

RADI REVISTA ARGENTINA DE INGENIERÍA

Publicación del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería • República Argentina • Año 8 • Volumen 15 • Junio de 2020



Imágenes; de cortesía del Departamento Energía Solar. Gerencia de Investigación y Aplicaciones. CAC. CNEA.



Consejo Federal de Decanos de Ingeniería

Año 8. Volumen 15
Junio 2020
ISSN 23140925

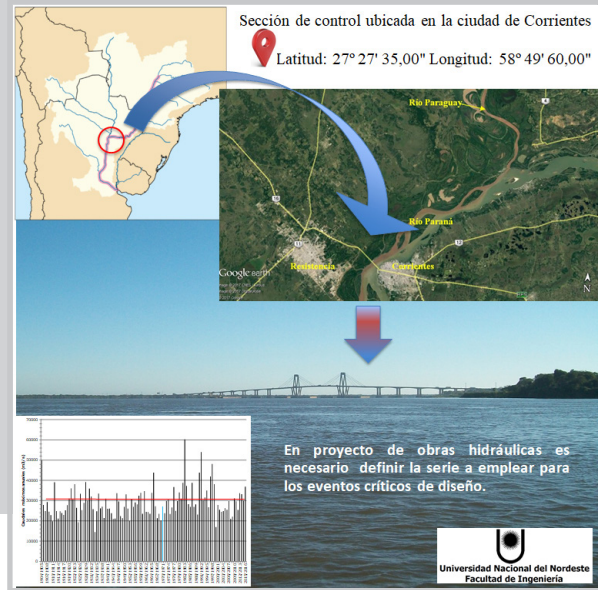
150 ING

la Argentina celebra
su ingeniería
1870-2020

Efecto de la extensión de la serie temporal en la estimativa de recurrencias de eventos hidrológicos críticos

Marcelo Gómez
 Jorge Pilar
 Carlos Depettris
 Guillermo Méndez

Facultad de Ingeniería,
 Universidad Nacional del Nordeste
 E-mail: mgichaco@yahoo.com.ar



RESUMEN

Se evalúa el comportamiento estadístico de la variable hidrológica “caudal medio diario” en la sección Corrientes del río Paraná.

Se utilizó la serie temporal 1904-2016 (serie total), poniendo énfasis en los últimos 46 años (1970-2016, denominada serie moderna), que a los efectos del trabajo se fraccionó en los períodos 1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016.

Para esas series se realizó primeramente un estudio de estadística descriptiva y posteriormente se analizó la incidencia de su extensión temporal en la determinación de recurrencia de eventos críticos observados.

Como las recurrencias obtenidas presentaron divergencias, se concluyó que es necesario verificar y actualizar permanentemente los estándares de seguridad de las obras hidráulicas de importancia que se localizan sobre las márgenes del río Paraná, como por ejemplo los cinturones de defensa contra inundaciones fluviales.

ABSTRACT

The statistical behaviour of the daily media flow hydrological variable at the Corrientes section of Paraná River is evaluated.

The temporal serie 1904-2016 (total serie) was used, emphasizing the last 46 years (1970-2016, which is called modern serie), and it was fractionated in the following periods: 1970-200, 1970-2010 and 1970-2016.

These series will firstly be treated performing a descriptive statistic and analyzing the incidence and differences that will present for distinct durations, in the occurrence probability of extraordinary events.

Due to the obtained recurrences presented divergences, it was concluded that is necessary to constantly verify and update safety standards of important hydraulic works which are located over the margins of Parana river such as the defense belts against river floods.

PALABRAS CLAVE

Río Paraná, estadísticas, caudales, obras hidráulicas.

INTRODUCCIÓN

La sección Corrientes está ubicada frente a la ciudad homónima de la República Argentina (Latitud: 27° 27' 35,00" Longitud: 58° 49' 60,00"), en el inicio del tramo medio del río Paraná, aguas abajo de la confluencia del río Paraná Superior con el río Paraguay (Figura 1). Constituye una sección de control, ya que prácticamente pasa por la misma todo el volumen escurrido sin desbordes significativo [1].

Durante los años 1982 y 1983 ocurrió una importante crecida del río Paraná, la más importante del siglo veinte en esa sección, que tuvo una duración de once meses [2], con caudales medios del orden de los 60.000 m³/s, superándose la marca histórica de 50.000 m³/s registrada en 1905.



Figura 1: Ubicación geográfica de la estación Corrientes. (Fuente: Google Earth).

Según describe Paoli en [1] y [3], para el sistema del Paraná, las crecidas máximas registradas son el producto de un régimen complejo y en muchos casos (los más importantes) como combinación de crecidas producidas en diferentes sectores de la cuenca de aporte (cuenca Paraná Superior, aportes de la cuenca del Iguazú, aportes del río Paraguay), difícilmente separables para su análisis.

