

Paper 18 – Caracterización Hidrodinámica en aguas bajas para la Vía Navegable del río Paraná

Martín Sabarots Gerbec y Juan Borús

Instituto Nacional del Agua, AU Ezeiza – Cañuelas, tramo J. Newbery km. 1,62 Ezeiza, BA, Argentina.

Email: msabger@gmail.com

ABSTRACT: Las situaciones de aguas bajas en el río Paraná tienen un impacto económico que amerita su análisis recurrente. Los años secos registrados en el período posterior a 1999 se caracterizaron por niveles fluviales persistentemente bajos, con la consiguiente dificultad para la navegación y la reducción de los calados operativos. Por lo tanto, existe una necesidad creciente de cuantificar los riesgos para la navegación, así como en lo que hace a otros usos del recurso.

La gradual entrada en operación de los aprovechamientos hidroeléctricos emplazados en la alta cuenca brasileña fue modificando la respuesta estacional de la misma. En una forma más gradual, pero también irreversible, se fue corriendo la frontera agrícola en aquella región hacia el oeste, con la consiguiente modificación de la respuesta hidrológica de los suelos. El efecto más significativo es la moderación de los caudales y niveles mínimos en correspondencia con el cordón portuario Santa Fe – San Pedro.

Continuando con estudios para condiciones de aguas bajas, se busca generar información útil a los usuarios y operadores de la vía navegable. Esta labor se apoya sobre trabajos de modelación hidrodinámica y pronóstico hidrológico llevados a cabo de forma permanente en el INA, utilizando un modelo numérico satisfactoriamente validado para evaluar condiciones históricas de niveles y caudales, Sabarots Gerbec (2014), Borús-Sabarots Gerbec (2015), Re y otros (2015).

En lo que respecta al efecto antropogénico, se evalúa la aplicación de la metodología planteada por Brostein (2000) y actualizada por los autores, Borús-Sabarots Gerbec (2015).

Los productos presentados en el presente trabajo se centran en el análisis estadístico y espacial de las principales variables hidrodinámicas. En los que respecta a caudales, se realiza una actualización de la estadística en Rosario y se la complementa con un análisis análogo en el Eje Paraná-Santa Fe, Zarate (Paraná de las Palmas) y Brazo Largo (Paraná Guazú).

Por otra parte, se generan tablas con las principales permanencias de niveles para las principales terminales portuarias. Complementariamente, se realiza el análisis discriminado por estación del año.

Como producto del análisis, se presentan las curvas de duración de caudales y niveles mínimos, así como los ajustes de recurrencias de caudales mínimos en la vía navegable.

Por último se confeccionan mapas que reflejan espacialmente los resultados antes obtenidos para lograr una lectura global y completa de las condiciones hidrodinámicas de la vía navegable en situaciones de bajante.

Palabras clave: Río Paraná, bajantes, embalses, navegación, recurrencias.

1 INTRODUCCIÓN

Las cuencas de los ríos Paraná y Paraguay son motivo de permanente monitoreo para actualizar su condición hidrológica y realizar pronósticos hidrométricos como apoyo a las diversas actividades que se realizan en la vía fluvial. La más significativa sin dudas es la navegación fluvial comercial en gran escala, actividad supeditada a la disponibilidad de profundidades suficientes para los buques de gran calado.

2 OBJETIVO

Presentar las conclusiones del análisis comparativo y establecer la base conceptual para el monitoreo permanente de apoyo a la navegación, con vistas a posibles años de aguas muy bajas en los que la atención se concentre en el pronóstico de niveles mínimos. La conformación de series de datos observados y corregidos, más la disponibilidad de modelos ajustados al escenario fluvial permite fortalecer el seguimiento para ofrecer un servicio eficiente.

2 Metodología

Se realizará un análisis con caudales de manera de considerar la dinámica del escurrimiento. Para ello se consideran las secciones de frecuente aforo correspondientes a la Red Hidrológica Nacional. La sección ubicada en Timbúes, agua arriba de Rosario, resulta conveniente por la disponibilidad de aforos, con la debida limitación por la modificación de la traza del río desde la cabecera del Delta. El énfasis estará puesto en el tramo agua abajo de la sección Paraná - Santa Fe, primero en caudales y luego en alturas.

