5 3.5
Marzo-Nov	3.6 (95%) 8.8 (90%) 2.3 (90%)	8.8 3.6 2.3	Mayo-Nov	6.2 (95%) 3.6 (95%)	6.2 3.6	Enero-Abril	-----	-----
Junio-Enero	3.5 (92%) 2.3 (90%)	3.5 8.8 4.7 5.1 2.3	Julio-Oct	6.3 (99%) 3.6 (90%)	6.2 3.6	Ago-Dic	CBF (99%) 3.6 (99%)	CBF 3.6
Feb-Mayo	CBF (90%)	CBF	Nov-Junio	CBF (97%)	CBF	Enero-Julio	-----	-----

Una de las señales dominantes para las series trimestrales, y robustas para algunas de las series de la tabla 3, son los CBFs. Para cada río, en los trimestres que presentan CBFs dominantes (figuras 6 a 8), se obtienen los RCs asociados y se normaliza cada uno de ellos según la varianza de su serie original, permitiendo la comparación de los componentes al graficarlos juntos (ver figuras 9 a 11, paneles a la izquierda). Para todos los ríos predominan las anomalías negativas hasta los años 60 o 70, y a partir de los años 60 aproximadamente surge un patrón creciente, especialmente fuerte para el Río Paraná. Este río también presenta los mayores valores de varianza explicada, seguido por el Río Uruguay. También se hace notar, que para los ríos Uruguay y Paraná, la máxima varianza es alcanzada en la mitad de la época del año seleccionada (figuras 10 y 11, paneles a la derecha).

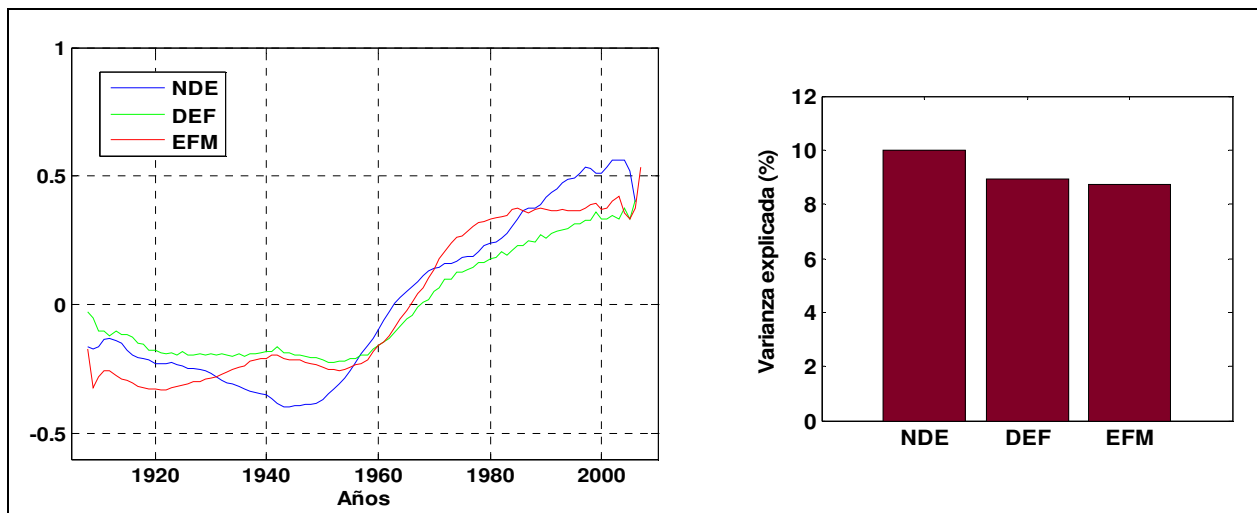


Figura 9.- Componentes adimensionadas de baja frecuencia de los trimestres seleccionados para el Río Negro. DEF and EFM están filtrados (panel izquierdo). Porcentaje de varianza de la series original explicada por su respectivo componente de baja frecuencia (panel derecho).

