

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS CAUDALES DE LOS GRANDES RÍOS Y DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA DEL PLATA

Carla Gulizia^{1,2,3}, Alexis Hannart², Inés Camilloni^{1,2,3}
gulizia@cima.fcen.uba.ar

¹ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA), Bs. As., Argentina.

² UMI IFAECI/CNRS-CONICET-UBA, Bs. As., Argentina

³ Departamento de Cs. de la Atmósfera y los Océanos (DCAO/FCEN-UBA), Bs. As., Argentina

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una caracterización estadística de la variabilidad temporal de la precipitación y los caudales de los principales ríos que conforman la Cuenca del Plata. En particular, se intenta profundizar el estudio de la relación entre ambas variables con especial énfasis en la amplificación de la variabilidad de baja frecuencia y el porcentaje de aumento observado en los caudales respecto al de la precipitación. Para ello, se consideran seis sub-cuencas (Paraguay, Pantanal, Uruguay, Iguazú, Paraná inferior y superior) con sus respectivos puntos de cierre (Pilcomayo, Ladario, Salto Grande, Salto Caxias, Paraná Timbúes e Itaipú). Se analizan los ciclos anuales para cada una de las décadas que conforman el período completo de estudio (1931-2010). Los resultados indican que la mayoría de las estaciones hidrológicas presentan cambios inter-decadales en el régimen de la onda anual de los caudales, mientras que en algunas ocurrieron modificaciones sólo en su magnitud. Se pudo observar también que a partir de la década del '70 los caudales han aumentado considerablemente. Todos los puntos de cierre presentan tendencias positivas significativas en los caudales, con un 95% de confianza, mientras que en el caso de la precipitación únicamente la cuenca del río Uruguay muestra un aumento significativo. El análisis de los valores obtenidos logró corroborar la amplificación de los cambios en los caudales correspondientes al período posterior a 1970, con un aumento de alrededor del 30%, frente a un incremento en la precipitación del 6% en la mayoría de las sub-cuencas. Más aún, a través de la aplicación de un filtro de medias móviles de 11 años sobre las series anuales normalizadas de caudales y precipitación, y la posterior cuantificación de la varianza explicada por las series filtradas, se verifica la mayor relevancia de la componente de variabilidad de baja frecuencia en los caudales (cerca del 45%) respecto de la precipitación (alrededor del 10%).

ABSTRACT

In the present study a statistical characterization of the temporal variability of precipitation and runoff derived from the main rivers of La Plata Basin is performed. In particular, it seeks to study further the relationship between the two variables with special emphasis on the amplification of low-frequency variability and the percentage of observed increase in river discharges compared to precipitation. For this purpose, six sub-basins (Paraguay, Pantanal, Uruguay, Iguazu, Lower and Upper Parana) are considered with their corresponding closing points (Pilcomayo, Ladario, Salto Grande, Salto Caxias, Parana Timbues and Itaipu). The annual cycles for each of the decades that comprise the complete study period (1931-2010) are analyzed. The results indicate that most of the hydrological stations present inter-decadal changes in the regime of runoff annual cycle, while in some watersheds only variations in magnitude have occurred. It was also observed that since the 70's river flows have been increasing considerably. All the closing points have presented significant positive trends in runoff, with 95% confidence, while in the case of precipitation only Uruguay River basin shows a significant increase. The analysis of the obtained values was able to confirm the amplification of changes in the

river discharges corresponding to the period after 1970, with an increase of about 30%, compared with an enhance in rainfall of 6% in most of the sub-basins. Furthermore, through the application of an 11 years-moving average filter over runoff and precipitation standardized annual series, and the subsequent quantification of the explained variance by the filtered time series, the greater relevance of the low-frequency variability in river flows (about 45%) with respect to precipitation (about 10%) was verified.

Palabras clave: Cuenca del Plata, caudales, precipitación.

1) INTRODUCCIÓN

El sudeste de Sudamérica (SESA) es altamente sensible a la variabilidad climática. Durante la segunda mitad del siglo XX, se han observado tendencias positivas significativas en la precipitación sobre un área extensa de SESA (Barros y otros, 2000; Re y Barros, 2009). Penalba y Robledo (2010) y Doyle y Barros (2011) han mostrado que dichas tendencias podrían ser explicadas principalmente por un aumento en la intensidad y frecuencia de eventos extremos de precipitación. Asimismo, se han observado aumentos significativos en las descargas de los ríos de la Cuenca del Plata (Genta y otros, 1998; Berbery y Barros, 2002) así como en la frecuencia de eventos de inundación (Camilloni y Barros, 2003), los cuales se han detectado también a comienzos del siglo actual.

Sin embargo, la precipitación y el caudal de los ríos han de relacionarse de forma compleja, dado que no todas las señales de precipitación se ven reflejadas en el caudal. En este sentido, la relación entre la variabilidad de ambas magnitudes se ve influenciada también por diversos factores tales como el tamaño de la cuenca, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, entre otros. Algunos estudios han mostrado que el porcentaje de cambio en las descargas de los ríos se ve amplificado respecto de la precipitación. En particular, Berbery y Barros (2002) analizaron los cambios ocurridos en la Cuenca del Plata entre dos períodos de 20 años (1951-1970 y 1981-1999) y encontraron que la precipitación se incrementó un 16%. Asimismo, los autores argumentan que, dado que a partir de 1950 se produjeron cambios considerables en el uso de suelo con un aumento en la agricultura a expensas de la vegetación (Tucci y Clarke, 1998), este aspecto podría haber contribuido a los cambios observados en los caudales, además de las variaciones en la precipitación. Más aún, agregan que el incremento en el almacenamiento de las presas no debería afectar en gran parte, dado que los cambios en la tasa de evaporación sobre la cuenca son relativamente pequeños debido a la superficie relativamente limitada de los embalses. Por otro lado, en ese mismo estudio se analizó la variabilidad inter-decadal de los caudales y se encontró un cambio del 35% entre los dos períodos de 20 años que analizaron para toda la Cuenca del Plata, así como también cambios consistentes separando en diferentes sub-cuencas (Uruguay, Paraná y Paraguay).