2.1 Modelo Hidrodinámico

Se cuenta con un modelo hidrodinámico unidimensional desarrollado en red de canales del Delta Medio, desde el eje Paraná-Santa Fe hasta la desembocadura en el Río de la Plata (Sabarots Gerbec, 2014). La Figura 1.- detalla la región de estudio.

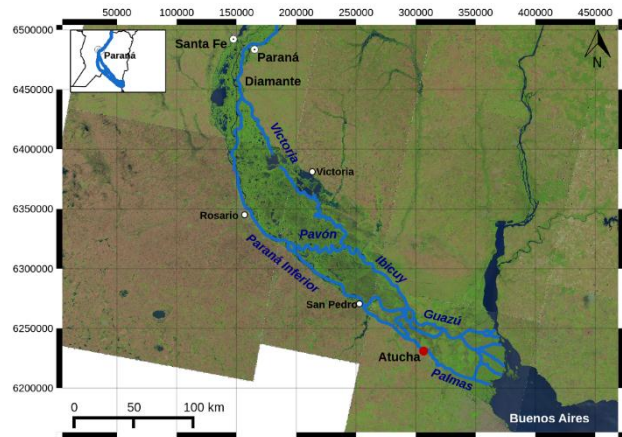


Figura 1. Ubicación de la Región en Estudio

2.2 Forzantes del sistema

Para el forzante aguas arriba del modelo hidrodinámico se combina el uso de los niveles de agua registrados en Paraná y la curva Altura-Caudal (HQ) en el eje Paraná-Santa Fe. Para la construcción de la curva HQ a altura del Túnel Subfluvial se cuenta con datos de aforos desde 1982 hasta la actualidad. Para computar correctamente el caudal del Paraná, es necesario tener en cuenta el escurrimiento del río Colastiné y la descarga de la laguna Setúbal. En la evaluación histórica de la evolución de caudales del Paraná se presenta un cambio en la serie a partir de 1975. Este cambio se debió a la entrada en operación de distintas presas sobre la alta cuenca del río Paraná. La mayor regulación del río implicó un aumento en los niveles mínimos como se puede observar a simple vista en la Figura 2.

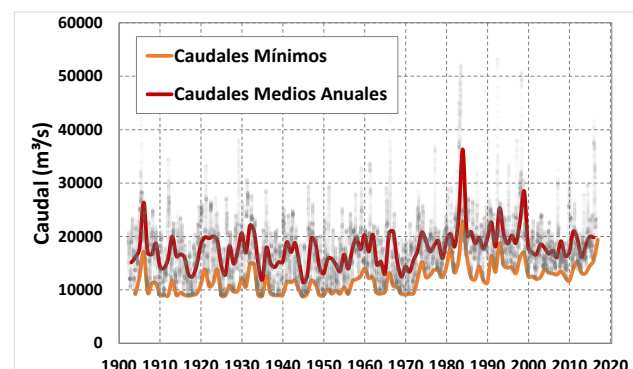


Figura 2: Evolución histórica de Caudales

Para la condición de borde de aguas abajo se tomó nivel en Tigre y en Martín García para las simulaciones de Validación y el medio en el Río de la Plata (0,6m IGN) tomando como referencia las series de Tigre y Martín García para las

corridas de la serie histórica. Dicha condición de borde introduce una distorsión en los resultados para las estaciones con mayor influencia de la onda de marea (ej Zárate, Campana) a diferencia de estaciones ubicadas aguas arriba de Baradero donde la modulación de los niveles es predominantemente debida al régimen fluvial del Paraná (Sabarots Gerbec, 2014).

2.3 Validación

El modelo hidrodinámico fue validado tanto para niveles como para caudales, haciendo especial énfasis en estos últimos, aunque sólo se dispuso de cuatro estaciones de aforo claves:

1. Curva HQ en la sección Paraná-Santa Fe, permite validar la correcta entrada de caudales
2. Aforos en Puerto Timbúes, permite validar la partición de caudales entre la rama Paraná y la rama Victoria del modelo hidrodinámico
3. Aforos en el eje Zárate-Brazo Largo, permiten validar la partición de caudales entre el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú

En la Figura 3 se comparan los valores obtenidos de la modelación y los observados para la curva HQ en el eje Santa Fe-Paraná. Se observa un buen acuerdo general, especialmente para caudales medios y bajos (<25000 m³/s) y una leve sobreestimación de caudales en situaciones de crecida.