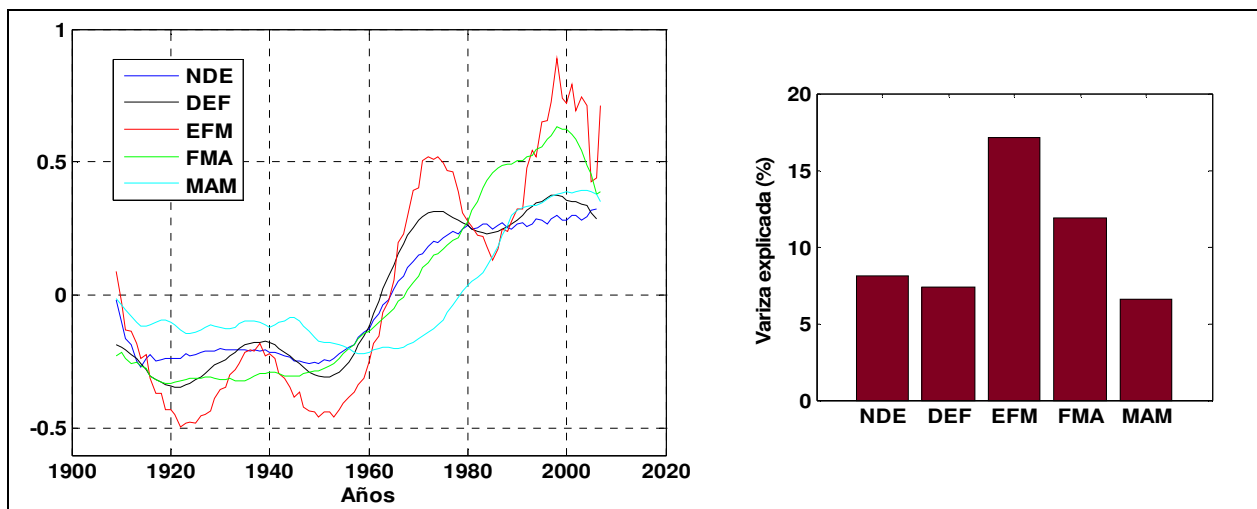


Figura 10.- Igual que la figura 9 pero para el Río Uruguay. Los componentes de NDE y MAM están filtrados.

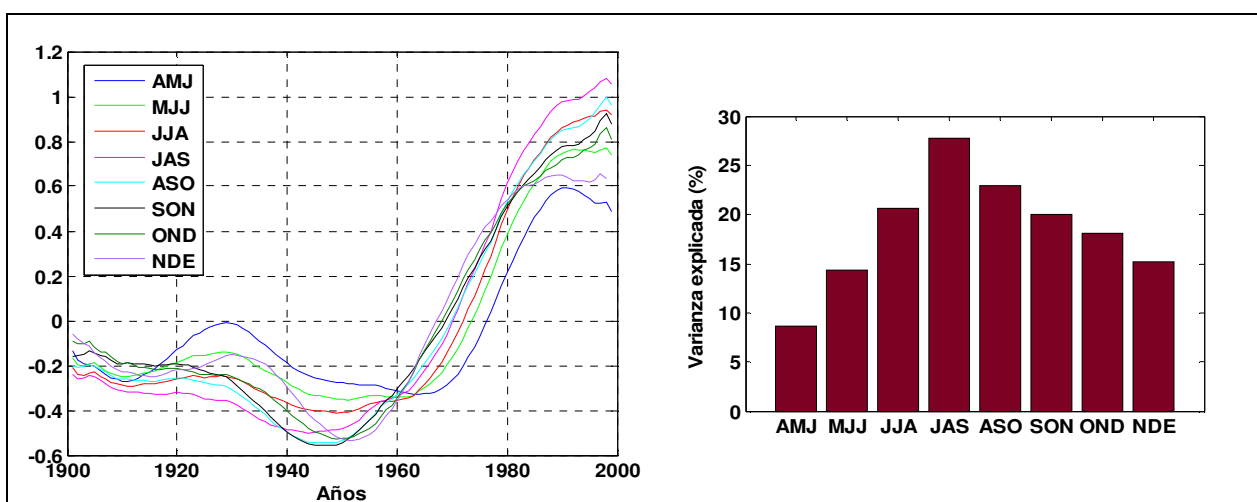


Figura 11.- Igual que la figura 9 pero para el Río Paraná. Todos los componentes están asociados al correspondiente primer valor propio (y además significativo en al menos un 90%) obtenido utilizando AES. Ningún componente está filtrado.

Como ilustración, en la figura 12 se muestran las series temporales observadas para mayo-diciembre y para enero-abril en el Río Paraná, así como el RC asociado a CBFs para la serie de

mayo-diciembre. Se aprecia el claro incremento de esta serie (mayo-diciembre) y su RC en las últimas décadas del registro, mientras que la serie de enero-abril no presenta ningún tipo de tendencia. Resultados similares se obtienen para las series diciembre-abril y mayo-noviembre del río Uruguay (no se muestran estos resultados).