También tienen influencia el estado de almacenamiento del valle al producirse la crecida, el estado de rugosidad de los cauces y del valle de inundación, lluvias locales y aportes de cursos intermedios.

Las crecidas pueden ser caracterizadas a través de diferentes variables hidrológicas:

- Caudal máximo alcanzado
- Altura máxima alcanzada
- Volumen escurrido para un determinado período.

- Duración o permanencia de determinados valores de caudales y niveles.

Si bien existen relaciones entre estas variables, debido a las causas indicadas anteriormente, cada una mide características distintas del mismo fenómeno. Concretamente, en ríos de llanura, una vez desbordado el cauce principal, grandes incrementos de caudal generan variaciones de alturas no tan significativas. Por ello, desde una óptica estadística, un evento extraordinario sería "menos común" si es caracterizado por su caudal que por su altura.

La variable hidrológica natural en una sección determinada de un curso de agua es su caudal, considerando a éste como resultado de todos los aportes provenientes de aguas arriba. Los niveles que alcanza el agua en la misma sección depende de la configuración geométrica de la misma y de las características de pendiente y rugosidad del tramo aguas arriba y aguas abajo. Por otra parte, los registros hidrométricos dependerán de la localización del "cero" de la escala de medición utilizada, lo que también afectará cualquier inferencia estadística hecha sobre esa variable.

Por lo expuesto, la caracterización probabilística de caudales y de niveles máximos (o críticos) en una misma sección de un río de llanura como el río Paraná, con valles de inundación amplios, no serán necesariamente correspondientes. Dicho en otras palabras, la recurrencia de un determinado evento extraordinario, será mayor si se lo analiza por su caudal que por su altura alcanzada.

En numerosos trabajos de actualización de frecuencias se analiza la crecida extraordinaria de 1982/83 como un outlier, pues presenta una recurrencia muy superior a la extensión del registro disponible. Paoli en [1] con base en la actualización de estudios de frecuencias de niveles máximos, muestra las limitaciones de esta variable al ser extrapolada, por lo que sugiere la utilización de series de caudales máximos para cualquier análisis probabilístico.

El presente trabajo se enfocó en evaluar

el comportamiento estadístico de la serie de caudales medios diarios ($Q_{\text{meddiario}}$) y caudales máximos anuales (Q_{max}) del río Paraná en la sección Corrientes, considerando diferentes extensiones temporales. La estadística descriptiva es la base de la inferencia estadística, que se utiliza para definir eventos críticos de diseño en obras hidráulicas de importancia, como por ejemplo los sistemas de defensa contra inundaciones fluviales de varias ciudades capitales de provincia del nordeste argentino, que se localizan sobre las márgenes de río Paraná. Dicho análisis será importante para verificar los estándares de seguridad de las obras ya construidas y para ayudar a las decisiones políticas y técnicas que deberían tomarse al respecto.

Se analizó la denominada “serie total” (1904-2016) y también se consideraron los últimos cuarenta y seis años de datos (serie moderna), serie que se fraccionó en los períodos 1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016, buscando evaluar si las estadísticas descriptivas se mantuvieron constantes o si presentaron variaciones significativas.

ANTECEDENTES

Existen numerosos trabajos referidos al estudio de las crecidas del río Paraná y al análisis de frecuencia de las mismas.

Uno de los primeros data de 1906 [4] y se refiere a la creciente de 1905. En el mismo se comparan las oscilaciones de nivel en Asunción (río Paraguay), Posadas, Corrientes, La Paz, Paraná y Baradero, indicando además el área de afectación a lo largo de todo el valle del río Paraná hasta la ciudad de Santa Fe.

Paoli (2000) menciona que hasta el año 1977 se publicaron numerosos informes sobre el régimen de crecidas de los ríos Paraná y Paraguay, principalmente por parte de organismos estatales, como la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPVN), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de Agua y Energía Eléctrica (AyEE), la Comisión Nacional de la Cuenca del Plata (CONCAP) y el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH).

Existen también otros informes elaborados por consultoras internacionales, que estuvieron orientados al aprovechamiento hidroeléctrico y de navegación del río Paraná, como los de Harza y Asociados, IECO/ELC, Lahmeyer Harza y Asociados, entre otros.

En 1979 culminó un trabajo encargado por la Entidad Binacional Yacyretá a la firma Motor Columbus y Asociados, denominado “Estudio de Crecidas Ríos Paraná y Paraguay”, que constituye uno de los más completos análisis realizados hasta ese momento, que incluye e integra gran parte de los informes y estudios anteriores a esa fecha. Constituye además un hito fundamental en la recopilación y manejo de información que hasta entonces se encontraba dispersa y de difícil acceso.