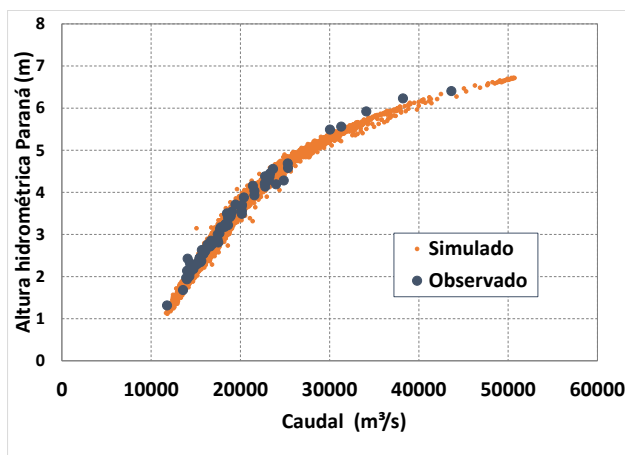


Figura 3: Validación curva Altura-Caudal en Santa Fe-Paraná

Adicionalmente se comparan series de caudales en secciones representativas del Paraná (Timbúes) y aguas abajo del Paraná de las Palmas y Paraná Guazú, Figura 4. Se puede ver

que mantiene un buen acuerdo tanto en aguas altas como en aguas bajas.

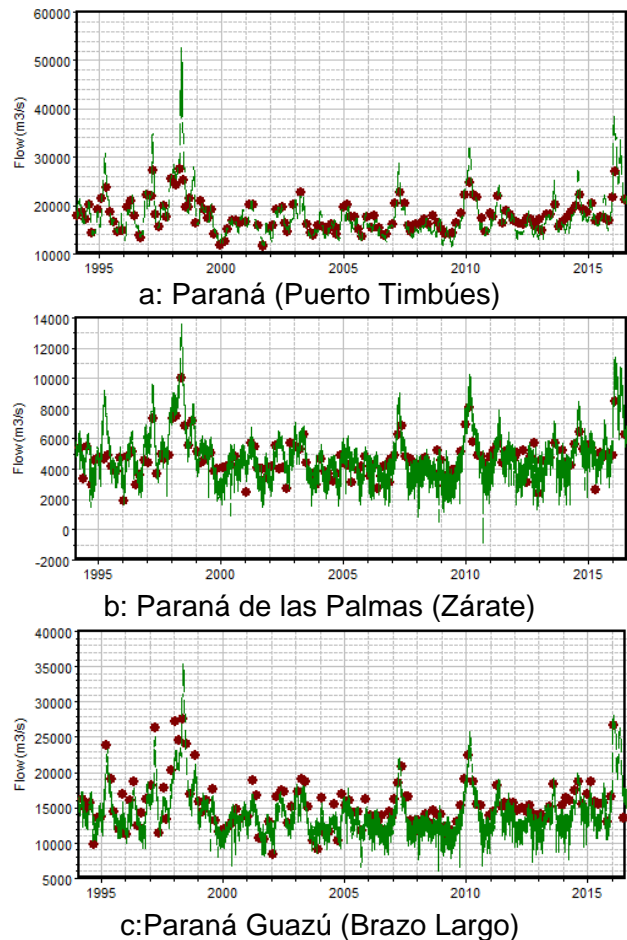


Figura 4: Validación series de caudales

2.3 Análisis serie histórica

Con el objetivo de tener en cuenta los cambios que se han dado a lo largo del tiempo (construcción de embalses, cambio del uso del suelo, etc.) es posible realizar correcciones sobre la serie histórica de datos a fin de obtener una serie homogénea que represente la condición actual (Borús-Sabarots, 2015).

En el presente trabajo se evaluó la posibilidad de corregir la serie histórica, de modo de tener mayor cantidad de datos para realizar análisis estadísticos. La principal corrección está dada sobre la relación entre los valores medios anuales y los mínimos extremos. Dado que existe una correlación entre ambas variables es factible obtener una expresión que las vincule y aplicarla a la ventana de tiempo de la serie que no donde aún no se habían introducido los principales cambios de la cuenca.

