

Artículo de investigación



Relación empírica entre estiajes y crecidas críticas del río Paraná en la sección corrientes (Argentina); ¿es significativa?

Empirical relationship between low waters and critical floods of the Paraná river in corrientes section (Argentina); is it significant?

Jorge V. Pilar^{1,2*}, Carlos A. Depettris¹, Marcelo J. M. Gómez¹

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 3 Diciembre 2021

Revisado 19 Febrero 2022

Aceptado 20 Abril 2022

Publicado 20 Julio 2022

PALABRAS CLAVE

río Paraná, estiaje, crecidas, estadísticas, predictores, inundación

KEYWORDS

Paraná river, low water levels, overflows, statistics, predictors, flooding

Resumen

La Cuenca del Plata está sufriendo un período de aguas bajas de tal magnitud que para encontrar situaciones similares es necesario remontarse decenas de años en el pasado. Ello impacta en los niveles y caudales del río Paraná en la sección Corrientes. Actores no vinculados a los ambientes académicos comentan que, luego de un estiaje tan fuerte, podría ser esperable en el futuro cercano una situación “rebote”, una inundación. Pero, ¿existen evidencias que sustenten ese tipo de afirmaciones? Para dar respuesta, se planteó un análisis exploratorio, buscando evidencias empíricas a través del análisis visual de los gráficos elaborados al efecto, sin llegar a profundizar en validaciones de tipo estadísticas, que podrían ser objeto de un trabajo futuro. Se analizó la serie de caudales medios diarios en la sección Corrientes para el período que va desde el año hidrológico 1969-70 hasta el 2019-20, denominada “serie moderna”, obtenida de la Base de Datos Hidrológica Integrada 2020 (Ministerio de Obras Públicas -Sistema Nacional de Información Hídrica República Argentina). Con esos datos se calcularon los caudales medios mensuales, que fueron el material de base para el estudio. Para cada año hidrológico se determinó el mínimo de los caudales medios mensuales y el máximo de los siguientes cinco años. Esos datos se procesaron para obtener sus estadísticas descriptivas, las que se correlacionaron entre sí de forma no paramétrica y también de forma cronológica. Los resultados de los análisis realizados no mostraron evidencia de que los principales estiajes sean predictores de crecidas extraordinarias en los cinco años subsiguientes.

Abstract

The Plata Basin is facing a low water period of such magnitude that in order to find similar situations it is necessary to go back many years ago. This condition affects the levels and flows of Paraná River at the section or Corrientes. Some people who are not related to the study environment say that after strong severe low water levels of Paraná River, a rebound effect could be expected in a close future, that is to say flooding. However, is there any empirical evidence that support such statements? To answer this question, an exploration analysis was presented, in order to look for these empirical evidences through the visual analysis of graphics, which were developed to that effect, with no deepening in statistical validations that could be the object of a future work. In the present work the series of daily mean flow-rates at Corrientes sections from the period of the hydrological year of 1969-70 to 2019-20, which is called the “modern series” and that, was obtained from the Integrated Hydrological Data Base 2020 (Public Work Department, Ministry of Infrastructure and Water Policy- National System of Hydric Information- Argentina) were analyzed. With these data, the monthly mean flow-rates were calculated, and they were the base material for the study. Then, for each hydrological year, a minimum and a maximum of the monthly mean flow-rates for the next five years were determined. After that, these data were processed to obtain their descriptive statistics, which were related among them and in a chronologic way. The results of the conducted analysis do not show evidence of that the principal stretches are predictors of extraordinary overflows in the next five years.