Luego de producirse la mayor crecida del siglo XX en 1982/83, se efectuaron numerosos estudios y análisis por parte de organismos públicos y privados, destacándose, por ser de los primeros, el de Aisiks [5] que concluye en su trabajo que, si bien la crecida de 1983 tuvo un volumen y una duración excepcional, los niveles y caudales registrados no pueden ser considerados realmente excepcionales ya que su recurrencia apenas supera los cien años, a pesar de ser la mayor crecida de ese siglo.

Posteriormente, Ceirano [6] demuestra en su trabajo que esa crecida de 1982/83, con caudales estimados del orden de 60.000 m³/s en Corrientes y Santa Fe – Paraná (Entre Ríos), produjo una serie de modificaciones en los valores de los parámetros estadísticos y, como consecuencia, también en las recurrencias.

Estas modificaciones se produjeron no sólo por la aparición de un valor de esta magnitud, sino también por los cambios que las mediciones producen sobre la extrapolación de las curvas de descarga que ha sido modificada. Como dato interesante presenta que, entre el comienzo y el fin de la crecida, la sección de escurrimiento en Corrientes se erosionó en 4.000 m², lo que representa aproximadamente un 25% del área anterior a la creciente; además, los caudales medios diarios entre

1/7/82 y el 31/12/83 se estimaron por interpolación y no de las curvas H-Q [1].

Entre los recientes se puede citar el estudio hidrológico e hidráulico para el proyecto “Estudios de Prefactibilidad y Anteproyecto Definitivo de la Interconexión Vial entre las Provincias de Corrientes y Santa Fe”, encargado por el Consejo Federal de Inversiones - C.F.I. [7], que se basó en la serie muestral completa, desde 1904 hasta 1998, y en otra más moderna correspondiente al período 1970 a 1998. El trabajo concluye con la determinación de los hidrogramas de diseño para recurrencias de 100 y 1.000 años, que presentan los siguientes valores:

$$Q_{\max} (\text{TR } 100 \text{ años}) = 63.415 \text{ m}^3/\text{s y}$$

$$Q_{\max} (\text{TR } 1.000 \text{ años}) = 82.730 \text{ m}^3/\text{s}.$$

METODOLOGÍA

Selección de la muestra

El análisis se hizo primeramente sobre la serie total (1904-2016), con una extensión de 112 años de registro [8], considerando como año hidrológico al período comprendido entre septiembre y agosto del año calendario siguiente, trabajando sobre los valores de caudales medios diarios ($Q_{\text{meddiario}}$) y caudales diarios máximos anuales (Q_{max}).

También se trabajó con la serie moderna, que abarca el período 1970-2016, la que a su vez se analizó por separado distintas extensiones del registro (1970-2000, 1970-2010 y 1970-2016).

Actualmente, para los diseños de obras de ingeniería afectadas por el río Paraná, se utiliza la serie moderna pues 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, desaparecieron bosques nativos, entre otras intervenciones humanas.

La serie de datos de Q_{max} estudiados se muestra en la Tabla 1, en la cual están ordenados por año hidrológico. En la Figura 2 se representan en orden cronológico esos valores.

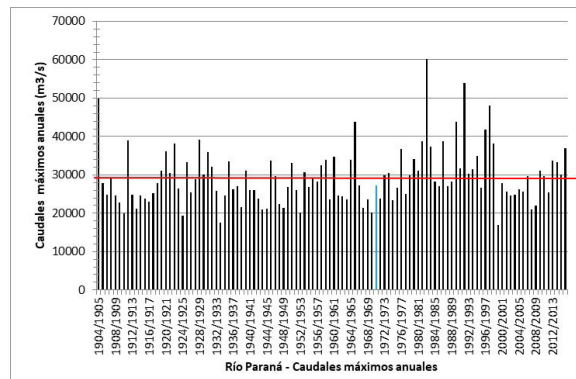


Figura 2: Río Paraná en Corrientes caudales máximos anuales. (Fuente: elaboración propia).

Para la muestra se calcularon las propiedades estadísticas: media, desvío estándar, coeficiente de variación (CV), coeficiente de asimetría (CS), coeficiente de curtosis (CK), valor máximo y mínimo. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 2 para la serie de caudales medio diario ($Q_{\text{meddiario}}$) y en Tabla 3 para la serie de caudales máximo diario anual (Q_{max}).

Para verificar la homogeneidad de las series se efectuó un análisis de series móviles, tomando períodos de 50 años (total 63 series), y para cada uno de ellos se volvieron a determinar las estadísticas media, desvío estándar, coeficientes de asimetría, de variación y de curtosis. Los valores obtenidos se presentan en Tabla 4. Los coeficientes de variación estuvieron entre 18,98% y 28,72%, valores considerados relativamente bajos y que son un indicio significativo de la homogeneidad de la muestra.

Tabla 1: Serie de caudales diarios máximos anuales por año hidrológico.