La Figura 5 muestra la correlación entre Niveles Medios Anuales y Extremos Mínimos Anuales discriminados para dos períodos de análisis.

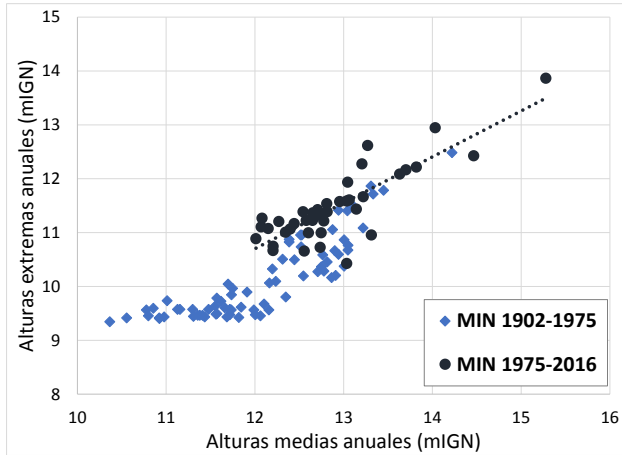


Figura 5: Relación entre Niveles Medios Anuales y Extremos Mínimos Anuales en el eje Paraná-Santa Fe

Otra forma de observar la clara diferencia entre el comportamiento del sistema antes y después la década del 70 es computando la curva de excedencia de caudales para los dos períodos. En la Figura 6 se observa como toda la curva de excedencia correspondiente a la condición actual (de regulación del río por los embalses) es siempre superior a la curva de la situación pasada.

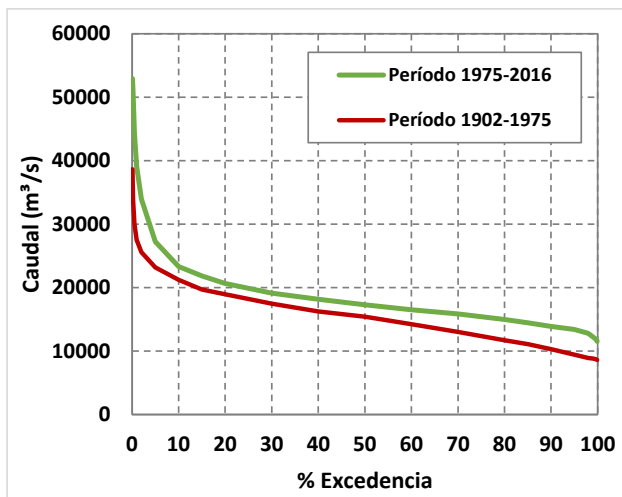


Figura 6: Curvas de excedencia de caudales en el Eje Paraná-Santa Fe

En consecuencia se opta por realizar el análisis descriptivo de la condición de aguas bajas con la serie actual, es decir, posterior a 1975.

3 Resultados

A partir de la simulación de la ventana de tiempo 1975-2016 se obtuvieron resultados de nivel y caudal en distintos puntos del sistema, en particular en los principales puertos de la vía fluvial.

Los resultados fueron procesados teniendo en cuenta dos criterios de análisis:

1. Curvas de excedencia: obteniendo valores umbrales que son superados un determinado porcentaje del tiempo
2. Períodos de retorno: que resulta el enfoque clásico al dimensionamiento de obras hidráulicas, donde se obtienen valores de caudales o niveles con probabilidad de ocurrencia de al menos una vez en el período de retorno dado en años.

3.1 Caudales

En la Figura 7 se presentan las curvas de excedencia que resultan para las principales estaciones de aforo (antes utilizadas en la validación). En la Tabla 1 se presentan algunos valores característicos, notándose que para caudales con excedencias superiores al 90% del tiempo, las diferencias entre el escurrimiento en Paraná y en Rosario son menores a 1000 m³/s. Por otra parte la partición entre el Guazú y el Palmas es del orden de 75-25% respectivamente.