1 Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. jvpilar@gmail.com; carlosdepettris@gmail.com; mgichaco@yahoo.com.ar

2 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Paraná está atravesando su segundo año consecutivo de estiajes extremos, situación que se inició a finales del año 2019, y que se sostiene en el tiempo sin un horizonte de final definido, que implicaría el retorno a los niveles y caudales identificados como “normales”, como puede observarse en la figura 1. En ese contexto, los datos observados en la sección Corrientes indicada en la figura 2, que marca el límite entre el Paraná Superior y el Paraná medio, constituyen un registro por demás significativo para analizar e intentar alguna prognosis

con base estadística, ya que se dispone de una serie de 115 años hidrológicos: desde 1904 hasta la actualidad. Ante la ocurrencia reciente de ciclos de años húmedos e hiper húmedos, con otros de estiajes (o sequías) más o menos pronunciados, el interrogante que comúnmente se plantea durante el tránsito de esos ciclos típicos es “en qué momento y con qué magnitud hidrológica se revertirá esa situación”, y si sería esperable como continuidad cronológica un evento extremo pero de signo opuesto.

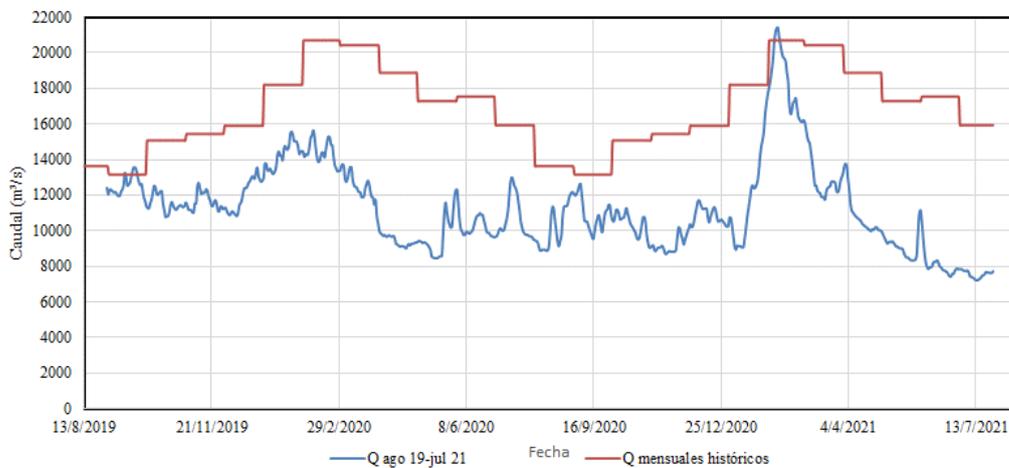


Figura 1. Evolución de la bajante de los años hidrológicos 2019/20 y 2020/21 en la sección Corrientes del río Paraná, comparada con los caudales medios mensuales de la serie histórica.



Figura 2. Ubicación geográfica de la estación Corrientes (Fuente: Google Earth).

2. METODOLOGÍA

Actualmente, se dispone de estudios (Gómez, M. *et al.* 2019; 2020) que demuestran que la serie moderna del río Paraná, comprendida entre 1970 y 2016, refleja el fuerte proceso de antropización de esta región de la Cuenca del Plata durante los últimos 50 años, en los que se construyeron numerosas presas de embalse y desaparecieron bosques nativos como consecuencia del avance de las áreas agrícolas, entre otras intervenciones humanas. Por esa razón, éste análisis se centrará en el comportamiento de la variable caudal medio mensual en la serie moderna. La fuente de información ha sido la Base de Datos Hidrológica Integrada 2021 (Ministerio de Obras Públicas Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Sistema Nacional de Información Hídrica, República Argentina), que proporciona una información confiable y actualizada de los caudales mensuales en Corrientes, permitiendo disponer de la serie moderna de 51 años hidrológicos: 1969/70-2019/20.