Período	Qmax (m ³ /s)	Período	Qmax (m ³ /s)	Período	Qmax (m ³ /s)	Período	Qmax (m ³ /s)
1904/1905	50.043	1932/1933	25.789	1960/1961	34.724	1988/1989	28.194
1905/1906	27.849	1933/1934	14.455	1961/1962	24.545	1989/1990	23.174
1906/1907	24.855	1934/1935	24.670	1962/1963	24.438	1990/1991	43.829
1907/1908	29.360	1935/1936	33.512	1963/1964	23.538	1991/1992	54.000
1908/1909	24.624	1936/1937	26.167	1964/1965	33.833	1992/1993	30.254
1909/1910	22.853	1937/1938	27.026	1965/1966	43.829	1993/1994	31.549
1910/1911	19.864	1938/1939	21.488	1966/1967	27.233	1994/1995	35.011
1911/1912	39.036	1939/1940	31.012	1967/1968	21.322	1995/1996	26.701
1912/1913	24.809	1940/1941	25.931	1968/1969	23.538	1996/1997	41.884
1913/1914	21.098	1941/1942	26.073	1969/1970	20.180	1997/1998	48.162
1914/1915	24.670	1942/1943	23.754	1970/1971	27.175	1998/1999	38.149
1915/1916	23.890	1943/1944	20.969	1971/1972	23.747	1999/2000	17.018
1916/1917	22.898	1944/1945	21.141	1972/1973	29.880	2000/2001	27.854
1917/1918	25.227	1945/1946	33.672	1973/1974	30.405	2001/2002	25.571
1918/1919	27.752	1946/1947	29.582	1974/1975	23.433	2002/2003	24.532
1919/1920	31.088	1947/1948	22.409	1975/1976	26.599	2003/2004	24.769
1920/1921	36.045	1948/1949	21.357	1976/1977	36.717	2004/2005	26.253
1921/1922	30.480	1949/1950	26.930	1977/1978	24924	2005/2006	25.601
1922/1923	38.081	1950/1951	33.193	1978/1979	29.805	2006/2007	29.728
1923/1924	26.452	1951/1952	26.073	1979/1980	34.075	2007/2008	20.912
1924/1925	19.363	1952/1953	20.117	1980/1981	31.012	2008/2009	22.038
1925/1926	33.353	1953/1954	30.632	1981/1982	38.805	2009/2010	31.167
1926/1927	25.367	1954/1955	26.930	1982/1983	60.215	2010/2011	29.688
1927/1928	28.919	1955/1956	29.139	1983/1984	37.291	2011/2012	25.421
1928/1929	39.123	1956/1957	28.194	1984/1985	28.338	2012/2013	33.624
1929/1930	30.104	1957/1958	32.404	1985/1986	26.943	2013/2014	33.219
1930/1931	35.962	1958/1959	33.833	1986/1987	38.861	2014/2015	30.139
1931/1932	32.091	1959/1960	23.538	1987/1988	26.943	2015/2016	36.927

Tabla 2: Estadística descriptiva de la serie de caudales medio diarios.

Período	1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Media	17.282,00	19.475,81	18.989,74	19.097,38
Mediana	16.398,70	17.946,90	17.523,30	17.691,80
Moda	15.072,60	17.861,60	17.861,60	17.861,60
Desviación estándar	6.409,55	7.115,70	6.519,89	6.338,49
Varianza de la muestra	41.082.363,67	50.633.205,66	42.508.949,38	40.176.490,27
Curtosis (CK)	2,93	4,42	5,53	5,46
Coef. de asimetría (CS)	1,14	1,70	1,86	1,83
Rango	56.269,40	53.785,10	53.785,10	53.785,10
Mínimo	3.945,60	6.429,90	6.429,90	6.429,90
Máximo	60.215,00	60.215,00	60.215,00	60.215,00
Suma	710.912.544,45	213.084.849,38	277.136.244,80	320.568.566,75
Cuenta (N)	41.136	10.941	14.594	16.786
Mayor (1)	60.215,00	60.215,00	60.215,00	60.215,00
Menor(1)	3.945,60	6.429,90	6.429,90	6.429,90
Nivel de confianza (95%)	61,94	133,35	105,79	95,89
Coef. de Variación (CV)	0,37	0,37	0,34	0,33

Tabla 3: Estadística descriptiva de los caudales máximo diario anual.