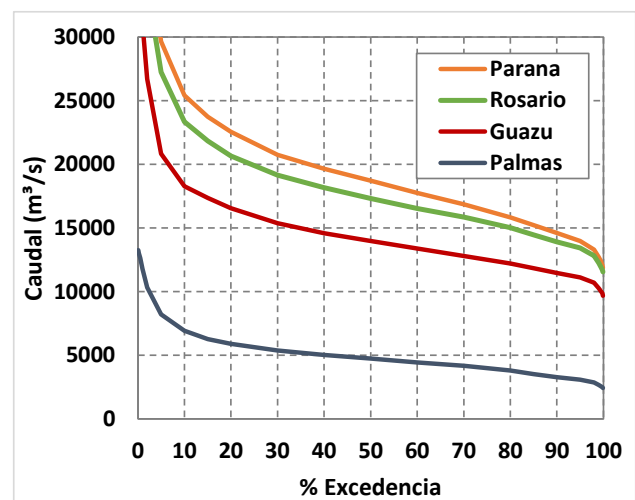


Figura 7: Relación entre Niveles Medios Anuales y Extremos Mínimos Anuales.

Tabla 1: Caudales para distintas excedencias

Excedencia (%)	Paraná	Rosario	Guazú	Palmas
50	18700	17350	14000	4750
90	14600	13900	11500	3300
95	14000	13450	11100	3050
99	12700	12250	10250	2650

Además del análisis de curvas de excedencia, se realizó un ajuste estadístico con dos distribuciones: GEV (Generalizad Extreme Values de 3 parámetros) y Gumbel.

En la Figura 8 se observan los caudales asociados a un período de retorno (T_r) en Rosario. Para recurrencias de 2 y 5 años los resultados entre ambas distribuciones resultan similares, a partir de $T_r = 10$ años, los caudales obtenidos mediante la distribución GEV toman un comportamiento asintótico.

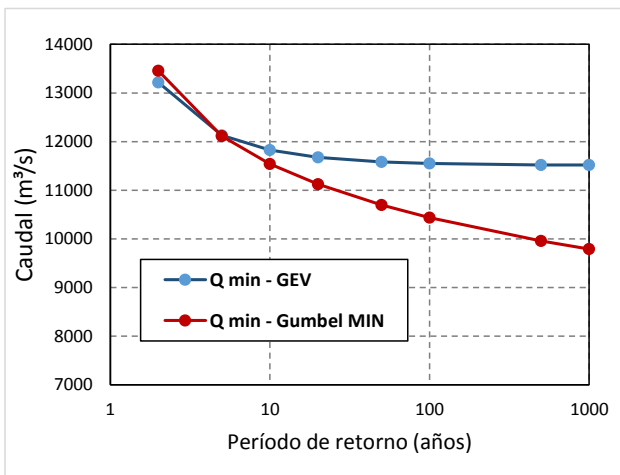


Figura 8: Caudales para distintas recurrencias en Rosario

Dado que los análisis fueron realizados con datos correspondientes a una ventana de tiempo de 40 años, resulta prudente restarle peso a cálculos asociados a recurrencias mayores a 50 años. En este sentido, en la Tabla 2 se presentan los resultados de caudales para distintos T_r en las principales estaciones de aforo.

Tabla 2: Caudales para distintas recurrencias

Recurrencia (años)	Paraná	Rosario	Guazú	Palmas
2	13450	13200	11050	3100
5	12300	12150	10250	2650
10	12000	11850	10050	2550
20	11850	11700	9950	2500
50	11800	11600	9850	2450

3.2 Niveles

Para los niveles se realiza un análisis análogo al de caudales (curvas de excedencia y períodos de retorno), pero obteniendo resultados para distintos puertos de la vía navegable.

En la Figura 9 se presentan los niveles hidrométricos, referidos al cero local, asociados a distintos porcentajes de excedencia.

Se observa que las diferencias entre los niveles que son superados el 90% y el 99% del tiempo se encuentran en el rango entre 60 y 70 cm, disminuyendo en las estaciones de aguas abajo (Ramallo, San Pedro y Baradero) a diferencias entre 30 y 50cm.