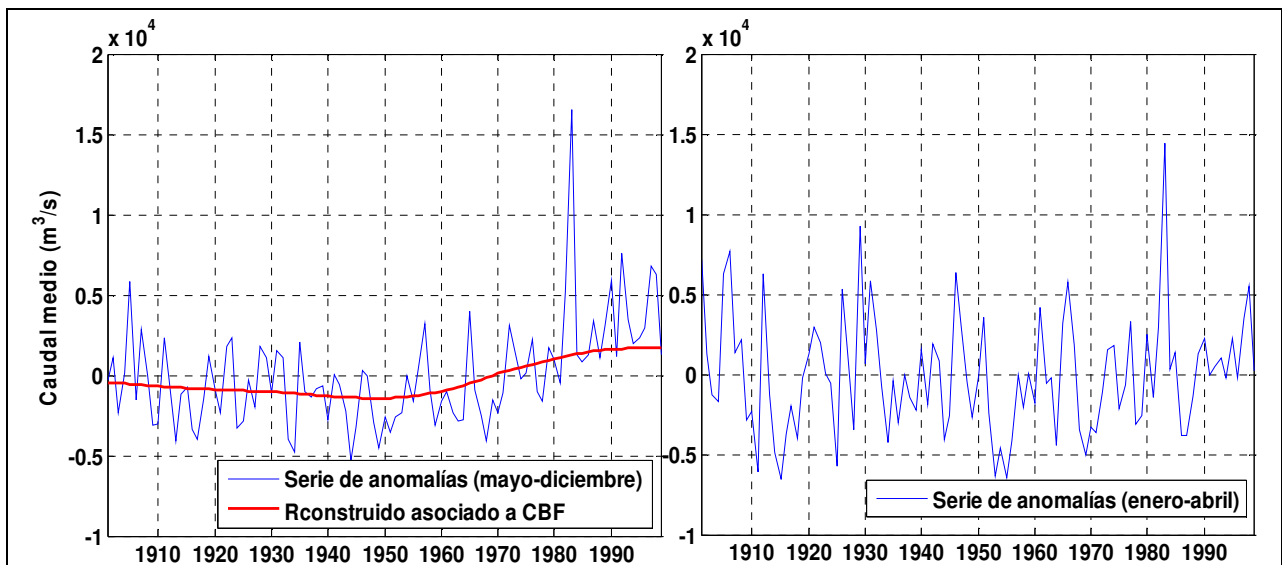


Figura 12.- Serie de anomalías de mayo-diciembre del caudal del Río Paraná y su reconstruido asociado a CBF (izquierda) y serie de anomalías de enero-abril del caudal del Río Paraná (derecha).

CONCLUSIONES

La variabilidad de los caudales anuales de los tres ríos estudiados presenta pseudo-períodos dominantes que van aproximadamente de 2.5 a 6.5 años, coincidentes con la escala del fenómeno ENOS. En particular es notable la presencia muy robusta (es decir, detectada por todos los métodos utilizados) de un cuasi-período de alrededor de 3.6 años en los caudales anuales de todos los ríos y también en el índice Niño 3.4. Se observa también la existencia de cuasi-períodos de aproximadamente 8 y 9 años para el Paraná y el Negro.

También surgen CBFs significativas al 90 % para los caudales anuales de los ríos Paraná y Uruguay. Las mismas están asociadas a variabilidad en escalas mayores que 30 años y son levemente crecientes, con una tendencia a decrecer en los últimos años registrados.

No se obtiene un vínculo claro entre los caudales de los ríos y el índice climático PDO.

Al analizar las series trimestrales de caudales de los ríos, se obtiene que los principales modos de variabilidad presentan una clara estacionalidad. En los tres ríos, pseudo-períodos entre 3.5 y 4 años aparecen en la segunda mitad del año, especialmente entre la primavera y comienzo del verano, que es el período en el que la precipitación de la región se ve más afectada por el fenómeno ENOS. En el Uruguay, durante invierno y primavera, se observa un cuasi-período de 6 años. Tanto en el Negro como en el Uruguay se obtienen pseudo-períodos de entre 8.5 y 9 años, en invierno y otoño respectivamente. Es muy notoria la presencia de CBFs entre mayo y diciembre en el Paraná y, complementariamente entre diciembre y abril en el Uruguay. Para el río Negro, las CBFs aparecen entre mediados de primavera y fines del verano. En todos estos casos, las CBFs son, como en el caso anual, crecientes con una leve tendencia al decrecimiento para los últimos años, siendo menos pronunciadas para el río Negro.

No se encuentran pseudo-períodos significativos mayores a 10 años para series anuales ni trimestrales de los ríos. Solamente la serie anual de PDO presenta un cuasi-período de 23 años,

aunque relativamente débil.

AGRADECIMIENTOS

La investigación que condujo a estos resultados fue financiada por el Programa Marco N° 7 de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) bajo el proyecto N° 212492 (CLARIS LPB: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ghil, M., M. R. Allen, M. D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, M. E. Mann, A. W. Robertson, A. Saunders, Y. Tian, F. Varadi y P. Yiou (2002). “Advanced spectral methods for climatic time series”. *Reviews of Geophysics*, 40, 1, doi: 10.1029/2001RG000092.

Gilman, D. L., F. J. Fuglister, and J. J. Mitchell (1963) “On the power spectrum of “red noise””. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20, pp. 182–184.

Robertson, A. W. y C. R. Mechoso (1998). “Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America”. *Journal of Climate*, Vol. 11, October 1998, pp. 2570-2581.

Ropelewski, C. F., y M. S. Halpert (1987). “Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño–Southern Oscillation”. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 115, pp. 1606–1626.

Ropelewski, C. F., y M. S. Halpert (1989). “Precipitation patterns associated with the high index phase of Southern Oscillation”. *Journal of Climate*, Vol. 2, pp. 268–284.

Torrence, C. y G.P. Compo (1998). “A Practical Guide to Wavelet Analysis”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, January 1998, pp. 61-78.

Vautard, R., P. Yiou and M. Ghil (1992). “Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic”. *Physica D*, Vol. 58, pp. 95-126, North-Holland.