Período	1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Media	29.222,88	33.103,12	31.287,97	31.316,02
Mediana	27.492,50	30.329,45	29.033,04	29.766,74
Moda	23.538,00	26.943,20	26.943,20	26.943,20
Desviación estándar	7.383,64	9.481,01	8.903,50	8.394,27
Varianza de la muestra	4.518.087,67	89.889.613,33	79.272.261,12	70.463.812,50
Curtosis (CK)	3,17	1,45	2,36	2,80
Coef. de asimetría(CS)	1,40	1,13	1,43	1,46
Rango	45.760,00	43.196,65	43.196,65	43.196,65
Mínimo	14.455,00	17.018,35	17.018,35	17.018,35
Máximo	60.215,00	60.215,00	60.215,00	60.215,00
Suma	3.272.962,70	993.093,61	1.251.518,61	1.440.536,70
Cuenta (N)	112	30	40	46
Mayor (1)	60.215,00	60.215,00	60.215,00	60.215,00
Menor(1)	14.455,00	17.018,35	17.018,35	17.018,35
Nivel de confianza (95%)	1.382,52	3.540,27	2.847,48	2.492,79
Coef. de Variación (CV)	0,25	0,29	0,28	0,27



Datos atípicos

Chow et al. [9] explican que los datos dudosos (*outliers*) son aquellos que se alejan significativamente de la tendencia que posee la serie. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de las estadísticas de la serie, especialmente en muestras pequeñas.

Para detectar la eventual presencia de *outliers* se usó la metodología propuesta por [10], que emplea diferentes cuartiles de un conjunto de datos. Para ello se calcularon el primer cuartil (Q1), el tercer cuartil (Q3) y el rango intercuartílico (Q3 – Q1), para definir el umbral a partir del cual, si es superado, se considera al dato como *outlier*.

Los resultados obtenidos fueron:

Q1=12.961,3m³/s,

Q3=20.583,4m³/s,

Q2=16.398,7m³/s (mediana de la serie).

Los extremos inferior y superior fueron 3.945,54m³/s y 32.014,34m³/s, respectivamente. Un total de 1.039 veces fue superado el extremo superior (sobre un total 40.880 datos diarios).

En Figura 3 se muestra un diagrama de caja en que se representan los cuartiles 1 y 3, la mediana y los valores atípicos como puntos por afuera de dicha caja.

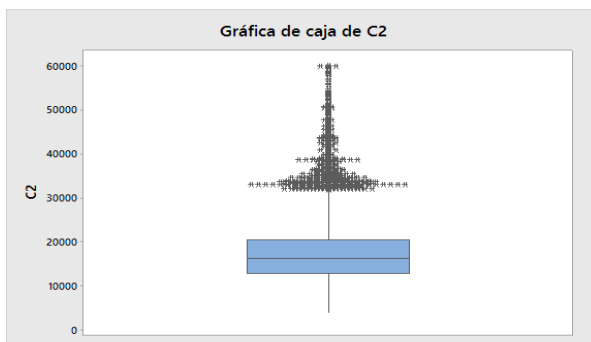


Figura 3: Gráfico de caja y outliers.

Si bien esos valores podrían ser considerados outliers, en su análisis se tuvo en cuenta lo indicado por [11], que dice “la crecida extraordinaria del año 1982-83, indudablemente tiene características de evento raro, que se conoce como outliers, que cambia significativamente las propiedades estadísticas de datos originales (coeficiente de asimetría y

cuantiles)”. En este caso, los valores atípicos presente en la serie provienen de la variabilidad natural propia de las variables hidrológicas que caracterizan los eventos de cierta magnitud que se producen en este tipo de ríos. Por lo tanto, sí fueron considerado en el análisis (no fueron descartados).

Inferencia estadística: Análisis de frecuencia de la variable

Las distribuciones probabilísticas más usadas para efectuar el análisis de frecuencia de la variable, son conocidos como Log Normal de dos parámetros (LN2), Gumbel (GU), General para eventos críticos o extremos (GEV), PearsonIII (PIII), Log PearsonIII (LPIII), Exponencial (EXP) y Wakeby (WA).

En este trabajo el ajuste se realizó con el programa computacional de Análisis de Frecuencia AFMULTI, desarrollado en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL [12]. Este modelo permite elegir cualquiera de las distribuciones indicadas y la expresión de frecuencia experimental que se desee emplear para las series muestrales que se analizan. Además calcula, para el ajuste muestral a cada distribución los test de χ^2 y de Kolmogoroff y los errores cuadráticos medios de la frecuencia (ECMF) y de la variable (EMCV). Este programa se aplicó solamente a la serie moderna por su capacidad de poder procesar hasta 100 valores de la variable.

Tabla 4: Series móviles de 50 años.