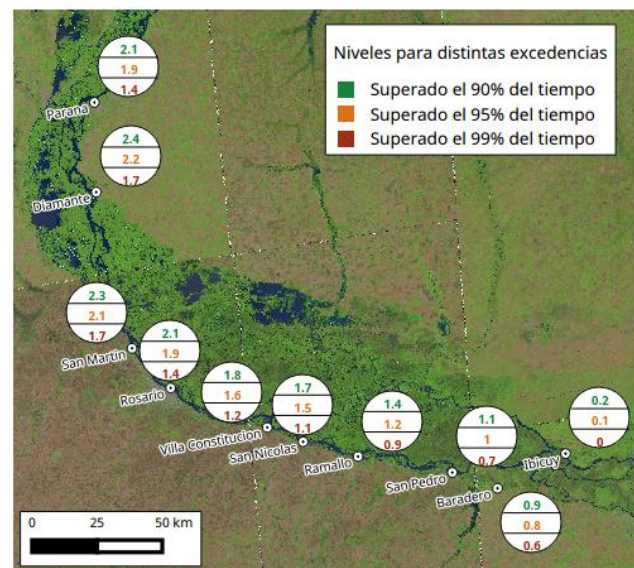


Figura 9: Niveles asociados a distintas excedencias

De la misma forma que en los caudales, se realizaron ajustes estadísticos de los Niveles Mínimos Anuales Extremos. La Figura 10 presenta un comportamiento similar al de los caudales, solo que la consistencia entre los resultados del ajuste de la GEV y la Gumbel se extiende hasta períodos de retornos de 10 años. Para mayores recurrencias los niveles se vuelven rápidamente asintóticos con un ajuste tipo GEV.

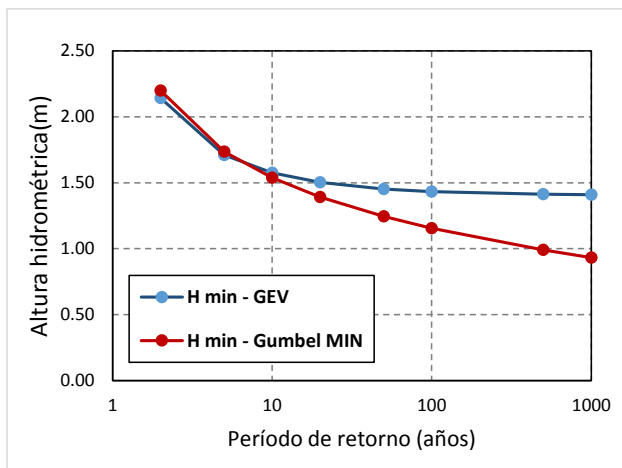


Figura 10: Niveles para distintas recurrencias en Rosario

Si bien en una evaluación de la bondad de ajuste, ambas distribuciones tienen una performance buena y similar entre sí, se toman los resultados de la GEV por presentar resultados acordes al comportamiento del sistema en períodos de estiaje, es decir, asintóticos a un valor límite asociado con las características hidrológicas de la cuenca. Los niveles hidrométricos referidos al cero local que surgen del análisis se presentan en la Figura 11.

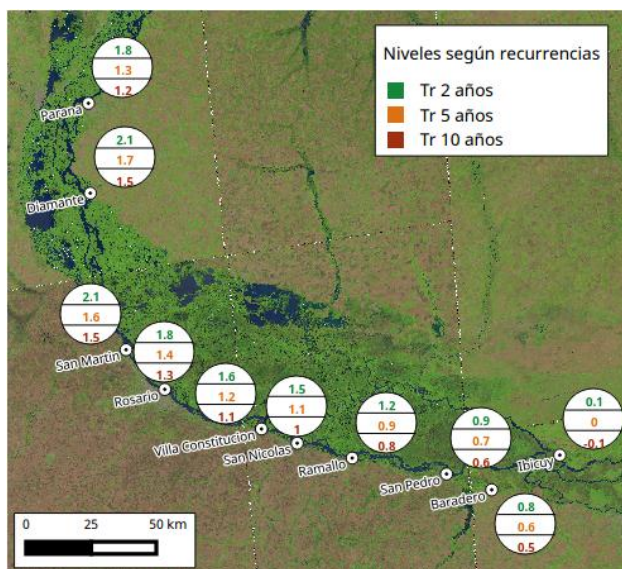


Figura 11: Niveles asociados a distintas recurrencias

3.3 Duración de las bajantes

Enfocando el análisis en la operación de los puertos, resulta de interés conocer las duraciones de las bajantes. Para esto, es necesario determinar cuánto tiempo han durado las bajantes asociadas a un nivel crítico de navegabilidad para cada puerto. Dicho nivel está asociado a distintos factores como el régimen fluvial, el calado de las distintas embarcaciones según su carga, dragado que se mantiene en cada terminal portuaria, etc.