2.1 Selección y análisis de la muestra

La muestra seleccionada para el análisis corresponde a la serie de caudales medio mensuales, con la que se determinó para cada año hidrológico los valores mínimos de estos y el correspondiente valor máximo de caudal para los cinco años subsiguientes. En la tabla 1 se presentan, a modo de síntesis y ordenados por año hidrológico, los valores de caudales mínimos y los máximos de los cinco años subsiguientes. Los datos indicados en tabla 1 se presentan en tabla 2, pero con los caudales medios mensuales mínimos ordenados en orden creciente. Para la serie estudiada se calcularon las propiedades estadísticas: media, desvío estándar, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría, coeficiente de Curtosis, valor máximo y mínimo. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3, que corresponden, como ya se indicó, al período 1969/1970 a 2019/2020. Para los caudales mensuales mínimos presentados en la tabla 2, ordenados por orden de magnitud, se obtuvieron los valores para los cuartiles, resultando el cuartil 1: 12,129.5 m³/s, cuartil 2: 13,506.5 m³/s, cuartil 3: 14,757.5 m³/s y cuartil 4: 17,882.00 m³/s. En tabla 4 se presentan, ordenados para cada cuartil determinado, los valores de caudal medio mensual máximo de los subsiguientes cinco años. En el contexto de la actual situación caracterizada por un estiaje muy fuerte del río Paraná, se buscó indagar de manera empírica y no paramétrica si existen indicios

de que un período de aguas muy bajas es seguido de un ciclo de caudales máximos en un horizonte de tiempo cercano, tomando un “lag” de hasta cinco años hidrológicos, lo cual requiere un conocimiento adicional que va más allá del simple análisis de niveles (o caudales) críticos. Dicho en otras palabras, el análisis que se propone es investigar la probabilidad condicional de que, habiendo ocurrido un año de sequía extrema, ocurran en el o los años inmediatos siguientes, hasta un máximo de cinco años, valores extremos máximos de diferentes magnitudes.

3. RESULTADOS

Un primer análisis de los datos que se procesaron llevó a representar en abscisas los cuartiles de la serie de caudales mínimos mensuales, ya que como medidas estadísticas de posición tienen la propiedad de dividir la serie en cuatro grupos de números iguales de términos, representando en ordenadas los cuartiles de caudales máximos mensuales de hasta los cinco años siguientes. La representación en cuartiles, además de ser de amplia utilización, es apta para su empleo en la determinación de estratos o grupos correspondientes a fenómenos naturales. Para este caso, los resultados son presentados en la figura 3.

La representación gráfica (figura 3) está mostrando que, para el caso del río Paraná en la sección Corrientes, no hay singularidades asociadas con alguno de los cuartiles de caudales mínimos: en el primer cuartil, que es el asociado con la situación actual (12,100 m³/s), el rango de caudales máximos mensuales que se suceden en los años siguientes hasta un período de cinco, abarca una franja amplia que va desde valores tan bajos como 23,000 m³/s hasta 55,000 m³/s, que está asociado a la máxima crecida del Siglo XX (año hidrológico 1982/83). Sin grandes diferencias, ese patrón se replica en los restantes cuartiles, lo que estaría mostrando que no habría evidencias empíricas que preanuncien un salto, desde un extremo mínimo como el actual, a un extremo máximo como los de las grandes crecidas de la última veintena del siglo pasado.

Otra forma de analizar el escenario consiste en representar los caudales mínimos mensuales por año hidrológico contra los caudales máximos mensuales en los cinco años subsiguientes, como se muestra en la figura 4.

Tabla 1. Caudales medios mensuales mínimos y máximos de los 5 años subsiguientes, por año hidrológico

Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)
1969/1970	7,400.00	26,728.00	1986/1987	13,697.00	42,920.00	2003/2004	13,964.00	28,494.00
1970/1971	8,086.00	26,728.00	1987/1988	13,404.00	42,920.00	2004/2005	13,190.00	30,178.00
1971/1972	8,560.00	34,023.00	1988/1989	10,583.00	42,920.00	2005/2006	14,063.00	30,178.00
1972/1973	14,153.00	34,023.00	1989/1990	13,778.00	42,920.00	2006/2007	14,364.00	30,178.00
1973/1974	14,760.00	34,023.00	1990/1991	13,000.00	42,920.00	2007/2008	13,894.00	30,178.00
1974/1975	11,699.00	34,023.00	1991/1992	12,539.00	38,019.00	2008/2009	12,695.00	30,178.00
1975/1976	12,789.00	34,023.00	1992/1993	14,750.00	40,025.00	2009/2010	16,264.00	26,955.00
1976/1977	12,717.00	33,382.00	1993/1994	14,065.00	40,025.00	2010/2011	14,786.00	35,812.00
1977/1978	11,032.00	54,468.00	1994/1995	12,553.00	40,025.00	2011/2012	15,068.00	35,812.00
1978/1979	11,816.00	54,468.00	1995/1996	12,134.00	40,025.00	2012/2013	14,329.00	35,812.00
1979/1980	17,595.00	54,468.00	1996/1997	13,232.00	40,025.00	2013/2014	15,871.00	35,812.00
1980/1981	12,703.00	54,468.00	1997/1998	17,260.00	21,619.00	2014/2015	16,756.00	35,812.00
1981/1982	12,128.00	54,468.00	1998/1999	15,124.00	22,294.00	2015/2016	16,294.00	-
1982/1983	17,882.00	33,900.00	1999/2000	11,248.00	22,820.00	2016/2017	15,586.00	-
1983/1984	15,586.00	28,545.00	2000/2001	11,980.00	22,820.00	2017/2018	14,562.00	-
1984/1985	15,709.00	28,545.00	2001/2002	11,247.00	28,494.00	2018/2019	14,049.00	-
1985/1986	10,965.00	28,545.00	2002/2003	13,609.00	28,494.00	2019/2020	9,816.00	-

(*) Cinco años subsiguientes.

Tabla 2. Caudales medios mensuales mínimos ordenados por orden creciente

Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m ³ /s)	Qmed Mensual Máximo (*)
1969/1970	7,400.00	26,728.00	1976/1977	12,717.00	33,382.00	1973/1974	14,760.00	34023
1970/1971	8,086.00	26,728.00	1975/1976	12,789.00	34,023.00	2010/2011	14,786.00	35812
1971/1972	8,560.00	34,023.00	1990/1991	13,000.00	42,920.00	2011/2012	15,068.00	35812
1988/1989	10,583.00	42,920.00	2004/2005	13,190.00	30,178.00	1998/1999	15,124.00	22294
1985/1986	10,965.00	28,545.00	1996/1997	13,232.00	40,025.00	1983/1984	15,586.00	28545
1977/1978	11,032.00	54,468.00	1987/1988	13,404.00	42,920.00	1984/1985	15,709.00	28545
2001/2002	11,247.00	28,494.00	2002/2003	13,609.00	28,494.00	2013/2014	15,871.00	35812
1999/2000	11,248.00	22,820.00	1986/1987	13,697.00	42,920.00	2009/2010	16,264.00	26955
1974/1975	11,699.00	34,023.00	1989/1990	13,778.00	42,920.00	2014/2015	16,756.00	35812
1978/1979	11,816.00	54,468.00	2007/2008	13,894.00	30,178.00	1997/1998	17,260.00	34456
2000/2001	11,980.00	22,820.00	2003/2004	13,964.00	28,494.00	1979/1980	17,595.00	54468
1981/1982	12,128.00	54,468.00	2005/2006	14,063.00	30,178.00	1982/1983	17,882.00	33900
1995/1996	12,134.00	40,025.00	1993/1994	14,065.00	40,025.00			
1991/1992	12,539.00	38,019.00	1972/1973	14,153.00	34,023.00			
1994/1995	12,553.00	40,025.00	2012/2013	14,329.00	35,812.00			
2008/2009	12,695.00	30,178.00	2006/2007	14,364.00	30,178.00			
1980/1981	12,703.00	54,468.00	1992/1993	14,750.00	40,025.00			

(*) Cinco años subsiguientes.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas de los caudales (m³/s) medios mensuales

Período (año hidrológico)	1969/1970 – 2019/2020
Media	18,856.6
Mediana	17,910.0
Moda	14,760.0
Desviación estándar	5,877.9
Varianza de la muestra	34,549,141.8
Curtosis	6.0
Coefficiente de asimetría	1.8
Mínimo	7,400.0
Máximo	54,468.0
Cuenta	612

Tabla 4. Caudales medios mensuales Máximos para cinco años subsiguientes, por cuartiles, en m³/s