Período	Media	Desvío	Coef. Asimetría	Coef. Variación	Coef. Curtosis
1904/1905 - 1953/1954	27624,16	6322,726	1,004	0,229	3,170
1905/1906 - 1954/1955	27161,90	5432,442	0,355	0,200	3,576
1906/1907 - 1955/1956	27187,70	5438,831	0,340	0,200	3,512
1907/1908 - 1956/1957	27254,48	5430,097	0,305	0,199	3,464
1908/1909 - 1957/1958	27315,36	5471,094	0,280	0,200	3,408
1909/1910 - 1958/1959	27499,54	5533,296	0,203	0,201	3,362
1910/1911 - 1959/1960	27513,24	5522,394	0,202	0,201	3,344
1911/1912 - 1960/1961	27810,44	5502,157	0,140	0,198	3,394
1912/1913 - 1961/1962	27520,62	5275,787	0,121	0,192	3,608
1913/1914 - 1962/1963	27513,20	5279,938	0,124	0,192	3,558
1914/1915 - 1963/1964	27562,00	5230,480	0,128	0,190	3,582
1915/1916 - 1964/1965	27745,26	5287,298	0,054	0,191	3,535
1916/1917 - 1965/1966	28144,04	5724,443	0,303	0,203	3,501
1917/1918 - 1966/1967	28230,74	5675,990	0,280	0,201	3,488
1918/1919 - 1967/1968	28152,64	5744,615	0,278	0,204	3,435
1919/1920 - 1968/1969	28068,36	5781,407	0,308	0,206	3,365
1920/1921 - 1969/1970	27850,20	5870,259	0,356	0,211	3,319
1921/1922 - 1970/1971	27672,79	5750,359	0,413	0,208	3,408
1922/1923 - 1971/1972	27538,14	5762,102	0,475	0,209	3,353
1923/1924 - 1972/1973	27374,11	5569,368	0,475	0,203	3,532
1924/1925 - 1973/1974	27453,17	5584,048	0,430	0,203	3,460
1925/1926 - 1974/1975	27534,58	5492,621	0,466	0,199	3,533
1926/1927 - 1975/1976	27399,49	5429,294	0,534	0,198	3,537
1927/1928 - 1976/1977	27626,48	5577,806	0,465	0,202	3,474
1928/1929 - 1977/1978	27546,59	5587,515	0,505	0,203	3,399
1929/1930 - 1978/1979	27360,23	5343,598	0,471	0,195	3,637
1930/1931 - 1979/1980	27439,64	5414,242	0,445	0,197	3,571
1931/1932 - 1980/1981	27340,64	5299,263	0,451	0,194	3,675
1932/1933 - 1981/1982	27474,92	5503,230	0,505	0,200	3,648
1933/1934 - 1982/1983	28163,44	7184,676	1,938	0,255	3,571
1934/1935 - 1983/1984	28620,16	7019,390	2,080	0,245	3,790
1935/1936 - 1984/1985	28693,52	6996,394	2,072	0,244	3,726
1936/1937 - 1985/1986	28562,14	6965,673	2,151	0,244	3,737
1937/1938 - 1986/1987	28816,03	7106,511	1,979	0,247	3,652
1938/1939 - 1987/1988	28814,37	7106,947	1,980	0,247	3,561
1939/1940 - 1988/1989	28948,49	7028,711	2,011	0,243	3,570
1940/1941 - 1989/1990	28791,73	7069,037	2,034	0,246	3,508

Período	Media	Desvío	Coef. Asimetría	Coef. Variación	Coef. Curtosis
1941/1942 - 1990/1991	29149,70	7368,069	1,826	0,253	3,424
1942/1943 - 1991/1992	29708,24	8147,376	1,740	0,274	3,340
1943/1944 - 1992/1993	29838,24	8102,162	1,728	0,272	3,292
1944/1945 - 1993/1994	30049,84	8003,356	1,739	0,266	3,320
1945/1946 - 1994/1995	30327,23	7928,284	1,715	0,261	3,347
1946/1947 - 1995/1996	30187,82	7929,555	1,766	0,263	3,343
1947/1948 - 1996/1997	30433,86	8099,421	1,626	0,266	3,250
1948/1949 - 1997/1998	30948,92	8392,233	1,489	0,271	3,239
1949/1950 - 1998/1999	31284,77	8336,359	1,439	0,266	3,262
1950/1951 - 1999/2000	31086,53	8556,954	1,307	0,275	3,166
1951/1952 - 2000/2001	30979,75	8563,441	1,342	0,276	3,137
1952/1953 - 2001/2002	30969,71	8569,602	1,341	0,277	3,048
1953/1954 - 2002/2003	31058,01	8477,748	1,388	0,273	3,115
1954/1955 - 2003/2004	30940,74	8524,188	1,400	0,276	3,022
1955/1956 - 2004/2005	30927,21	8531,218	1,400	0,276	2,923
1956/1957 - 2005/2006	30856,45	8560,973	1,406	0,277	2,817
1957/1958 - 2006/2007	30887,14	8553,982	1,399	0,277	2,711
1958/1959 - 2007/2008	30657,30	8666,045	1,396	0,283	2,649
1959/1960 - 2008/2009	30421,40	8738,075	1,425	0,287	2,628
1960/1961 - 2009/2010	30573,97	8681,853	1,408	0,284	2,581
1961/1962 - 2010/2011	30473,26	8661,913	1,452	0,284	2,588
1962/1963 - 2011/2012	30490,77	8650,560	1,454	0,284	2,516
1963/1964 - 2012/2013	30674,49	8616,866	1,413	0,281	2,448
1964/1965 - 2013/2014	30868,10	8561,825	1,382	0,277	2,403
1965/1966 - 2014/2015	30794,23	8551,651	1,413	0,278	2,367
1966/1967 - 2015/2016	30656,19	8391,156	1,476	0,274	2,878



Para la selección de la función de distribución teórica se tuvieron en cuenta el ECMV y ECMF.