Dado que para el presente trabajo no se contó con el dato de nivel crítico, se adoptaron distintos umbrales y se computaron las duraciones de las bajantes. En otras palabras se contabilizó la cantidad de días consecutivos que el río se encuentra por debajo de un nivel arbitrario en la progresiva de las distintas estaciones.

Para definir los umbrales se utilizaron los mismos criterios de excedencia y recurrencia antes presentados.

Se excluyen de este análisis las estaciones Campana e Ibicuy, ya que la simulación de la serie histórica se realizó con una condición de borde de nivel medio del Río de la Plata y estos puntos presentan una fuerte influencia de la marea.

En la Figura 12 se presenta la duración promedio de bajante asociada a distintas excedencias. Se puede observar que las duraciones de las bajantes se incrementan si se analizan las estaciones desde aguas arriba hacia aguas abajo. Con este conjunto de valores umbrales, las duraciones de bajantes se encuentran en el rango entre 22 y 37 días para un nivel superado el 90% del tiempo, y disminuyen a un rango entre 12 y 24 días para un nivel asociado al 99% de excedencia.

La cantidad de eventos de bajante para el período de análisis (1975-2016), varía entre 6 y 12 eventos para una excedencia de 99% y de 40 y 67 eventos para una excedencia del 90%.

A fin de tener una referencia, con un nivel umbral asociado a una excedencia del 99% (una bajante importante), alcanza una duración de 40 días en el Puerto de Rosario para el evento de Julio de 2009.

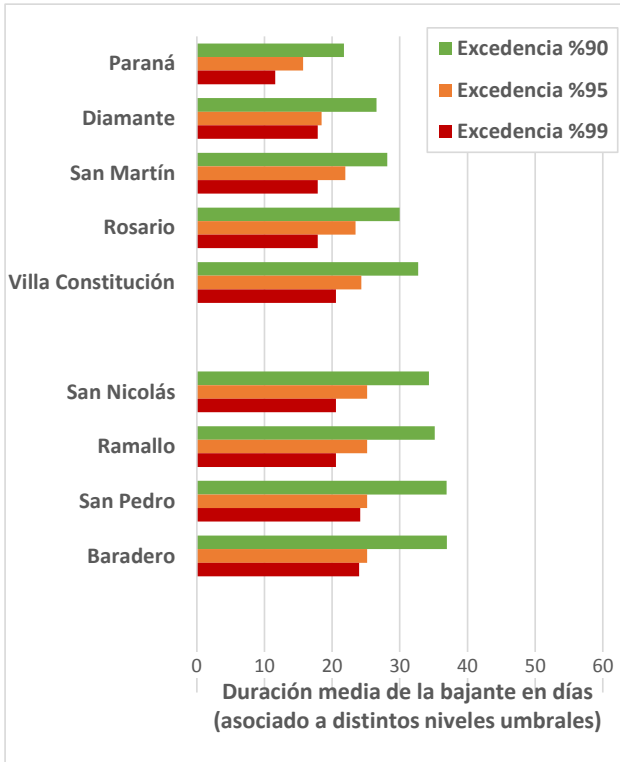


Figura 12: Duraciones de bajantes asociados a distintas excedencias

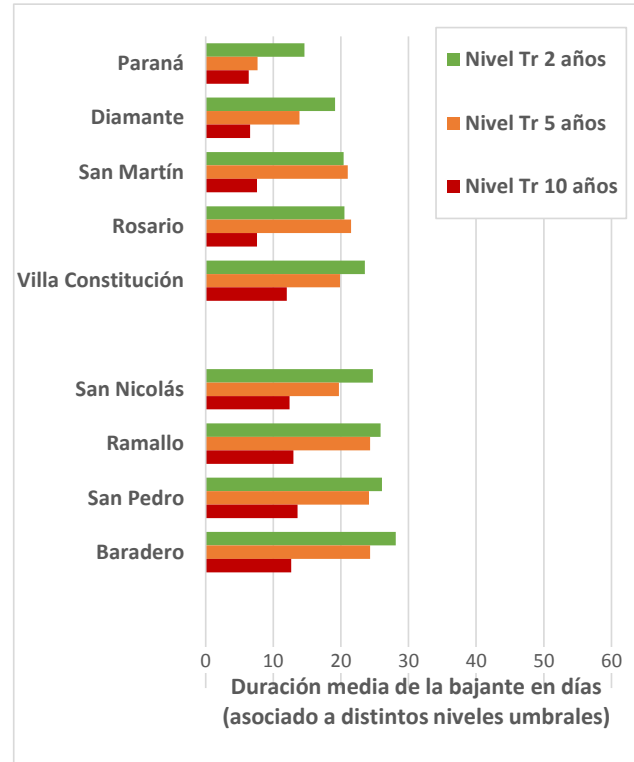


Figura 13: Duraciones de bajantes asociados a distintas recurrencias

Repitiendo el análisis para el criterio de umbrales definidos por períodos de retornos, en la Figura 13 se presentan los resultados de duraciones de bajantes según los distintos niveles.

Se observa que para niveles umbrales asociados a un periodo de retorno de 2 años, las duraciones de bajantes quedan comprendidas entre los 15 y 28 días, lo cual sería consistente con un valor umbral de 95% de excedencia.

Si en cambio se analizan las duraciones vinculadas a un $Tr = 10$ años, se tienen valores promedios en el rango entre 6 y 14 días.

4 CONCLUSIÓN

A partir de un modelo numérico satisfactoriamente validado, se han obtenido series históricas de niveles y caudales para los principales puertos de la vía navegable. Dada las limitaciones en la condición de borde de aguas abajo, se consideran resultados confiables solo los que se obtienen para estaciones aguas arriba de Baradero.

Si bien se realizaron simulaciones desde 1902 hasta la actualidad, se ha descartado la ventana de tiempo anterior a 1975, ya que en la década del 70 ocurren cambios antropogénicos en la cuenca que implican una modificación de los caudales medios y mínimos.

Para caracterizar el comportamiento hidrodinámico en aguas bajas se tomaron dos criterios: curvas de excedencia y períodos de retorno.

Bajo estos criterios se obtuvieron valores representativos de caudales del Paraná en el eje Paraná-Santa Fe, en Rosario y en los cursos de aguas abajo en los que se bifurca el Paraná: Palmas y Guazú. Tomando los resultados del ajuste de una distribución GEV, se tiene que los caudales del Paraná para períodos de retorno superiores a 50 años se vuelven asintóticos a $11750 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el Palmas y

Guazú los caudales son de 2450 y 9800 m³/s respectivamente.

En lo referido a los niveles de agua, se caracterizó bajo los dos criterios antes expuestos alturas hidrométricas referidas a los ceros locales en los principales puertos de la vía navegable.

A partir de la simulación de la serie histórica y de niveles umbrales fue posible caracterizar la duración promedio de las bajantes.

Se observó que la duración se incrementa hacia aguas abajo y que bajo los criterios expuestos, el promedio no supera los 40 días.

Los resultados presentados en este trabajo son el producto de un Proyecto Interno llevado a cabo en el INA que busca alcanzar una mejor comprensión hidrodinámica del Delta.

Como parte de un continuo trabajo, los resultados aquí presentados son susceptibles a ser mejorados por ejemplo mejorando la condición de borde de aguas abajo, incorporando en la modelación aportes laterales, etc.

En este marco, los resultados presentados aquí constituyen un punto de referencia útil para el diseño y operación de terminales portuarias.

Sabarots Gerbec, M. (2014). Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná. IFRH 2014, 2do. Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

Zamanillo, E., Tito, M.J., Pérez, M. (2013). Análisis de frecuencia de niveles máximos en el Delta del río Paraná. XXIV Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina, octubre.

REFERENCIAS

Borus J., Sabarots Gerbec M. (2015) Caracterización de Niveles Mínimos en la Vía Navegable del Río Paraná. Congreso nacional del Agua 2015, Paraná, Entre Ríos, Argentina.

Latessa, P. G., (2011) "Modelo Hidrodinámico del río Paraná para pronóstico hidrológico. Evaluación del performance y una propuesta de redefinición geométrica". Instituto Nacional del Agua – Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

Re M., Sabarots Gerbec M., Storto L. (2015) Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.