	Cuartil 1	Cuartil 2	Cuartil 3	Cuartil 4
	12,129.5	13,506.5	14,757.5	17,882.00
1	26,728.00	38,019.00	28,494.00	34,023.00
2	26,728.00	40,025.00	42,920.00	35,812.00
3	34,023.00	30,178.00	42,920.00	35,812.00
4	42,920.00	54,468.00	30,178.00	22,294.00
5	28,545.00	33,382.00	28,494.00	28,545.00
6	54,468.00	34,023.00	30,178.00	28,545.00
7	28,494.00	42,920.00	40,025.00	35,812.00
8	22,820.00	30,178.00	34,023.00	26,955.00
9	34,023.00	40,025.00	35,812.00	35,812.00
10	54,468.00	42,920.00	30,178.00	34,456.00
11	22,820.00		40,025.00	54,468.00
12	54,468.00			33,900.00
13	40,025.00			

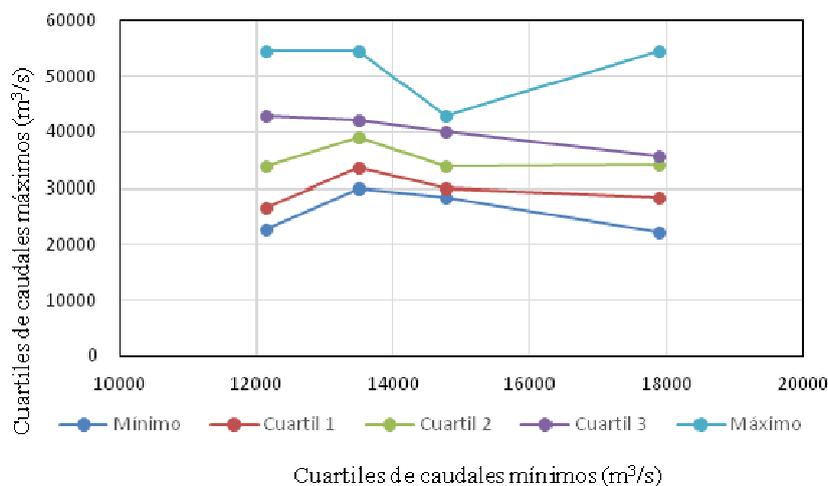


Figura 3. Representación en cuantiles de los caudales mensuales mínimos y máximos en la sección Corrientes del río Paraná.

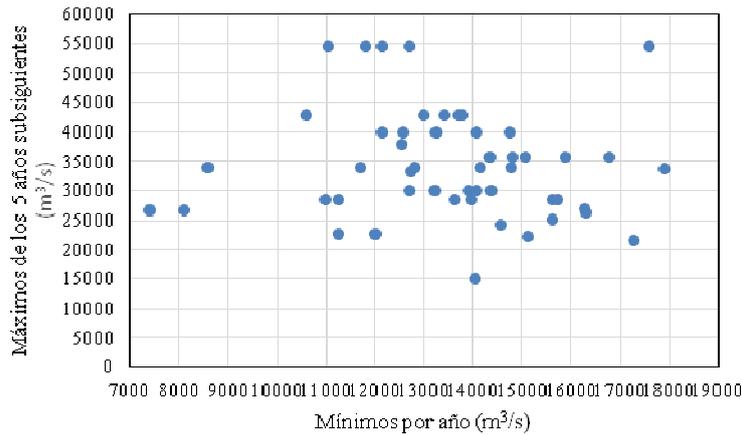


Figura 4. Representación de los caudales mínimos medios mensuales contra los caudales máximos mensuales en los cinco años subsiguientes, en la sección Corrientes del río Paraná.

La evidencia empírica muestra que los extremos mínimos del registro moderno (que es lo que sucede actualmente), del orden de los 8,000.00 m³/s, se asocian con crecidas ordinarias en los siguientes cinco años, ya que las mismas no superan los 34,000.00 m³/s. Por otra parte, hay un núcleo dominado por el 50% de los valores observados, donde los valores mínimos oscilan entre 12,000.00 y 15,000.00 m³/s, en el que los caudales máximos de los cinco años siguientes van desde 22,000.00 a 43,000.00 m³/s. Además, el caudal de la mayor creciente registrada (año hidrológico 1982-1983) vino precedido por una dispersión de caudales mínimos que se sitúan entre 11,000.00 y 17,700.00 m³/s. Una representación cronológica de la serie moderna de caudales mínimos y máximos mensuales se presenta en la figura 5, donde pueden observarse aspectos del comportamiento fluvial en los años recientes, que ameritan un análisis particular. Asumiendo la independencia estadística en la ocurrencia de los caudales extremos mensuales, lo cual ha quedado demostrado en estudios anteriores (Paoli y Cacik, 2020), pueden determinarse las tendencias de ambas series durante el período analizado. Mientras la serie de caudales máximos mensuales marca una clara declinación desde 42,000.00 m³/s, a principios de la década de los años 70, a 25,000.00 m³/s en la actualidad, la serie de caudales mínimos muestra una marcada estabilidad que la lleva a oscilar en un rango muy estrecho, entre 11,000.00 y 15,000.00 m³/s. En el caso de los caudales mínimos resultaría clara la influencia de las más de 57 represas construidas y operando en el Paraná Superior (ITAIPU, 2021), las cuales, a través de su objetivo principal de generación hidroeléctrica,

tienden a retener la mayor cantidad de agua posible, especialmente en períodos de estiaje, generando en la cuenca una regulación artificial evidente. ¿Podría argumentarse del mismo modo, al analizar la tendencia decreciente de los caudales máximos que todo sistema de represas podría tener un efecto de laminación de las crecidas? No resulta sencillo dar una respuesta concluyente, pues dependerá de las capacidades de regulación individuales y de conjunto de esas represas, teniendo en cuenta que en una crecida extraordinaria, como la de 1983, el río Paraná incrementa el aporte medido en la sección Corrientes, anualmente, en un volumen del orden de los 625 km³ (1.150-525), más del doble del aporte medio anual, y considerando que las grandes represas como Yacyretá (con un reservorio de 21 km³), Itaipú (29 km³), Ilha Solteira (21,2 km³) y otras seis de las mayores del sistema Paraná almacenan un volumen máximo que sólo alcanza el 18.8 % de ese incremento anual. Por otra parte, la Figura 5 muestra un singular escenario de las tendencias representadas, donde la serie moderna se encamina hacia una convergencia del rango entre mínimos y máximos. En este caso, varios pueden ser los factores determinantes de ese comportamiento, conformando por lo tanto un proceso complejo. Un estudio cronológico de la incorporación de las más de 57 represas en operación puede ser un indicador de la forma en que la cuenca fue incrementado artificialmente su capacidad de regulación, sin por ello desechar las evidencias de un sensible incremento en el régimen de precipitaciones de la Cuenca del Plata con diferencias según la región y la época del año, a partir, aproximadamente, del último tercio del siglo pasado (Barros et al., 2006).

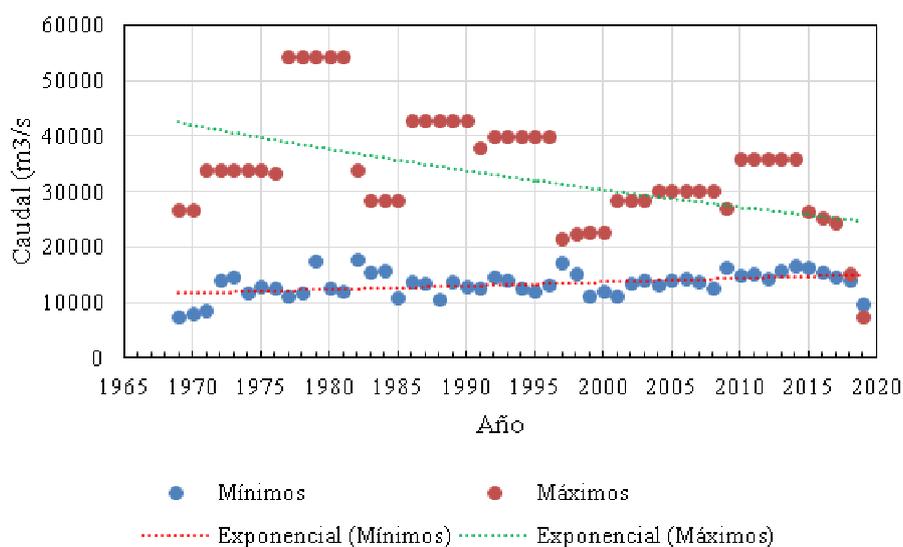


Figura 5. Cronología de los caudales mínimos y máximos mensuales de la sección Corrientes del río Paraná, para el período 1969/70-2020/21.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Analizados los años de caudales extremos mínimos en la serie moderna del río Paraná en la sección Corrientes, no surgen evidencias empíricas que estos extremos mínimos sean predictores de la ocurrencia, en un lapso de hasta 5 años, de extremos máximos que generen situaciones críticas de inundación. Las series de los extremos mínimos y máximos mensuales organizados en cuartiles no muestran una evidencia empírica de un inminente incremento de caudales y alturas desde la situación actual (estiaje extremo) hacia valores máximos críticos, teniendo como base los registros de la última veintena del siglo pasado. La ocurrencia de caudales mínimos

debería ser estudiada no sin un análisis profundo previo de la influencia de las represas construidas durante el período de la serie hidrológica del río Paraná que se estudió, especialmente en territorio de Brasil. Dicha serie muestra una tendencia creciente de caudales y alturas, que resultaría razonable adjudicar a la mayor capacidad de regulación artificial generada por esas represas. Las evidencias empíricas mencionadas en el primer párrafo de este apartado pueden ser observadas visualmente en los gráficos presentados. Esas afirmaciones podrían validarse con un estudio estadístico más profundo, pero que excede al objetivo de este trabajo, que tuvo carácter exploratorio no paramétrico.

REFERENCIAS

- Base de Datos Hidrológica Integrada 2021. Datos de caudales medio mensuales de la estación Corrientes (3805) Ministerio de Obras Públicas Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica – Sistema Nacional de Información Hídrica - República Argentina. Fecha de acceso: 25/08/2021. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>
- B. F. Chao, Y. H. Wu, Y. S. Li (2008); “Impact of Artificial Reservoir Water Impoundment on Global Sea Level”. *Science* 320 (5): 212-214.
- Itaipu Binacional (ITAIPU). Cuenca del Paraná. itaipu.gov.py (online). [Consultado el 23 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.itaipu.gov.py/es/energia/cuenca-del-parana>

- Gómez, M., Pilar, J., Ruberto, A., Depettris, C., Méndez, G. (2019). Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes. Aqua-LAC Volumen 11(2), 50-58. doi:10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-05
- Gómez Marcelo, Pilar Jorge, Alejandro Ruberto, Depettris Carlos, Mendez Guillermo (2020) “Efecto de la extensión de la serie temporal en la estimativa de recurrencias de eventos hidrológicos críticos” In: Revista Argentina de Ingeniería. Río Cuarto - Córdoba: Departamento de imprenta y publicaciones de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Vol.15. N°5. pp.85 - 96. ISSN 2314-0925.
- Naghattini, Mauro, De Andrade Pinto, Eber (2007); “Hidrología Estadística”. Editora del Servicio Geológico do Brasil. ISBN 978-85-7499-023-1. Belo Horizonte (Brasil).
- Paoli, C., Cacik, P. (2020); “Régimen de crecidas y análisis de caudales máximos”, Cap. 3 del libro El río Paraná en su tramo medio. Tomo I. C. Paoli y M. Schreider , Editores. 2ª edición actualizada. Ediciones UNL, Santa Fé.
- Vicente Barros, Robin Clarke y Pedro Silva Días (2006); “El cambio climático en la Cuenca del Plata” - 1a ed. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, Buenos Aires.

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license