Para el análisis de frecuencia de la serie completa, que superan a 100 los valores a procesar, se utilizó una versión de prueba del paquete estadístico HYFRAN©, desarrollado por la Cátedra de Hidrología Estadística CR-NSG-INRS-Eau/Hydro-Québec(Département d'Hydrologie) /Alcan.

RESULTADOS

Las estadísticas calculadas para las series de caudales medios diarios ($Q_{meddiario}$) y

máximos diarios anuales (Q_{max}) fueron presentadas anteriormente en las Tablas 2 y 3. Del análisis de dichas tablas surge:

- Estadísticas de tendencia central: se nota un crecimiento de estas estadísticas al comparar la serie total (1904-2016) con la moderna total (1970-2016) y sus fracciones. En la Tabla 5 se presentan dichas variaciones tomando las estadísticas de la serie total como base "1".

Tabla 5: Variaciones de estadísticas de tendencia central.

		1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Qmed diario	Media	1	1,127	1,099	1,105
	Me - diana	1	1,094	1,069	1,079
	Moda	1	1,185	1,185	1,185
Qmax	Media	1	1,133	1,071	1,072
	Me - diana	1	1,103	1,056	1,083
	Moda	1	1,145	1,145	1,145

- Estadísticas de variabilidad: el desvío estándar muestra un crecimiento al comparar la serie 1970-2000 (1,11), 1970-2010 (1,017), pero no para la serie 1970-2016 (0,989), al comparar las series modernas con la serie total, mientras que el rango disminuyó y el valor máximo se mantuvo igual (que corresponde a la mayor creciente registrada en el año 1982/83); el coeficiente de variación tampoco mostró variaciones significativas. En la Tabla 6 se presentan dichas variaciones tomando como base de comparación "1" las estadísticas de la serie total.

Tabla 6: Variaciones de estadísticas de variabilidad.

		1904-2016	1970-2000	1970-2010	1970-2016
Qmed diario	Desvío estándar	1	1,110	1,017	0,989
	Rango	1	0,956	0,956	0,956
	Mínimo	1	1,630	1,630	1,630
	Máximo	1	1,000	1,000	1,000
Qmax	Desvío estándar	1	1,284	1,206	1,137
	Rango	1	0,944	0,944	0,944
	Mínimo	1	1,177	1,177	1,177
	Máximo	1	1,000	1,000	1,000

Los resultados obtenidos de los valores de

la variable para la serie completa se presentan en Tabla 7 para distintas recurrencias.

Los resultados obtenidos de los valores de la variable para la serie moderna se presentan en Tabla 8 para distintas recurrencias.

Para evaluar la bondad de los ajustes estadísticos de la serie moderna de caudales para distintas recurrencias se calculó el error cuadrático medio de la variable (ECMV) y el error cuadrático medio de la frecuencia (ECMF), para luego elegir el ajuste más eficiente. En Tabla 8 se indica la distribución adoptada para los distintos períodos analizados y los valores de la variable para la serie moderna y distinta recurrencia.

Tabla 7: Valores de la variable en m³/s para la serie completa 1904-2016.

T (años)	Probabilidad	Gumbel	GEV	LogPearsonIII	Exponencial
1000	0,01	63.626	68.690	69.487	102.691
500	0,002	59.862	63.819	64.341	94.083
200	0,005	54.880	57.591	57.876	82.704
100	0,01	51.104	53.028	53.312	74.097
50	0,02	47.314	48.583	48.711	65.489
25	0,04	43.496	44.236	44.336	56.881
20	0,05	42.256	42.853	42.946	54.110
10	0,10	38.349	38.578	38.651	45.502
5	0,2	34.275	34.259	34.296	36.894
Test χ^2		verifica	verifica	verifica	No verifica

Tabla 8: Valores de la variable en m³/s para la serie moderna y distinta recurrencia.

Período	T=100 años	T=1.000 años	Distribución adoptada
1970 – 2000	68.532	96.335	GEV
1970 – 2010	66.402	100.037	GEV
1970 - 2016	62.884	90.305	GEV

En tabla 9 se muestran las recurrencias del caudal máximo registrado en 1983 de

$Q_{max}=60.215m^3/s$.

Tabla 9: Recurrencia para $Q_{max}=60.215 m^3/s$ de la serie moderna.