Dada la importancia de los impactos hidrológicos sobre la Cuenca del Plata, en el contexto de variabilidad y cambio climático, el presente trabajo se focaliza en la caracterización estadística de la variabilidad hidroclimática de la Cuenca del Plata, particularmente de baja frecuencia, y en avanzar hacia una mejor comprensión de la relación entre las dos variables de interés: precipitación y caudal de los principales ríos de la cuenca. En particular, se analizan 6 sub-cuencas: Paraguay, Pantanal, Uruguay, Iguazú, Paraná inferior y superior.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Se definieron seis sub-cuencas a través de la selección de distintas estaciones hidrológicas como puntos de cierre (provenientes del Operador Nacional do Sistema Eléctrico de Brasil y la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina) de acuerdo al área de captación de la precipitación en base a información topográfica. Las estaciones hidrológicas elegidas se basaron en los trabajos de Saurral (2010) y Saurral y otros (2013). Sin embargo, las sub-cuencas correspondientes al río Paraná se basan en puntos de cierre, en los cuales el período de medición está más restringido. Es por ello que para el

análisis de dichas cuencas se considerarán estaciones cercanas con las que se cuenta con información observada por un período más prolongado. Estas son Paraná Timbúes e Itaipú para la cuenca del Paraná Inferior y superior, respectivamente. La tabla I detalla la ubicación geográfica de cada estación hidrológica y la sub-cuenca a la cual pertenece cada estación. Es importante aclarar que la nomenclatura para las áreas de las sub-cuencas del Paraná (superior e inferior) definidas en este trabajo no se corresponde con la que usualmente se utiliza en la literatura hidrológica. Se suele subdividir al río Paraná considerando el Alto Paraná, desde sus nacientes hasta la ciudad de Corrientes y, el Bajo Paraná, desde Corrientes hasta la desembocadura en el Río de la Plata. Sin embargo para el presente estudio, se adoptó la denominación de la sub-cuenca de acuerdo a la ubicación de cada estación hidrológica considerada como punto de cierre. Por otra parte, el período de estudio se determinó desde enero de 1931 hasta diciembre de 2010, a excepción de la estación Ladario en el Pantanal en la que el período considerado fue 1931-1998 por falta de datos. La versión v.6 de la base de datos del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (Schneider y otros, 2011) fue utilizada para calcular las medias areales de precipitación mensual para cada sub-cuenca.

Longitud	Latitud	Punto de Cierre	Sub-cuenca
-57.31	-25.15	Pilcomayo	Paraguay
-57.59	-19.00	Ladario	Pantanal
-57.95	-31.38	Salto Grande	Uruguay
-53.29	-25.32	Salto Caxias	Iguazú
-60.28	-31.46	Santa Fe	Paraná Inferior
-60.73	-32.72	Parana Timbúes	
-54.14	-24.04	Guaira	Paraná Superior
-54.35	-25.24	Itaipu	

Tabla I: Estaciones hidrológicas utilizadas como puntos de cierre para definir el área de captación de la precipitación para cada una de las sub-cuencas.

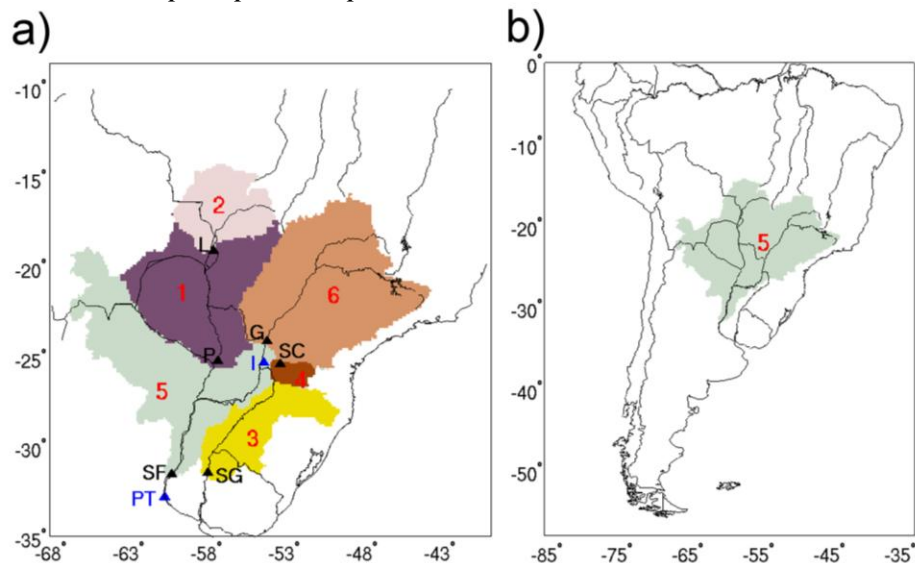


Figura 1: Representación de las áreas de captación de precipitación para a) cada una de las 6 sub-cuencas (1. Paraguay (incluye al Pantanal), 2. Pantanal, 3. Uruguay, 4. Iguazú, 5. Paraná Inferior, 6. Paraná Superior) y los puntos de cierres utilizados (en triángulos negros: P: Pilcomayo, L: Ladario, SG: Salto Grande, SC: Salto Caxias, SF: Santa Fé, G: Guaira); en triángulos azules se muestran las estaciones consideradas en este estudio para las cuencas del río Paraná (PT: Paraná Timbúes e I: Itaipú). b) Representación de la cuenca del Paraná Inferior sin la superposición de las otras cuencas.

En el marco de la estimación Turc-Pike (ver ecuación (1) - Turc, 1954; Pike, 1964), se procedió a

caracterizar en términos medios a cada sub-cuenca y comparar el balance de agua entre dichas cuencas.

$$\frac{ET}{P} = \frac{1}{\sqrt{1+\phi^2}} \quad (1)$$

Donde P es la precipitación, ET la evapotranspiración real, E0 la potencial y ϕ es un índice de humedad representado por el cociente entre precipitación y evapotranspiración potencial ($\phi = P/E0$). ET se calculó a partir de la diferencia entre los valores medios anuales de precipitación y caudal para el período 1931-2010.

La curva que describe la relación Turc-Pike se encuentra representada gráficamente en la figura 2a. Si bien esta figura será analizada posteriormente en la sección de resultados, se puede destacar a priori que para valores grandes de ϕ , la ET se aproxima a E0 tal que la derivada de este índice (ϕ') se aproxima a la unidad. En este caso, la recta tangente correspondiente a ϕ' representa al caso en que el limitante para la evapotranspiración es la disponibilidad de energía. Por el contrario, para valores pequeños de ϕ , ET se aproxima a P, por lo que el limitante correspondería a la disponibilidad de humedad y la precipitación obtenida tendería a evaporarse prácticamente por completo. En la misma figura se remarca el caso en que $ET=E0$, es decir, donde el limitante es la energía disponible por lo cual no permite evaporar más. Por otro lado, también se detallan los posibles climas (árido, semi-árido, savanna-húmedo, selva tropical, tundra) basados en ϕ . Esto es, a la izquierda del gráfico corresponderán los climas más áridos y a la derecha los más húmedos. Se indica también, en línea vertical punteada, el caso en que el índice de humedad es igual a la unidad, es decir, cuando precipita la cantidad máxima que podría evaporar potencialmente ($P=E0$).

En relación a lo detallado en el párrafo previo, dicho análisis fue complementado mediante la evaluación de la relación entre el caudal (C) y la precipitación (P), definida como δ :

$$\delta[\%] = \frac{C}{P} \times 100 \% \quad (2)$$

Por otro lado, se caracterizó estadísticamente la variabilidad de los caudales y la precipitación mensuales de los principales ríos de la Cuenca del Plata. En primer lugar, se analizó la onda anual del período 1931-2010 y, luego, la de las 8 décadas dentro de tal período para cada una de las estaciones, a excepción de la estación Ladario donde se analizó el período 1931-1998 por falta de datos observados. La variabilidad de baja frecuencia de los caudales y la precipitación se analizó, en parte, mediante la aplicación de un filtro de medias móviles de 11 años (11a mv) a las series anuales normalizadas. Asimismo, con el objetivo de cuantificar dicha variabilidad se calculó la varianza explicada por las series filtradas. Finalmente, se estudiaron las tendencias lineales de las series y se testeó su significancia con un 95% de confianza. Como complemento de los resultados observados mediante el análisis previo, se calculó además el porcentaje de cambio de cada variable sobre el período posterior a 1970 (1971-2010) con respecto al previo (1931-1970).

3) RESULTADOS

La curva de la figura 2a muestra la relación entre el cociente de evapotranspiración real y potencial en función de ϕ , previamente definido. En términos generales, se puede notar que, si bien ninguna de las sub-cuencas presenta un índice de humedad cercano a cero, las 6 sub-cuencas muestran características considerablemente distintas, lo cual destaca la gran diversidad que presenta la Cuenca del Plata debido a su gran extensión. Mientras tanto, la figura 2b representa gráficamente la relación entre los índices δ y ϕ .

La sub-cuencas de los ríos Uruguay e Iguazú, presentan valores de ϕ superiores a la unidad, es decir, precipita un porcentaje de agua mayor del que se podría evaporar. Por lo tanto, en estos casos, la disponibilidad de energía, representada por E0, será el limitante para la evapotranspiración, y necesariamente una porción importante de agua que precipitó deberá escurrir. Si se interpreta a los valores de δ como un término de eficiencia en el caudal para escurrir lo que precipita, se puede ver que

la sub-cuencas del Uruguay y, en mayor medida, del Iguazú son las más eficientes, dado que alrededor de un 40% y 60%, respectivamente, de lo que precipita tiende a escurrir. Las sub-cuencas del Paraguay, Pantanal y, en menor medida, Paraná Inferior, presentan características similares entre sí, donde la evaporación juega un rol importante. Aproximadamente evapora un 50%-60% respecto de lo que podría evaporar potencialmente (tomando E_0 como el limitante). Sin embargo, al observar el índice de humedad para esta sub-cuencas, se puede notar que sólo precipita alrededor del 50% del total de lo que podría llegar a evaporarse (E_0). Por lo tanto, estaría evaporando gran parte de lo que precipita, quedando un porcentaje considerablemente menor para escurrir. En este caso, el limitante en lugar de ser la disponibilidad de energía (E_0) tiende a ser la disponibilidad de humedad. Finalmente, el Paraná Superior presenta un comportamiento intermedio a todas las sub-cuencas.

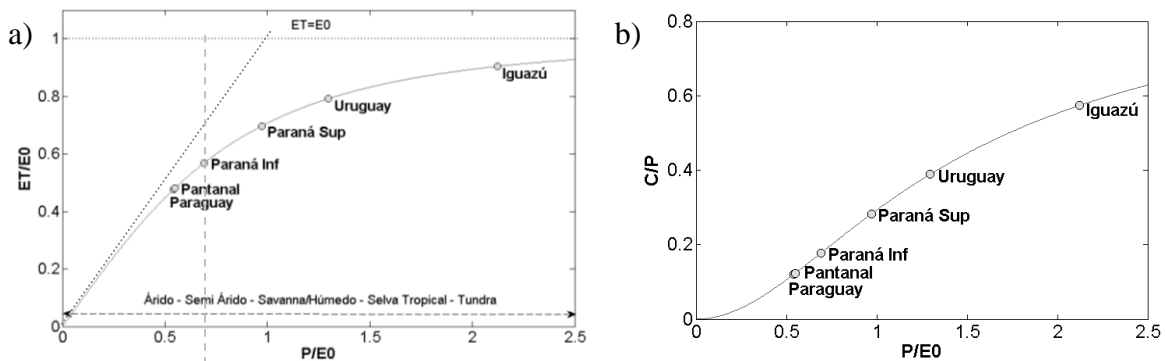


Figura 2: a) Representación del ajuste de Turc-Pike en promedio para cada sub-cuenca a través del cociente entre ET y E_0 como función del índice de humedad ($\phi=P/E_0$). b) Representación del índice δ ($\delta=C/P$) en función del índice de humedad ϕ , en promedio para cada sub-cuenca, en base a la parametrización Turc-Pike.

A través del análisis de los ciclos anuales de los caudales medios del período 1931-2010 (figura 3), se pueden observar tres regímenes principales distintos. Por un lado, las estaciones pertenecientes al río Paraguay (Ladario y Pilcomayo) presentan un ciclo anual marcado con máximos de caudal en otoño e invierno y mínimos durante la primavera y el verano. Por otro lado, el río Paraná (Paraná Timbúes e Itaipú) también muestran un ciclo anual bien definido aunque en este caso el máximo ocurre entre febrero y marzo, mientras que el mínimo entre agosto y septiembre. Finalmente, se puede destacar un régimen distinto entre las estaciones ubicadas en el río Uruguay e Iguazú (Salto Grande y Salto Caixas, respectivamente). Su onda anual se caracteriza por tres máximos de caudal a lo largo del año, estos son: febrero, junio/julio y octubre. El análisis basado en el estudio del ciclo anual para cada una de las décadas que conforman el período completo de estudio muestra que la mayoría de las estaciones presenta cambios decadales en el comportamiento de la onda anual de los caudales, mientras que algunas sólo cambios en su magnitud, pero no así en el régimen del ciclo anual. Por último, a grandes rasgos, se puede notar que las décadas con mayores caudales son las últimas dentro del período 1931-2010. En particular, la mayoría de las estaciones hidrológicas analizadas exhibe el ciclo anual con máxima magnitud durante la década 1981-1990.

La figura 4 presenta las series temporales de caudales anuales normalizados junto con su tendencia lineal y las series filtradas. Los resultados muestran tendencias positivas significativas para todas las estaciones hidrológicas analizadas, lo cual confirma lo encontrado en el análisis inter-decadal de la onda anual de los caudales. Más aún, a partir de la década del '70 se puede observar un aumento considerable en los caudales. La serie filtrada da una idea de la relevancia que tiene la variabilidad de baja frecuencia sobre los caudales, en particular en las sub-cuencas Paraguay y Pantanal. El análisis de la figura 4 se complementará posteriormente con los resultados mostrados en las tablas II y III.

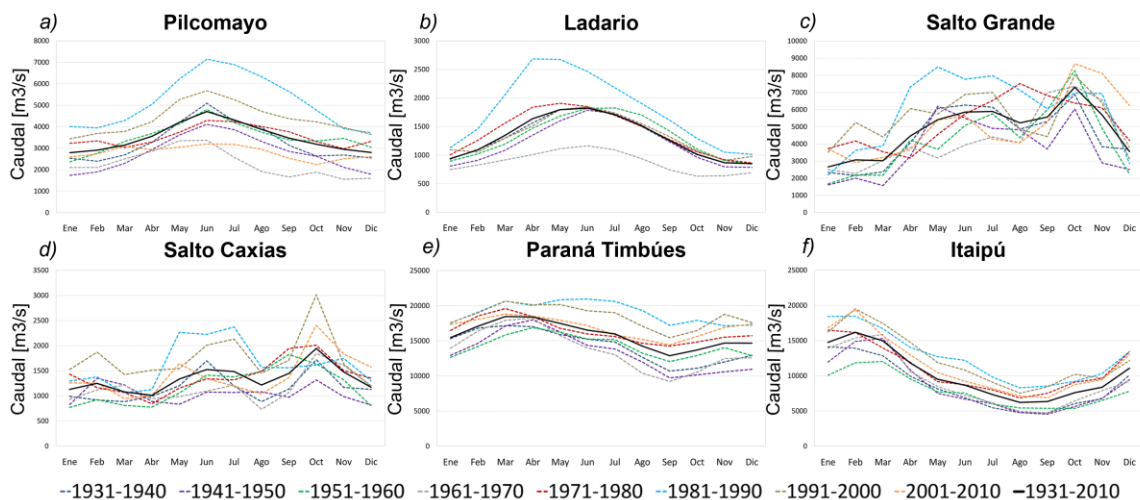


Figura 3: Ciclos anuales medios de caudales [m³/s] del período completo 1931-2010 (en línea negra), y de cada una de las décadas intermedias (en líneas de colores respectivamente), correspondientes a: a) Pilcomayo, b) Ladario, c) Salto Grande, d) Salto Caxias, e) Paraná Timbúes, y f) Itaipú.

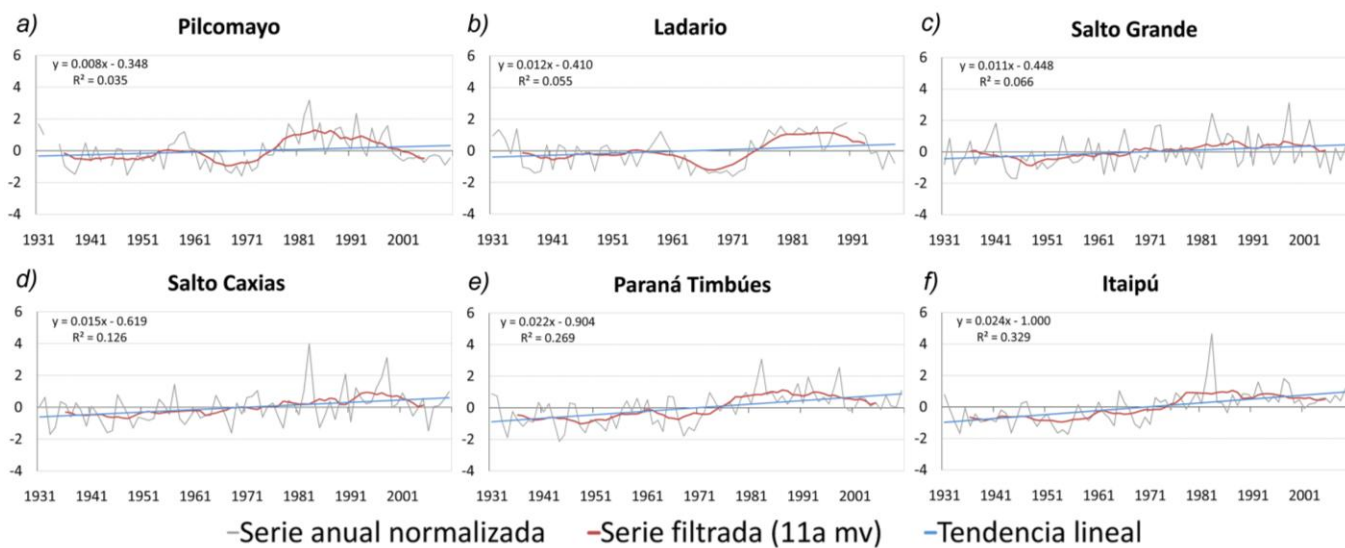


Figura 4: Series de caudales anuales normalizadas (línea gris), filtradas con medias móviles de 11 años (línea roja), y tendencias lineales de caudal anual correspondiente al período 1931-2010 (línea azul) para cada uno de los puntos de cierre considerados: a) Pilcomayo, b) Ladario, c) Salto Grande, d) Salto Caxias, e) Paraná Timbúes, y f) Itaipú.

En la figura 5 se presenta el ciclo anual medio de la precipitación correspondiente al período completo de estudio (1931-2010), así como el de cada una de las décadas intermedias, para las 6 sub-cuencas analizadas. Si se comparan los caudales correspondientes a los puntos de cierre (figura 4) con la precipitación en cada sub-cuenca (figura 5), se puede examinar el retardo en la escorrentía superficial como respuesta a la precipitación. En particular, las sub-cuencas Paraguay y Pantanal (figura 5a y 5b, respectivamente) presentan un ciclo anual de precipitación bien definido, similar entre sí, aunque el Pantanal exhibe una amplitud levemente mayor. Se observa un desfase de aproximadamente 6 meses entre la precipitación y los caudales en los puntos de cierre correspondientes. Por el contrario, en la sub-cuencas de los ríos Uruguay (figura 5c) e Iguazú (figura 5d) el desfase encontrado entre las precipitación y el caudal en Salto Grande y Salto Caxias, respectivamente, es de alrededor de uno a dos meses. Sin embargo en el caso del río Uruguay las medias mensuales de precipitación a lo largo del año no varían considerablemente su magnitud, es decir, el ciclo estacional en la sub-cuenca del Uruguay no

es muy marcado. Este resultado es un artificio matemático producto de la media areal entre los valores de precipitación correspondiente a cada uno de los puntos de retícula dentro de la propia cuenca. Por otro lado, la sub-cuenca del Paraná inferior (figura 5e) presenta un ciclo anual similar al de la sección superior de la cuenca (figura 5f), siendo enero el mes en que la precipitación es máxima y julio/agosto cuando es mínima. Al comparar con el ciclo anual de caudales de los puntos de cierre en cada sub-cuenca del río Paraná se observa que existe un retardo en la respuesta a la precipitación con máximos durante febrero (Paraná superior) y marzo (Paraná inferior), y mínimos en septiembre.

Los resultados del análisis inter-decadal muestran algunas modificaciones en la magnitud de la precipitación en la mayoría de las sub-cuencas (figura 5) aunque no así en la ocurrencia de los máximos y mínimos, manteniendo de esta forma un comportamiento similar en el ciclo anual a lo largo de todas las décadas del período de estudio. Por otra parte, las sub-cuencas de Uruguay (figura 5c) e Iguazú (figura 5d) presentan una gran dispersión del ciclo anual a lo largo de todo el período de estudio, variando no sólo la intensidad sino también la ocurrencia de máximos y mínimos de precipitación. Esta misma característica ha sido analizada en las figuras 4c y 4d, respectivamente, para el caso de los caudales. Asimismo, se puede notar que las tendencias lineales de las series de precipitación anual normalizada (figura 6) son positivas en todas las cuencas. Sin embargo, sólo las sub-cuencas del Uruguay (figura 6c) muestran tendencias significativas al 95%. Por otro lado, si bien las series anuales filtradas de precipitación exhiben una componente de variabilidad de baja frecuencia en la mayoría de las sub-cuencas, resulta considerablemente menor que la correspondiente a los caudales.

Es de interés comparar la variabilidad de baja frecuencia de la precipitación y los caudales. En la tabla II se presenta la varianza explicada por las series anuales normalizadas de caudales y precipitación, filtradas con medias móviles de 11 años, para cada sub-cuenca. A través de los resultados se puede evidenciar que los ríos Paraguay (incluyendo al Pantanal) y Paraná exhiben una variabilidad de baja frecuencia explicada por más del 40%. Por el contrario, en los ríos Uruguay e Iguazú domina una variabilidad de mayor frecuencia. Los resultados indican un porcentaje considerablemente mayor para las series filtradas de caudales respecto de los valores obtenidos a partir de la precipitación. A modo de ejemplo, se puede observar que las descargas observadas en la estación Ladario presentan una varianza explicada del 47%, mientras que el promedio areal en la sub-cuenca del Pantanal explica sólo un 15% de la varianza total, lo cual resalta la relevancia en la variabilidad de baja frecuencia de los caudales frente a la de precipitación. La sub-cuenca en la que el porcentaje de varianza explicada es de una magnitud similar en ambas series, de caudal y precipitación, es en la correspondiente al río Uruguay (14% y 11%, respectivamente).

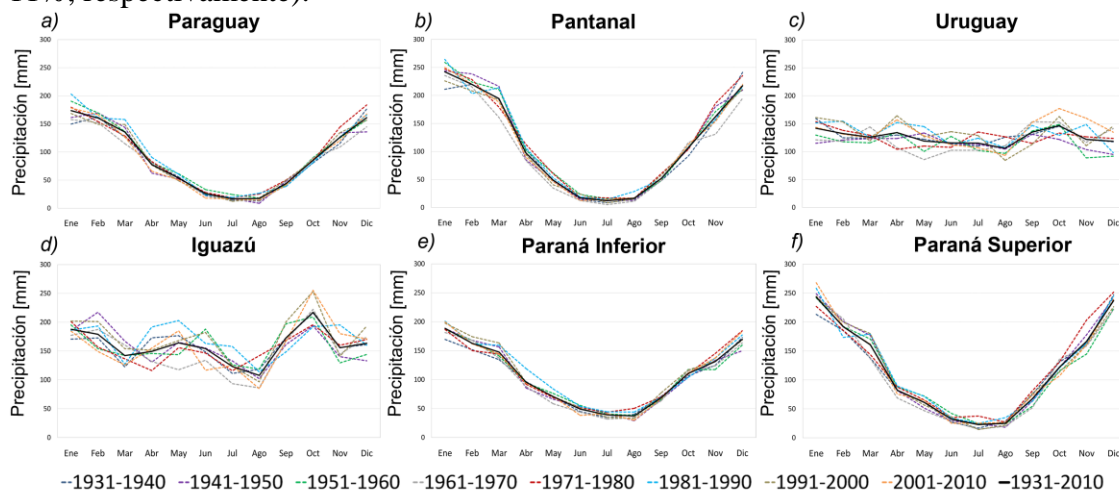


Figura 5: *Idem que figura 3 pero para la precipitación [mm] en cada una de las sub-cuencas analizadas: a) Paraguay, b) Pantanal, c) Uruguay, d) Iguazú, e) Paraná Inferior, y f) Paraná Superior.*

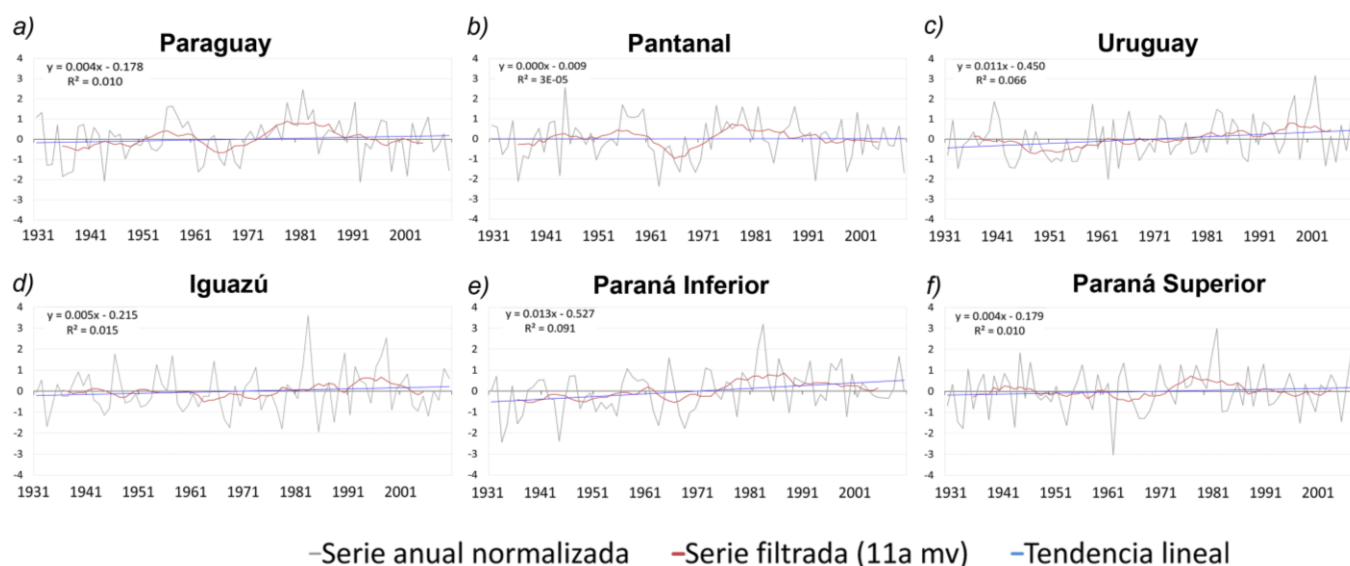


Figura 6: Idem que figura 4 pero para la precipitación anual normalizada en cada una de las sub-cuencas: a) Paraguay, b) Pantanal, c) Uruguay, d) Iguazú, e) Paraná Inferior, y f) Paraná Superior.

El análisis inter-decadal a través de la figura 3 había exhibido que, en las últimas décadas del período de estudio 1931-2010, particularmente entre 1981 y 1990, se han observado los mayores caudales. Más aún, en todas las sub-cuencas las tendencias lineales de las series anuales tanto de precipitación como de los caudales de los ríos (figuras 4 y 6) resultaron positivas. Es por ello que, con el objetivo de cuantificar y comparar los aumentos observados en ambas magnitudes, la tabla III presenta los porcentajes de incremento en la precipitación y los caudales basados en los promedios anuales de los períodos 1931-1970 y 1971-2010. A partir de estos resultados, se puede destacar que en todas las sub-cuencas ha habido un aumento de la precipitación entre el 4% y 6%, a excepción de la sub-cuenca del río Uruguay (11%). Sin embargo, los aumentos de precipitación se ven amplificados al cuantificar los cambios en los caudales, en promedio del 30% (27%-37%) respecto del período previo a 1970.

Puntos de cierre	% (caudales)	Sub-cuencas	% (precipitación)
Pilcomayo	41%	Paraguay	10%
Ladario	47%	Pantanal	15%
Parana Timbúes	46%	Paraná Inferior	12%
Itaipu	46%	Paraná Superior	8%
Salto Grande	14%	Uruguay	11%
Salto Caixas	20%	Iguazú	7%

Tabla II: Porcentaje de varianza explicada por las series anuales normalizadas de caudales y precipitación, filtradas con medias móviles de 11 años, para cada sub-cuenca.

Puntos de cierre	% (caudales)	Sub-cuencas	% (precipitación)
Pilcomayo	36%	Paraguay	4%
Ladario	27%	Pantanal	4%
Parana Timbúes	27%	Paraná Inf	6%
Itaipu	37%	Paraná Sup	6%
Salto Grande	31%	Uruguay	11%
Salto Caixas	36%	Iguazú	5%

Tabla III: Porcentaje de incremento en los caudales y la precipitación basados en los promedios anuales de los períodos 1931-1970 y 1971-2010, para cada sub-cuenca.

4) CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó una caracterización estadística de la variabilidad temporal de la precipitación y los caudales de los principales ríos que conforman la Cuenca del Plata. En particular, se intentó profundizar el estudio de la relación entre ambas variables con especial énfasis en la amplificación de la variabilidad de baja frecuencia y el porcentaje de aumento observado en los caudales respecto de la precipitación. Para ello, se consideraron seis sub-cuencas (Paraguay, Pantanal, Uruguay, Iguazú, Paraná inferior y superior) con sus respectivos puntos de cierre (Pilcomayo, Ladario, Salto Grande, Salto Caxias, Paraná Timbúes e Itaipú).

En primer lugar se procedió a caracterizar en términos medios a cada sub-cuenca y comparar el balance de agua entre dichas cuencas. Los resultados de este análisis mostraron que en términos generales, las seis sub-cuencas exhiben características considerablemente distintas, lo cual destaca la gran diversidad que presenta la Cuenca del Plata debido a su gran extensión. Se pudo observar que la sub-cuencas del río Uruguay y, en mayor medida, del Iguazú son las más eficientes en escurrir superficialmente, dado que alrededor de un 40% y 60% de lo que precipita tiende a escurrir, respectivamente. Las sub-cuencas del Paraguay, Pantanal y, en menor medida, Paraná Inferior, presentan características similares entre sí, donde la evaporación juega un rol importante dentro del balance de agua.

Se estudiaron los ciclos anuales de los caudales en los puntos de cierre y la precipitación en las sub-cuencas, respectivamente. Se observaron tres regímenes principales distintos en los caudales considerados: uno dominado por las estaciones Pilcomayo y Ladario, el segundo corresponde a las estaciones pertenecientes a la cuenca del río Paraná y finalmente, otro que caracteriza a las sub-cuencas de los ríos Uruguay e Iguazú. Más aún, se analizó si el régimen de los ciclos anuales, así como su magnitud variaban entre las distintas décadas dentro del período de estudio (1931-2010). Los resultados mostraron que la mayoría de las estaciones presentaron cambios inter-decadales en el comportamiento, mientras que algunas sólo mostraron cambios en su magnitud. Las estaciones hidrológicas pertenecientes a los ríos Uruguay e Iguazú (Salto Grande y Salto Caxias, respectivamente) son las exhibieron las mayores variaciones. En términos generales, las décadas más recientes fueron las que mostraron los caudales de mayor magnitud.

Asimismo, los resultados de la evaluación de las tendencias lineales indicaron que todas las estaciones hidrológicas presentaron aumentos significativos en los caudales, con un 95% de confianza, lo cual confirma lo encontrado en el análisis inter-decadal de los ciclos anuales. Por el contrario, en el caso de la precipitación únicamente la sub-cuenca de Uruguay presentó tendencias positivas significativas al 95%. Para estudiar la variabilidad de baja frecuencia de los caudales se aplicó un filtro de medias móviles de 11 años a las series de caudales anuales normalizados. A través de este estudio, se logró distinguir la variabilidad de baja frecuencia presente en las series del río Paraná, y en mayor medida en el Paraguay, mientras que las correspondientes a los ríos Uruguay e Iguazú presentaron una variabilidad de mayor frecuencia. Por otro lado, las series anuales filtradas de precipitación exhibieron una variabilidad de mayor frecuencia en la mayoría de las sub-cuencas en comparación con la variabilidad de los caudales. Estos resultados se cuantificaron a través del porcentaje de varianza explicada de las series filtradas donde se logró relevar la mayor variabilidad en la baja frecuencia que presentan los caudales respecto de la precipitación.

Finalmente, se pudo observar que a partir de la década del '70 los caudales aumentaron considerablemente. Se cuantificó dichos cambios a través de los porcentajes de incremento en la precipitación y los caudales basados en los promedios anuales de los períodos 1931-1970 y 1971-2010. El análisis de los valores obtenidos logró verificar la amplificación de los cambios en los caudales correspondientes al segundo período, con un aumento de alrededor del 30% en la mayoría de las sub-cuencas. En este sentido, los resultados del presente trabajo están en línea con lo encontrado en el estudio de Berbery y Barros (2002). Para el caso de la precipitación no se observaron incrementos de magnitud similar, sino que rondan el 6%. Se destaca la sub-cuenca del Uruguay en la que se registraron los mayores porcentajes de aumento en la precipitación (11%).

AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo fue financiado por el CONICET (PIP11220120100586) y la Universidad de Buenos Aires (UBACYT- 20020130100644BA).

REFERENCIAS

- Barros V, Castañeda E, Doyle M., 2000:** Recent precipitation trends in southern South America to the east of the Andes: an indication of a mode of climatic variability. *Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates Key Sites, Methods, Data and Problems*. P.P. Smolka, W.Volkheimer Editors. Springer-Verlag, 187-206.
- Berbery, E. H., y Barros, V. R., 2002:** The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 630-645.
- Camilloni, I. A., y Barros, V. R., 2003:** Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *Journal of Hydrology*, 278(1-4), 94-106.
- Doyle, M. E., y Barros, V. R., 2011:** Attribution of the river flow growth in the Plata basin. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2234-2248.
- Genta, J. L., Perez-Iribarren, G., y Mechoso, C. R., 1998:** A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *Journal of Climate*, 11(11), 2858-2862.
- Penalba, O. y Robledo, F., 2010:** Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, 98 (3-4), 531-550.
- Pike, J. G., 1964:** The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *Journal of Hydrology*, 2, 116-123.
- Re, M., y Barros, V. R., 2009:** Extreme rainfalls in SE south america. *Climatic Change*, 96(1), 119-136.
- Saurral, R. I., 2010:** The hydrologic cycle of the la plata basin in the WCRP-CMIP3 Multimodel dataset. *Journal of Hydrometeorology*, 11(5), 1083-1102.
- Saurral, R., Montroull, N. y Camilloni, I., 2013:** Development of statistically unbiased 21st century hydrology scenarios over La Plata Basin. *Int. Journal of River Basin Management*. 11(4), 329-343
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Ziese, M., 2011:** GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V6_050.
- Tucci, C. E. M., y Clarke, R. T., 1998:** Environmental issues in the La Plata Basin. *Water Resour. Dev.*, 14, 157–174.
- Turc, L., 1954:** Le bilan d' eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491-569.