Periodo	T (años)	Distribución adoptada
1970 – 2000	45,05	GEV
1970 – 2010	58,82	GEV
1970 - 2016	76,92	GEV

CONCLUSIONES

- El crecimiento de los valores de estadísticas de tendencia central y del desvío estándar estarían indicando que los eventos críticos de diseño deberían ser recalculados, teniendo en cuenta la ecuación generalizada de frecuencia de Chow [10], [13], utilizada en diseños hidrológicos e hidráulicos indicada en (1):

$$x^{\wedge} = x_m + S.k \quad (1)$$

en la cual:

x^{\wedge} Valor crítico de la variable hidrológica

x_m Valor de la media

S Desvío estándar

k Factor de frecuencia, función de la importancia (probabilidad) del evento crítico.

- Los análisis de frecuencia de crecidas deben ser permanentemente actualizados cuando se dispone de nuevos registros.

- Del análisis de series móviles (Tabla 4), el coeficiente de asimetría muestra variaciones muy marcadas: por ejemplo, el del período 1904-1905 1953-1954 (50 años) es 1,004, pues incluye en su extremo (1904-1905) el tercer máximo caudal registrado.

- Después de la crecida de 1982/1983 se registraron otras crecidas importantes (años 1988, 1992 y 1998), que elevan el valor de la media, pero no modifican la variabilidad de la serie.

- Se observa en los últimos años una mayor frecuencia de valores cercanos y superiores a $40.000m^3/s$ y además se destaca la atención la sucesión de eventos extraordinarios que alcanzaron o estuvieron en el orden de $50.000m^3/s$ (1983, 1992 y 1998).

- Esas variaciones estadísticas serían producto del cambio de uso del suelo en la

cuenca y del efecto hidrológico de las presas construidas en los últimos cincuenta años, pudiendo influir también las manifestaciones del cambio climático.

- Revisados distintos trabajos sobre el tema, no se encontró antecedentes de que haya una única distribución de probabilidad que ajuste y sea representativa de la muestra de distintas longitudes, por ello esa adopción deberá ser hecho para cada caso particular.

- Los análisis de frecuencia de crecidas deben ser permanentemente actualizados cuando se dispone de nuevos registros (un nuevo evento crítico modifica las estadísticas).

- De los análisis efectuados sobre la serie moderna y de las distribuciones consideradas se obtuvieron para las recurrencias de diseño de 100 años y 1000 años los caudales de $62.884m^3/s$ y $90.305m^3/s$ respectivamente.

- Se recomienda realizar un análisis de frecuencia de volumen y duración de crecidas, especialmente en ríos de llanura como el Paraná.

- Para el proyecto de futuras obras hidráulicas será necesario normalizar cuál sería la serie moderna a emplear para los eventos críticos de diseño.

REFERENCIAS

- [1] Paoli, C.; Schreider, M. (2000). *El río Paraná en su tramo medio*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión – Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe.
- [2] Pilar, J.V. (2003). *Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para a otimização de traçados de obras de engenharia civil: O caso do sistema de defesa contra inundações da cidade de Resistencia, Argentina*. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- [3] Paoli, C. (1987). *Control y protección de crecidas - Análisis probabilístico y perfiles de niveles máximos*. INCYTH. MOSP. Buenos Aires
- [4] Walqhist, O. (1906). *La Gran Creciente de*

1905 del río Paraná y sus afluentes. Oficina Meteorológica Argentina. Buenos Aires.

[5] Aisiks, E. (1984). *La gran crecida del río Paraná de 1983*. TECHINT. Boletín Informativo n°232. Buenos Aires.

[6] Ceirano, E. (1985). *Evaluación de la crecida de 1982-83 del río Paraná y su influencia sobre la estimación estadística de caudales máximos*. AyEE.

[7] Huerta et al. (1999). *Estudios de Prefactibilidad y Anteproyecto Definitivo de la Interconexión Vial entre las Provincias de Corrientes y Santa Fe*. Consejo Federal de Inversiones (C.F.I.) 09/08/2019 <http://biblioteca.cfi.org.ar/biblioteca>. Argentina.

[8] Base de Datos Hidrológica Integrada 2019. Datos de caudales medio diarios de la estación Corrientes (3805) Subsecretaría de Recursos Hídricos - Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda - República Argentina. 25/08/2019. <http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/>

[9] Chow, V.T., Maidment, D.; Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw-Hill. Santa Fe de Bogotá. Colombia.

[10] Naghettini, M.; Andrade Pinto, E. (2007). *Hidrología estadística CPRM – Serviço Geológico do Brasil*. Belo Horizonte.

[11] Paoli, C.; Cacik, P.; Bolzicco, J. (1991). *Análisis de frecuencia de crecidas del río Paraná*. Convenio Agua y Energía – Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Publicación FICH-UNL. Santa Fe.

[12] Paoli, C.; Bolzicco, J.; Cacik, P. (1991). *Análisis de frecuencia para la determinación de la crecida de diseño*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe.

[13] Tucci, C.E.M. (1997). *Hidrología ciência e aplicação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.



Imágenes, gentileza de: Departamento de Ingeniería, UNS y Facultad Bahía Blanca, UTN Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires