



**INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS  
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
REPÚBLICA ARGENTINA



## **MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ AGUAS ARRIBA DE YACYRETÁ Y ANÁLISIS DE CASOS**

### **Tercer Informe Parcial**



*Proyecto LHA 357  
Informe LHA 03-357-15  
Ezeiza, Enero de 2016*

**Laboratorio de Hidráulica**

**AUTORIDADES DEL INA**

**PRESIDENTE**

Dr. Raúl A. LOPARDO

**GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS**

Ing. Jorge A. MAZA

**DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA**

Ing. Julio C. DE LÍO

**JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

**EQUIPO DE TRABAJO**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Nicolas D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

**INFORME PRODUCIDO POR**

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Nicolas D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

# MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ AGUAS ARRIBA DE YACYRETÁ Y ANÁLISIS DE CASOS

## Tercer Informe Parcial

### RESUMEN

Se presenta la calibración definitiva del modelo hidrodinámico, utilizando información hidrométrica actualizada y extendiéndolo hasta el pie de los saltos de las Cataratas del Iguazú, el cual luego es verificado. Se aplica el modelo para caracterizar el estado actual. Se analizan las causas del cambio de rugosidad que impuso el embalse de Yacyretá. Se utiliza el modelo para cuantificar el impacto hidrodinámico que tendría la construcción de la presa de Corpus. Se presenta un análisis de la operación de Itaipú.

**Descriptor temático:** Modelación numérica, modelación hidrodinámica, régimen hidrológico, modelo digital de elevación

**Descriptor geográfico:** Río Paraná, Río Iguazú, Embalse de Yacyretá, Argentina, Paraguay, Brasil

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>AJUSTE DEL MODELO</b>	<b>5</b>
2.1	Datos hidrométricos	5
2.2	Datos batimétricos del río Iguazú	10
2.3	Extensión del dominio	12
2.4	Calibración definitiva	16
2.4.1	Datos utilizados	16
2.4.2	Rugosidad calibrada	17
2.4.3	Ajuste del brazo corto del río Iguazú	20
2.4.4	Resultados	21
2.5	Verificación	26
2.5.1	Niveles en estación R11	26
2.5.2	Niveles en estación Puerto Macuco	27
2.5.3	Relaciones altura-caudal	29
2.6	Aplicación a estación R11	33
2.7	Comparación con curvas sintéticas altura-caudal	34
<b>3</b>	<b>ESCENARIO ACTUAL</b>	<b>39</b>

<b>3.1 Estadísticas de niveles</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Influencia de Yacyretá</b>	<b>44</b>
3.2.1 Observación	44
3.2.2 Teoría de van Rijn	44
3.2.3 Aplicación	47
<b>4 ESCENARIOS FUTUROS</b>	<b>49</b>
4.1 Planteo	49
4.2 Escenarios de ensayo	49
4.3 Efectos de la presa de Corpus	50
<b>5 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE ITAIPÚ</b>	<b>64</b>
5.1 Importancia	64
5.2 Datos disponibles	64
5.3 Análisis de datos	66
<b>6 CONCLUSIONES</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

La construcción de la presa de Corpus generará un cambio en las condiciones de flujo del río Paraná, que influenciará tanto aguas arriba, a través de efectos de remanso, como aguas abajo, debido al control de la descarga.

La Comisión Mixta Argentina-Paraguaya del Río Paraná (COMIP) encargó al Instituto Nacional del Agua (INA), a través del Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) de la Universidad Nacional de Misiones, la implementación de un modelo hidrodinámico debidamente calibrado, capaz de dar respuesta a los diversos interrogantes que plantea la construcción de la presa en cuanto a la afectación del régimen hidrológico, incluyendo la influencia de distintas alternativas de obra.

El estudio incluirá las siguientes actividades:

- A. Análisis de datos topobatemétricos, para generar la representación geométrica del sistema a incorporar al modelo.
- B. Análisis de datos hidrométricos, para caracterizar el régimen hidrológico y generar los datos hidrodinámicos a utilizar en la modelación.
- C. Definición de escenarios a ensayar con el modelo, representativos de las situaciones a estudiar.
- D. Aplicación del modelo hidrodinámico preliminar preexistente en el INA, desarrollado para la EBY (Entidad Binacional Yacyretá) durante el “Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción frente a Emergencias)” – en adelante, Estudio PAE.
- E. Ajuste y recalibración del modelo hidrodinámico, en base información actualizada y complementada.
- F. Aplicación del modelo hidrodinámico definitivo.

En el Primer Informe Parcial se presentó y analizó la información hidrométrica antecedente, se describió la información topobatemétrica y la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE), y se describió la implementación y calibración del modelo hidrodinámico preliminar.

En el Segundo Informe Parcial se amplió la información hidrométrica y topobatimétrica, y se presentó una versión actualizada del modelo hidrodinámico hasta la localidad de Posadas, incluyendo un nuevo criterio de representación de la resistencia hidráulica y un procedimiento automático de calibración, con el cual se simularon escenarios previos al llenado del embalse de Yacyretá y a cota definitiva de ese embalse.

En este Tercer Informe Parcial se efectúa la calibración definitiva del modelo hidrodinámico y se analizan las situaciones con y sin presas. La organización del informe es como sigue:

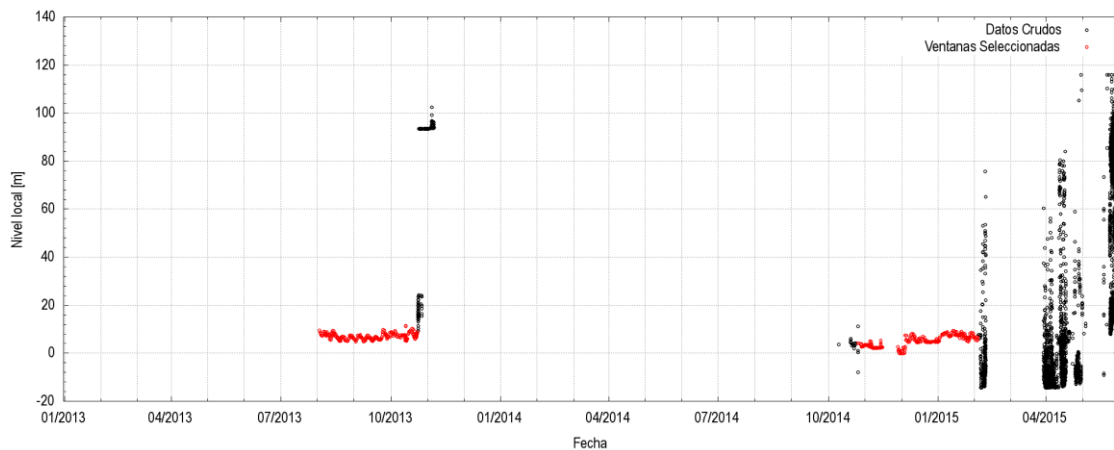
- En el capítulo 2 se describe la calibración definitiva del modelo.
- En el capítulo 3 se caracteriza el escenario actual, y se analiza la influencia producida por la presencia del embalse de Yacyretá.
- En el capítulo 4 se ensayan escenarios futuros con la presa de Corpus construida.
- En el capítulo 5 se efectúa un análisis de la operación de la presa de Itaipú.
- En el capítulo 6 se vierten las conclusiones de esta etapa del estudio.

## 2 AJUSTE DEL MODELO

### 2.1 Datos hidrométricos

En el Segundo Informe Parcial se presentó la base de datos hidrométricos disponible. A continuación se puntualizan los datos específicos que se están utilizando para la implementación del modelo, y se incorporan algunos nuevos ítems de información. En la Tabla 2.1 se actualiza el listado de información presentado en el Segundo Informe Parcial.

En Puerto Macuco se cuenta, desde agosto de 2013, con registros de una estación automática. No obstante, los datos solo muestran cierta normalidad durante un período inicial que se extiende entre el 8 de agosto y el 23 de octubre de 2013, y otra ventana de tiempo que va desde el 26 de octubre de 2014 hasta el 5 de febrero de 2015, tal como se observa en la Figura 2.1. El resto del tiempo se produjo un evidente mal funcionamiento. Se han rescatado esos dos períodos a los fines de la calibración del modelo.



**Figura 2.1.** Registros en la estación automática de Puerto Macuco. En rojo se indican los períodos de registro considerados válidos.

**Tabla 2.1.** Ubicación, fuente y períodos disponibles de los datos hidrométricos.

#	Río	Estación	Fuente	Latitud	Longitud	Cero IGN	Aforos	Niveles	Caudales
4	Iguazú	Salto Cataratas	ANA – Brasil	25° 40' 48" S	54° 25' 48" W	152,06	NO	Ene/1942- Jun/2015	Ene/1942- Jun/2015
6	Iguazú	Pto. Macuco	COMIP	25° 38' 35" S	54° 27' 57" W	Dudoso	NO	SI	NO
7	Iguazú	Pto. Iguazú	SSRH – Argentina	25° 35' 36" S	54° 34' 47" W	125,00	NO	Nov/1913- Jun/2015	NO
8	Paraná	CH Itaipu	Red ITAIPU – Brasil	25° 24' 29" S	54° 35' 21" W	-	-	-	Oct/1982- Jun/2015
10	Paraná	Puente de la Amistad	Red ITAIPU – Brasil	25° 31' 16" S	54° 35' 51" W	NO	NO	Ene/1982- Dic/1993	NO
13	Paraná	R11	Red ITAIPU – Brasil	25° 36' 53" S	54° 35' 54" W	89,26	NO	Ago/1982- Dic/2014	Ago/1982- Dic/2014
14	Paraná	Libertad	PNA – Argentina	25° 55' 0" S	54° 37' 15" W	83,10	NO	Ene/1931- Jun/2015	NO
15	Paraná	El Dorado	PNA – Argentina	26° 24' 2" S	54° 41' 40" W	79,66	NO	Ene/1931- May/2015	NO
16	Paraná	Lib. Gral. San Martin	SSRH – Argentina	26° 47' 30" S	55° 1' 27" W	78,13	Abr/2008- Jun/2015	Sep/1939- Jun/2015	NO
17	Paraná	Puerto Maní	PNA – Argentina	27° 6' 22" S	55° 31' 21" W	79,51	NO	Abr/1997- Jun/2015	NO
18	Paraná	Santa Ana	PNA – Argentina	27° 20' 9" S	55° 35' 21" W	75,04	NO	Ene/1980- Jun/2015	NO

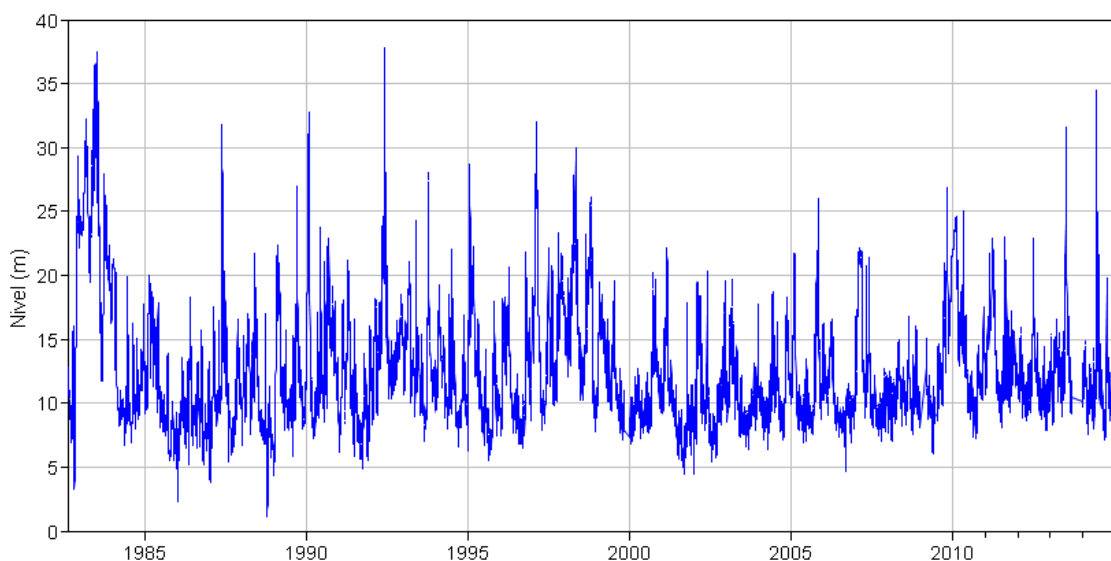
No se cuenta con un valor confiable del cero de la escala de Puerto Macuco. Este fue entonces estimado a través de los resultados del modelo, como se muestra más abajo.

Cabe destacar que, a partir del relevamiento batimétrico realizado en el río Iguazú (ver sección 2.2), se dispuso de dos datos instantáneos del nivel de agua en la progresiva de la estación Puerto Macuco: 107,66 mIGN el día 09 de Febrero de 2011, y 103,77 mIGN el día 04 de julio de 2011.

Nótese que los únicos aforos de que se dispone corresponden a la estación Libertador General San Martín (Puerto Rico). La curva altura caudal obtenida en el Segundo Informe Parcial es la siguiente (con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,992$ ):

$$Q(h) = 72,85 \cdot h^2 + 457,76 \cdot h + 5.365,3$$

donde  $h$  es la altura local. De la página del ANA se obtuvo la serie temporal de niveles de la estación R11 (Figura 2.2) y el correspondiente cero. Para esta estación se cuenta con dos versiones de curva altura-caudal, una del ANA y otra de Itaipú Binacional, las cuales se presentan en la Tabla 2.2 y se grafican en la Figura 2.3. Se observa las dos curvas resultan prácticamente coincidentes en el tramo 2 (rango dentro del cual caen todos los valores registrados), pero que la del ANA provee una extrapolación aceptable para bajos caudales.

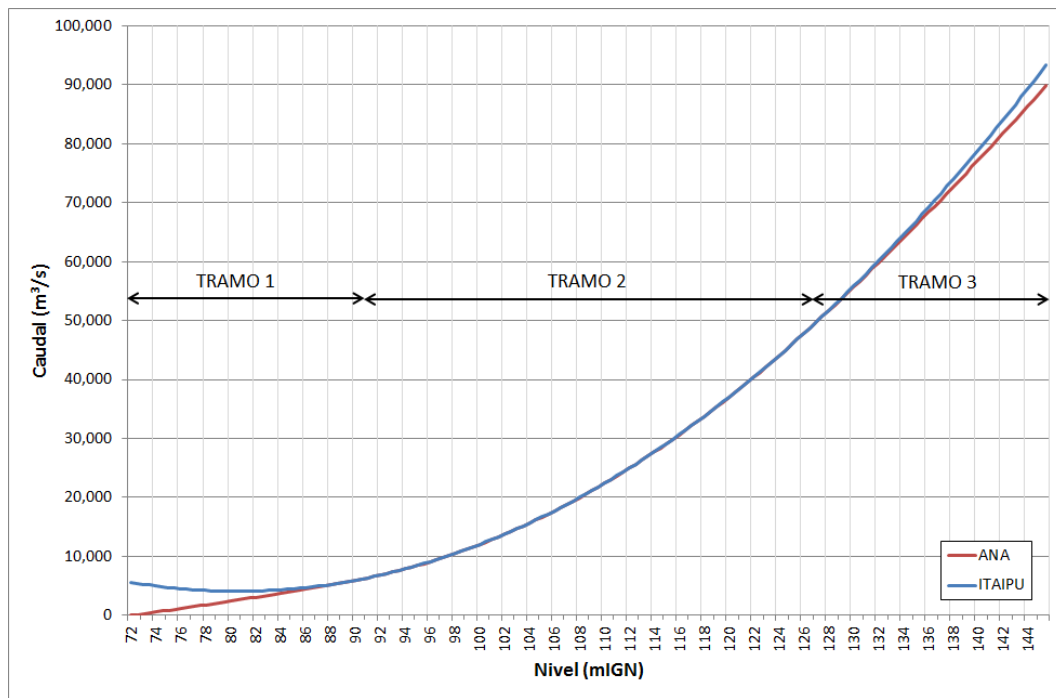


**Figura 2.2.** Niveles en la estación R11.

**Tabla 2.2.** Curvas altura-caudal en la estación R11

Fuente	Tramo	Ecuación
ANA	$72,00 \leq H < 89,50$	$Q = 2,751149(H - 89,26)^2 + 375,1259(H - 89,26) + 5655,085$
	$89,50 \leq H < 127,00$	$Q = 21,23476(H - 89,26)^2 + 366,2538(H - 89,26) + 5656,150$
	$127,00 \leq H < 145,50$	$Q = 227,0235(H - 89,26)^{1,484325}$
ITAIPÚ	-	$Q = 21,192 \cdot h^2 + 367,68 \cdot h + 5666,8$

Nota: H: altura absoluta (mIGN); h: altura local (m)



**Figura 2.3.** Curva altura-caudal en la estación R11.

De un estudio previo desarrollado para la COMIP (Almiron, 2009) se dispuso de curvas sintéticas altura-caudal en estaciones hidrométricas del río Paraná, obtenidas a partir de asociar a cada registro de nivel el caudal correspondiente a la estación R11 (entre los años 1988 y 1992), atrasado en el tiempo de traslado estimado para cada localidad, y luego ajustando una función. Esas curvas, que están expresadas como altura local  $h$  [m] en función de caudal  $Q$  [ $m^3/s$ ] (es decir, en forma inversa a la tradicional), se presentan a continuación, además de graficarse en la Figura 2.4. Adicionalmente, se indica el coeficiente de determinación  $r^2$  del ajuste de la curva a los datos sintéticos.

- La Mina ( $r^2 = 1$ ):

$$h(Q) = 6,886 \cdot 10^{-14} \cdot Q^3 - 6,891 \cdot 10^{-9} \cdot Q^2 + 3,825 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 73,414$$

- Santa Ana ( $r^2 = 0,994$ ):

$$h(Q) = 9,489 \cdot 10^{-14} \cdot Q^3 - 9,497 \cdot 10^{-9} \cdot Q^2 + 2,271 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 72,589$$

- Corpus ( $r^2 = 0,819$ ):

$$h(Q) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 77,472$$

- Montecarlo ( $r^2 = 0,989$ ):

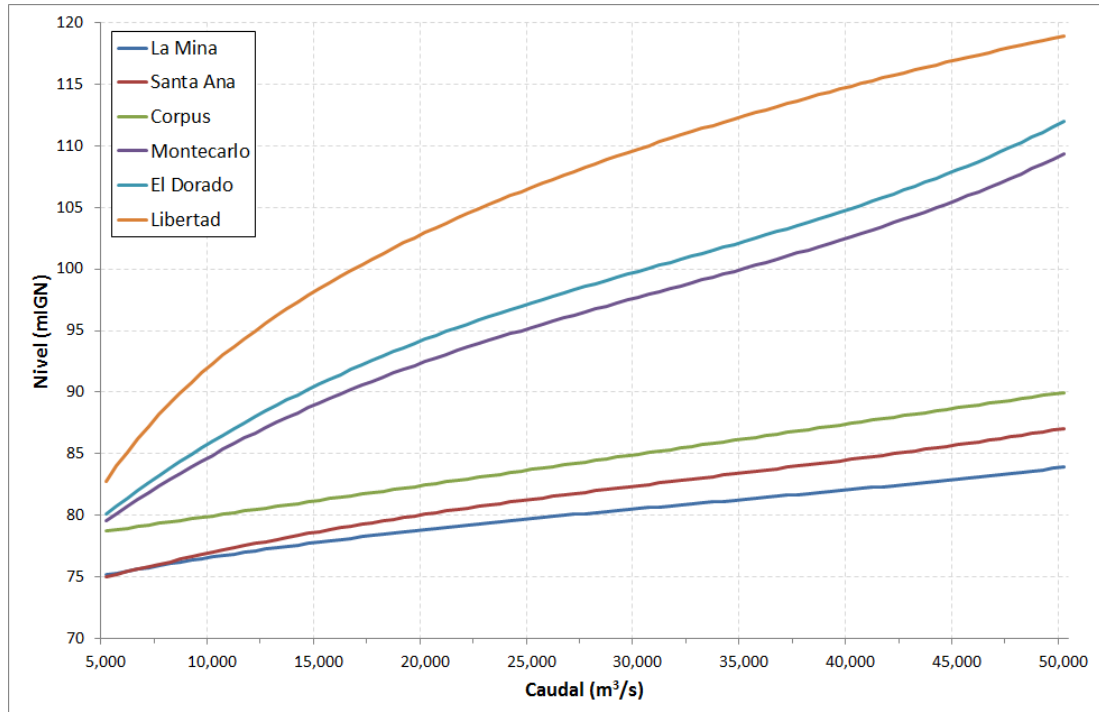
$$h(Q) = 3,463 \cdot 10^{-13} \cdot Q^3 - 3,265 \cdot 10^{-8} \cdot Q^2 + 1,496 \cdot 10^{-3} \cdot Q + 72,853$$

- El Dorado ( $r^2 = 0,988$ ):

$$h(Q) = 3,923 \cdot 10^{-13} \cdot Q^3 - 3,735 \cdot 10^{-8} \cdot Q^2 + 1,674 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 72,617$$

- Libertad ( $r^2 = 0,979$ ):

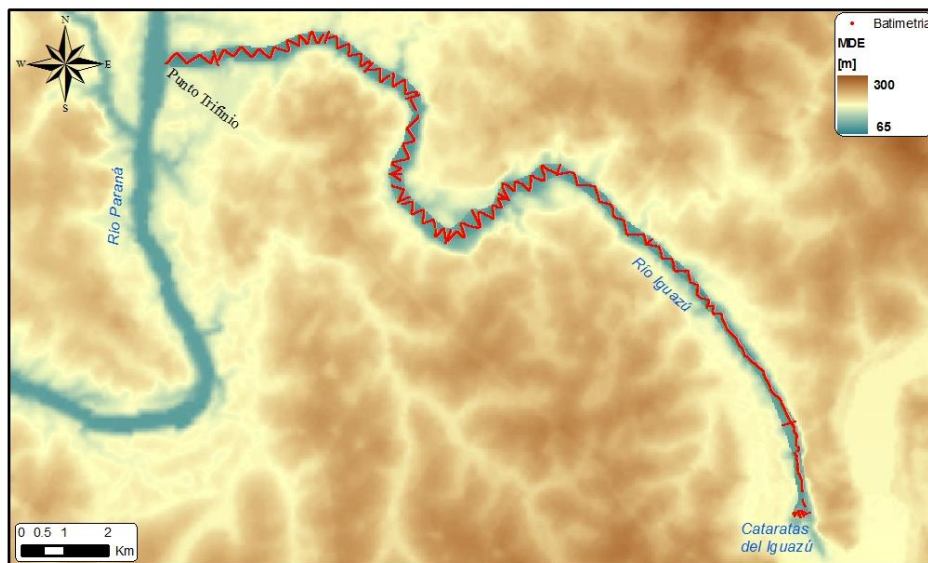
$$h(Q) = 21,637 \cdot Q^{0,1575}$$



**Figura 2.4.** Curvas altura-caudal sintéticas.

## 2.2 Datos batimétricos del río Iguazú

Los datos batimétricos disponibles del río Iguazú surgieron de un relevamiento efectuado en el año 2011 por Itaipú Binacional (2011), extendiéndose desde su desembocadura en el río Paraná hasta el ingreso a la zona de Cataratas del Iguazú, tal como se muestra en la Figura 2.5. En base a estos datos se construyó el MDE del lecho del río Iguazú, a partir del cual se obtuvieron las secciones transversales utilizadas en el modelo MOAGAR-3, de acuerdo a lo descrito en el Primer Informe Parcial.

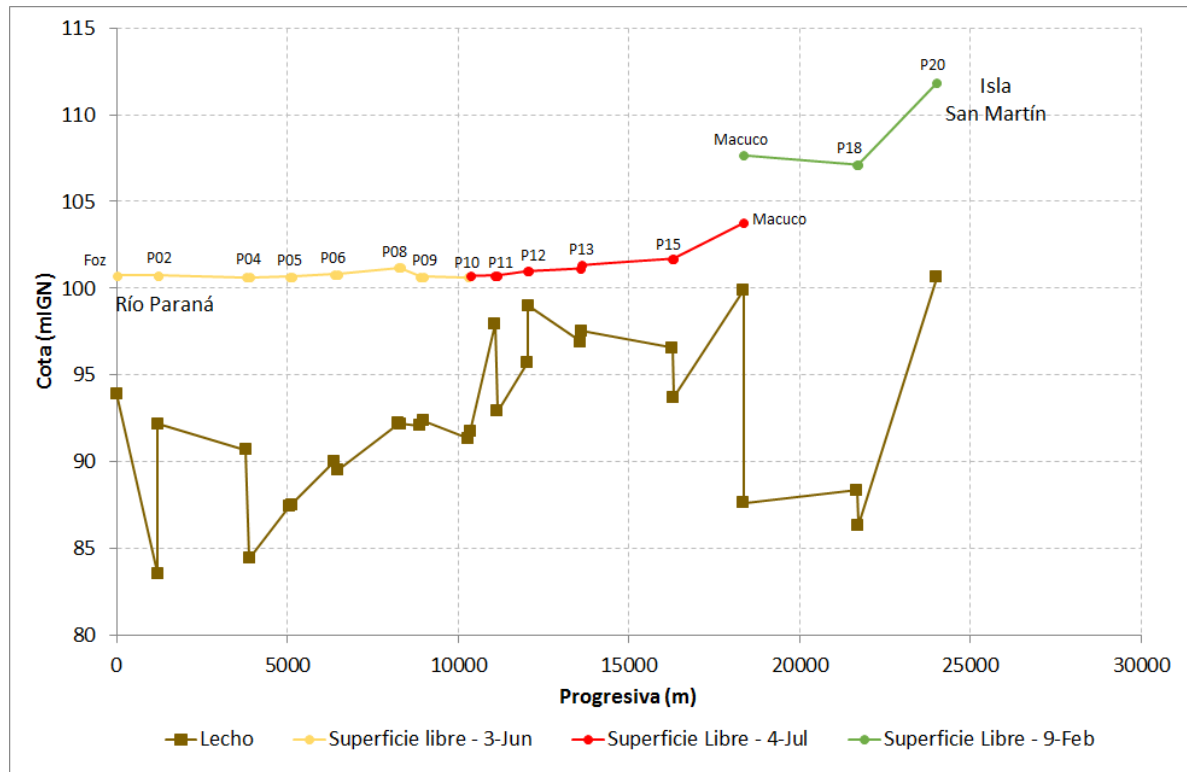


**Figura 2.5.** Relevamiento batimétrico del río Iguazú.

A continuación se describe parte de esa información, a partir de la cual además se rescataron datos de niveles hidrométricos instantáneos (presentados en la sección 2.1) que se utilizarán durante la calibración definitiva del modelo.

Las cotas para referir las alturas registradas fueron trasladadas de sección en sección de acuerdo al sistema POSGAR 94 proyección Gauss-Kruger. Se relevaron 13 secciones transversales. Además se efectuaron 14 relevamientos longitudinales zigzagueantes: 7 el día 3 de junio, 5 el día 4 de julio y 3 el 9 de febrero de 2011. Estos se representan en la Figura 2.6, donde los puntos han sido proyectados a lo largo de la progresiva longitudinal.

En la Figura 2.6 también se muestran los niveles del pelo de agua medidos al inicio y final de cada muestreo, los cuales además se presentan en la Tabla 2.2, junto con los registrados en la estación Puerto Iguazú para esas fechas. Se observa que los niveles medidos durante el relevamiento son consistentemente mayores a los de Puerto Iguazú, de acuerdo a lo esperado, mostrando la diferencia un fuerte incremento para la situación de aguas más altas (9 de febrero).



**Figura 2.6.** Relevamiento batimétrico longitudinal del río Iguazú y nivel de la superficie libre durante el relevamiento.

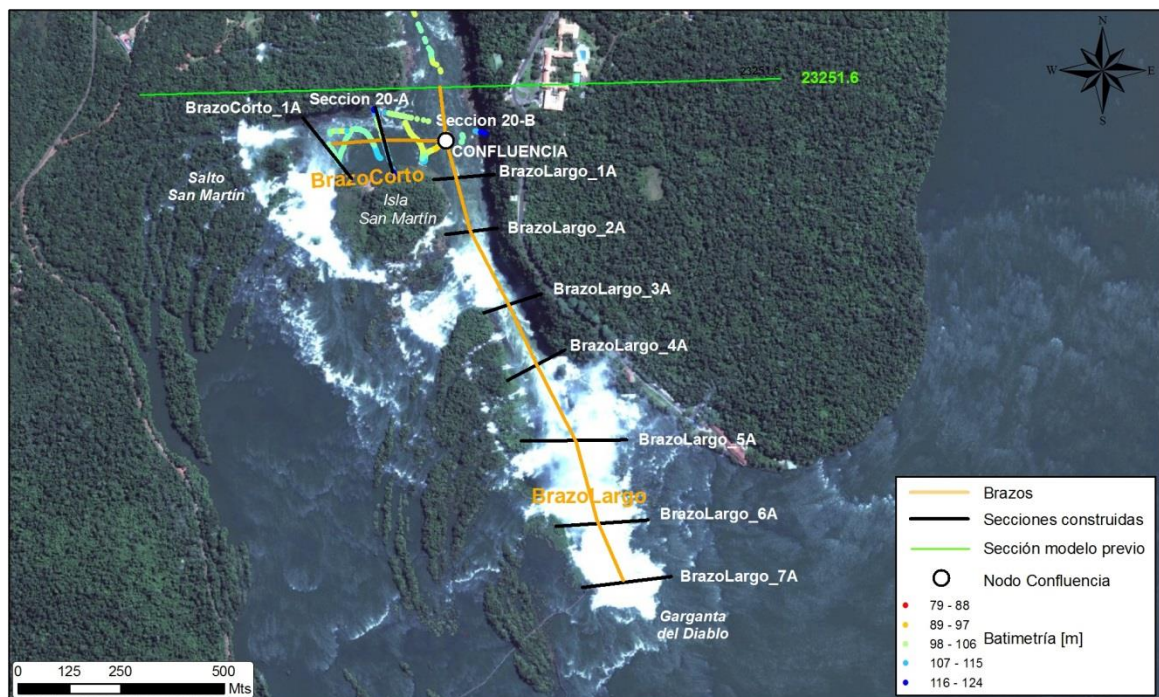
**Tabla 2.3.** Niveles del pelo de agua registrados en Puerto Iguazú y medidos durante los relevamientos (mIGN).

Fecha	Pto. Iguazú	Inicio	Final
3 de junio	100,58	100,73	100,65
4 de julio	100,68	100,72	103,77
9 de febrero	105,48	107,66	111,82

### 2.3 Extensión del dominio

En la versión del modelo MOAGAR-3 presentado en el Segundo Informe Parcial, el río Iguazú se representó hasta unos kilómetros aguas abajo de la Isla San Martín (progresiva 23251,6), dejando de lado entonces la problemática del flujo más cercano a las Cataratas.

En esta fase del estudio se procedió a incorporar el tramo faltante hasta el pie de las Cataratas. Específicamente, se representó un 'brazo corto' hasta el salto San Martín, con 2 secciones transversales, y un 'brazo largo' hasta la Garganta del Diablo, con 7 secciones. El nodo de la confluencia entre ambos brazos se enlazó directamente con la última sección del modelo presentado anteriormente (Figura 2.7).



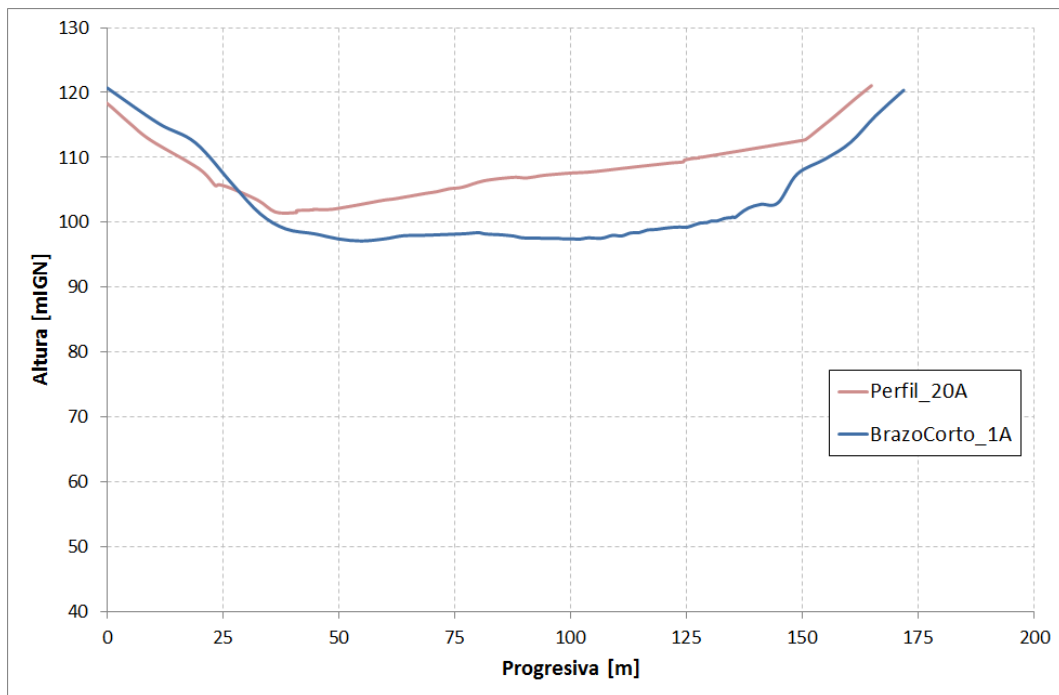
**Figura 2.7.** Extensión del modelo del río Iguazú hasta el pie de las Cataratas. En negro las secciones transversales del modelo; en verde la última sección transversal del modelo anterior; en gama rojo a azul los datos batimétricos.

En la Tabla 2.4 se indican las secciones transversales construidas, las distancias entre ellas y las progresivas a lo largo de cada brazo. Las secciones se representan en la Figura 2.8.

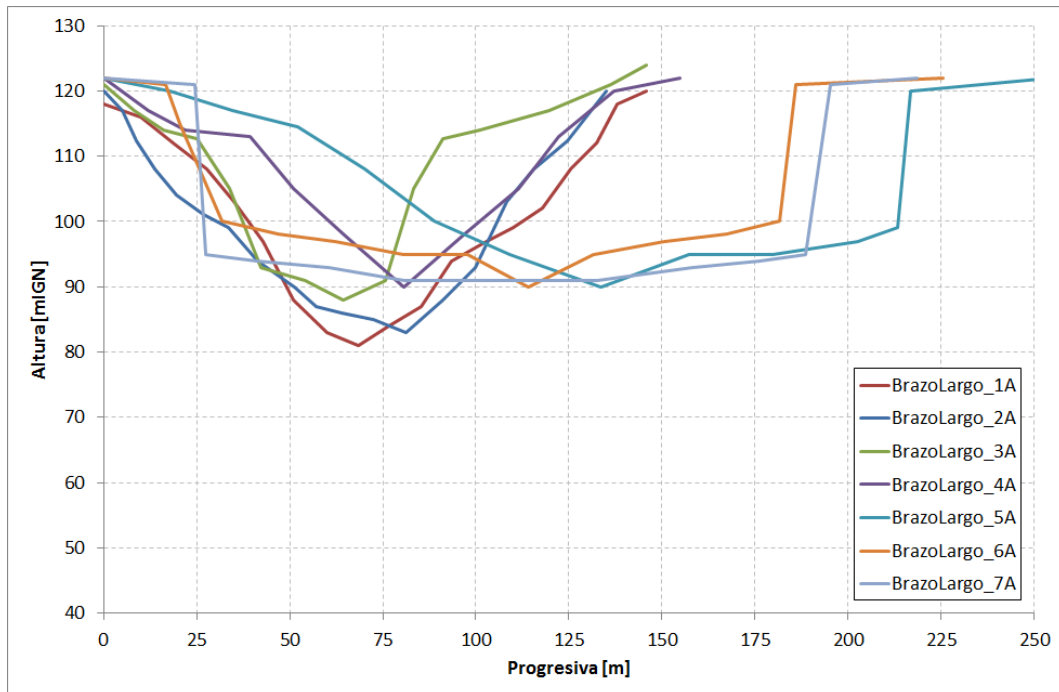
Para el brazo corto, la sección 20\_A surge del relevamiento realizado, mientras que la sección BrazoCorto\_1A fue construida parcialmente con datos del relevamiento, pero completada en forma estimativa.

**Tabla 2.4.** Ubicación de secciones transversales.

Brazo	Sección	Distancia (km)	Progresiva (km)
Brazo Corto	Confluencia	0	0
	Seccion_20A	150	150
	SeccionBrazoCorto_1A	130	280
Brazo Largo	Confluencia	0	0
	SeccionBrazoLargo_1A	90	90
	SeccionBrazoLargo_2A	135	225
	SeccionBrazoLargo_3A	200	425
	SeccionBrazoLargo_4A	160	585
	SeccionBrazoLargo_5A	200	785
	SeccionBrazoLargo_6A	210	995
	SeccionBrazoLargo_7A	150	1145
Río Iguazú	23251.6	0	0
	Confluencia	130	130



**a) Brazo Corto**



b) Brazo Largo

Figura 2.8. Secciones transversales.

Para el brazo largo, teniendo en cuenta que no existe ningún tipo de información sobre la geometría del fondo, se construyeron secciones respetando el ancho y la tipología de las formas (existencia de saltos) a partir de imágenes y videos de la zona. La cota de fondo se mantuvo inicialmente sin cambio desde Confluencia hacia aguas arriba. Pero en uno de los videos<sup>1</sup> se observó que, para una situación de aguas bajas, se produce un salto hidráulico a la altura del Salto Tres Mosqueteros (Figura 2.9), lo cual es una indicación de la presencia de un escalón de fondo; este salto desaparece para niveles de agua mayores, de acuerdo a imágenes, indicando que el escalón no es de gran envergadura; se lo representó, entonces, entre las secciones BrazoLargo\_3A y BrazoLargo\_4A, con una magnitud del orden de 2 m.

<sup>1</sup> <https://www.facebook.com/rene.venturabaila/videos/569582883082472/>



**Figura 2.9.** Captura de pantalla de video del río Iguazú mostrando un salto hidráulico a la altura del salto Tres Mosqueteros de las Cataratas.

Además de estimar la geometría de las secciones de ambas ramas fue necesario establecer que proporción del caudal total del río Iguazú asignar a cada rama. Se optó por dividir el caudal total del río Iguazú en tres aportes, distribuyendo el caudal de manera proporcional al ancho de los saltos medido sobre una imagen satelital (Figura 2.10), a saber:

- *Aporte San Martín (en amarillo):* asignado al inicio del brazo corto. Conformado por la descarga de la Catarata San Martín, Mbiguá, Bernabé Menéndez, Adán y Eva y Bosseti, así como algunos otros saltos menores. Se estimó su caudal en 25% del total, a partir de una longitud de cresta medida de 440 m.
- *Aporte Garganta del Diablo (en rojo):* asignado al inicio del brazo largo. Conformado por Garganta del Diablo y los saltos Unión, Mitre y Belgrano. Se estimó su caudal en un 64% del total, a partir de una longitud de cresta medida de 1140 m.
- *Aporte Escondido (en verde):* asignado como descarga lateral entre las progresivas 200 y 400m del brazo largo. Conformado por el salto Escondido, Rivadavia y otros menores. Se estimó su caudal en un 11% del total, a partir de una longitud de cresta medida de 200 m.

Los aportes de los saltos Lanusse, Alvar Nuñez y otros menores no fueron representados.



**Figura 2.10.** Identificación de saltos de las Cataratas del Iguazú.

## 2.4 Calibración definitiva

Con el modelo extendido y la incorporación de nuevos datos, se procedió a la calibración definitiva del modelo *MOAGAB-3*.

La calibración del modelo para el escenario actual, a cota definitiva de Yacyretá, presentada en el informe anterior se revisó a fin de incorporar los nuevos datos disponibles en el río Iguazú. Para mantener una buena consistencia entre los modelos calibrados, el modelo para el escenario previo al llenado de Yacyretá también se recalibró.

### 2.4.1 Datos utilizados

Se emplearon básicamente los mismos datos utilizados en la calibración previa (Segundo Informe Parcial), pero con dos diferencias principales:

- Se tomó la estación Puerto Iguazú, en lugar de R11, para calibrar el tramo del río Paraná entre El Dorado y el Punto Trifinio.
- Se utilizaron los datos puntuales de nivel de agua registrados en Puerto Macuco para calibrar el río Iguazú.

Las estaciones Puerto Iguazú y R11 se encuentran muy cercanas entre sí. Si bien la primera se localiza sobre el río Iguazú y la segunda sobre el río Paraná, ambas están controladas por el régimen del río Paraná. A priori, entonces, podrían ser usadas indistintamente para calibrar la rugosidad del tramo del río Paraná entre El Dorado y el Punto Trifinio. Sin embargo, entre ambas estaciones existe una diferencia de nivel medio del orden de los 15 cm (para el escenario actual, es decir, con el embalse de Yacyretá a cota definitiva). Esto significa que al calibrar en base a una de ellas se obtienen errores de ese orden en la otra.

Para la estación Puerto Iguazú se cuenta con registros continuos ininterrumpidos para los dos escenarios de calibración, el de la etapa previa a Yacyretá (1983 a 1994) y el de Yacyretá a cota definitiva (desde 2011). Estos registros están disponibles cada 4 horas, por lo que reflejan la modulación horaria de las descargas de Itaipú. Por contraste, las series de datos de la estación R11 presentan baches para el período actual. Además, sólo se cuenta con valores registrados a las 0:00 y 7:00 horas de cada día. En consecuencia, se optó por privilegiar los datos de Puerto Iguazú para la calibración.

Tal como se indicó en la sección 2.1, como parte del estudio batimétrico analizado en la sección 2.1 se midió el nivel de la superficie libre en distintos momentos y progresivas, a fin de poder calcular a partir de ella la elevación del fondo. En particular, se midió el nivel de la superficie libre para la progresiva 18.400m, correspondiente a Puerto Macuco, en dos momentos distintos. Estos datos fueron utilizados para calibrar la rugosidad de todo el tramo modelado del río Iguazú, comprendido entre el Punto Trifinio y las Cataratas del Iguazú.

#### 2.4.2 Rugosidad calibrada

En la Tabla 2.5 se reitera la estructura de tramos del modelo, presentada en el Segundo Informe Parcial, con la adición de las estaciones que se utilizan para calibrar cada escenario.

**Tabla 2.5.** Tramos y estaciones de calibración para las etapas previa al llenado y actual.

Tramo	Progresiva inicial (m)	Progresiva final (m)	Longitud (m)	Estación de calibración	
				Esc. Pre Yacyretá	Escenario Actual
Tramo 1, Posadas - Ita Cuá	1.583.000	1.597.500	14.500	Ita Cuá	-
Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana	1.597.500	1.621.000	23.500	Santa Ana	Santa Ana
Tramo 3, Santa Ana – San Martín	1.621.000	1.740.500	119.500	San Martín	San Martín
Tramo 4, San Martín – El Dorado	1.740.500	1.804.790	64.290	El Dorado	El Dorado
Tramo 5, El Dorado – Punto Trifinio	1.804.790	1.924.500	119.710	Pto. Iguazú	Pto. Iguazú
Tramo 6, Punto Trifinio - Itaipú	1.924.500	1.948.000	23.500	Pte. Amistad	-
Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas	0	23.250	23.250	-	Pto. Macuco

La Tabla 2.6 presenta los valores de rugosidad de cauce y de planicie calibrados para cada tramo, tanto para el escenario previo al llenado de Yacyretá como para el actual.

**Tabla 2.6.** Coeficientes de Manning para las etapas previa al llenado y actual.

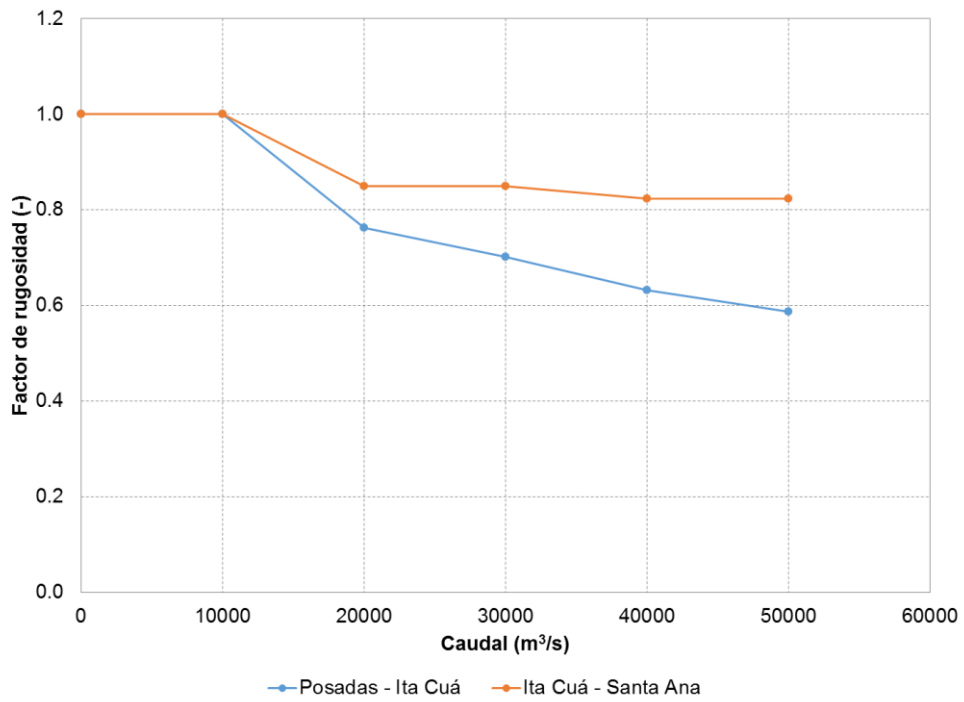
Tramo	Esc. Pre Yacyretá		Escenario Actual	
	Manning de cauce	Manning de planicie	Manning de cauce	Manning de planicie
Tramo 1, Posadas - Ita Cuá	0,0421	0,10	0,0255	0,10
Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana	0,0495	0,10	0,0300	0,10
Tramo 3, Santa Ana – San Martín	0,0400	0,10	0,0379	0,13
Tramo 4, San Martín – El Dorado	0,0457	0,10	0,0466	0,10
Tramo 5, El Dorado – Punto Trifinio	0,0474	0,17	0,0453	0,17
Tramo 6, Punto Trifinio - Itaipú	0,0536	0,10	0,0503	0,10
Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas	0,0750	0,10	0,0750	0,10

Tal como se indicó en el Segundo Informe Parcial, no se contó con datos en la estación Ita Cuá para el escenario actual, por lo que la rugosidad en el Tramo 1 se mantuvo proporcional a la del Tramo 2, y ambas se calibraron juntas usando la estación Santa Ana.

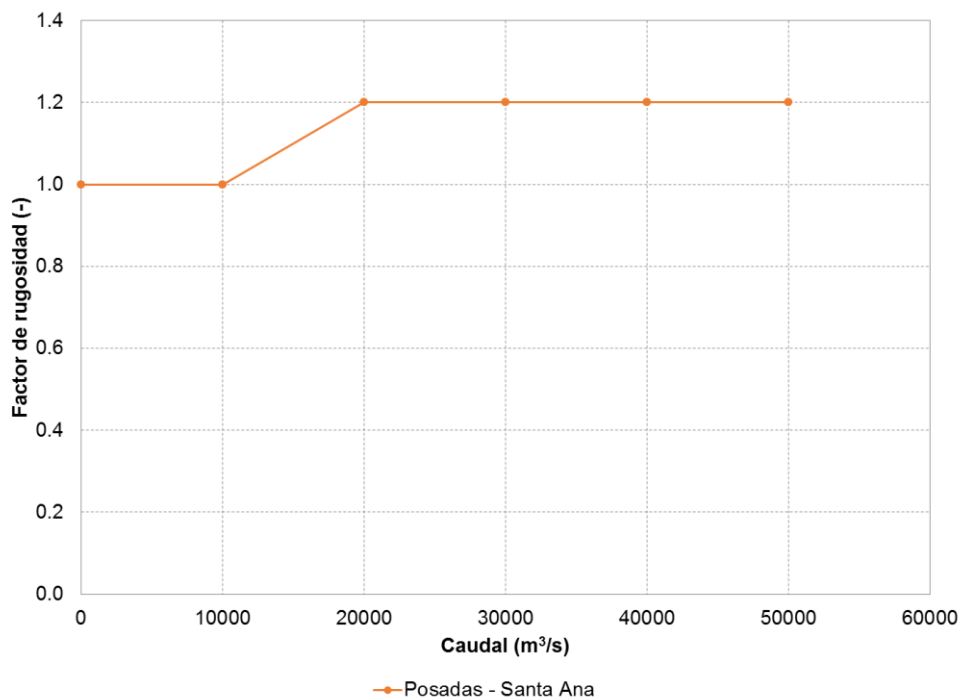
Para el escenario actual se observa una reducción significativa de la rugosidad de cauce en los tramos 1 y 2 (calibrados juntos), y una disminución menos marcada en los tramos 3, 5 y 6, respecto del escenario previo al llenado. En rigor, esta disminución no pudo comprobarse en el Tramo 6, dado que no hay registros en la estación Puente de la Amistad para el período actual; esa disminución fue entonces impuesta como proporcional a la del Tramo 5. En el caso del Tramo 4 la rugosidad se mantiene prácticamente inalterada. En el próximo capítulo se efectúa un primer análisis de las posibles causas de esta disminución, que indica una suavización efectiva del cauce.

En cuanto al Tramo 7 (río Iguazú), no existen datos disponibles para calibrar la rugosidad en el período previo al llenado de Yacyretá. Se adoptó entonces para este escenario el mismo valor de rugosidad que surge de la calibración para el escenario actual. Este valor, de 0,075, es relativamente alto para ríos de llanura; se especula que se debe a afloramientos de roca. Es importante recordar que la calibración del río Iguazú se efectuó sólo en base a dos datos instantáneos de elevación en Puerto Macuco, por lo cual resulta claro que cualquier registro futuro adicional contribuiría significativamente a mejorar su precisión.

Para los tramos 1 y 2 se aplicaron las curvas de factor de rugosidad presentadas en las figuras 2.11 y 2.12 para los escenarios previo y posterior al llenado de Yacyretá, respectivamente.



**Figura 2.11.** Curvas del factor de rugosidad para la etapa previa al llenado.



**Figura 2.12.** Curvas del factor de rugosidad para la etapa a cota definitiva.

### 2.4.3 Ajuste del brazo corto del río Iguazú

Durante la calibración del modelo se detectaron resultados considerados físicamente incorrectos en el brazo corto del río Iguazú. El modelo indica niveles de la superficie libre fluctuando entre 100 y 105 mIGN en la confluencia entre los brazos largo y corto el 50% del tiempo. Debido a que la cota de fondo de la sección 20\_A es relativamente muy elevada, de 101,5 mIGN, el modelo predecía la formación de un tirante crítico en dicha sección para aquellas condiciones, con la consiguiente aparición de un salto hidráulico de alrededor de 5 m durante un gran porcentaje del tiempo. Este salto no se considera correcto, ya que no se condice con la experiencia que se tiene del lugar (este tramo es habitualmente navegado por las embarcaciones turísticas) y no aparece registrado en ninguno de los registros fotográficos (la Figura 2.13 presenta una fotografía de la zona en condiciones normales) o satelitales consultados. Se realizaron análisis de sensibilidad del modelo a la distancia entre secciones en dicho tramo, hallándose que aunque la magnitud simulada del resalto resulta sensible a la discretización, éste aparecía en todos los casos estudiados. Se realizaron también análisis de sensibilidad al caudal vertido por la catarata San Martín, a fin de determinar si dicho salto podía ser producto de una sobreestimación del caudal asignado a esa rama del modelo, pero se observó que el desnivel continuaba formándose incluso reduciendo los caudales en la rama en un 90%. Como conclusión de estos ensayos se determinó que no parecía posible evitar en el modelo la formación del mencionado salto conservando la sección 20\_A con la cota informada, por lo que se optó por eliminarla del modelo hasta tanto sus elevaciones puedan ser confirmadas.

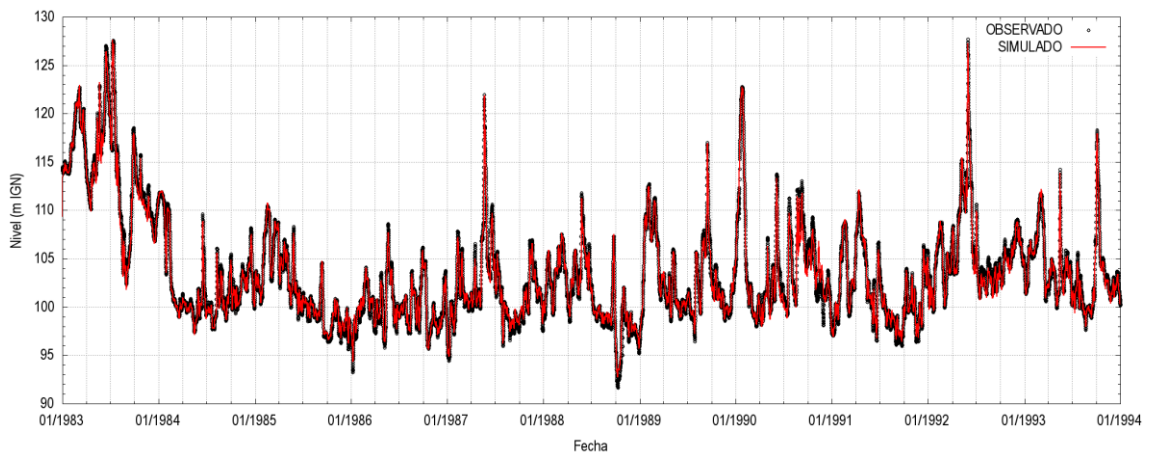


**Figura 2.13.** Fotografía del brazo corto y la Isla San Martín, indicando la posición aproximada de la sección 20\_A

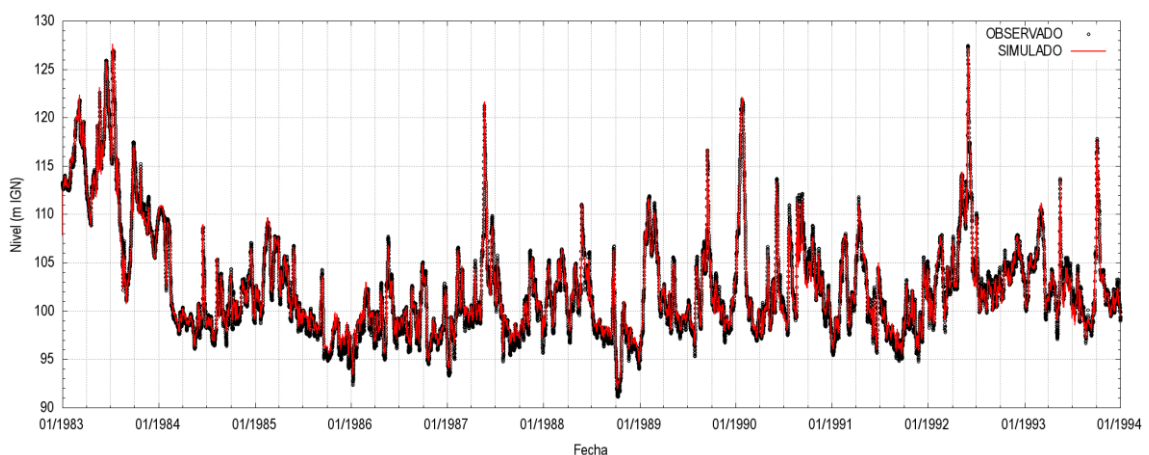
#### 2.4.4 Resultados

En la Figura 2.14 se presenta la comparación de series de nivel simuladas y observadas en las estaciones de calibración para el escenario previo al llenado de Yacyretá. Por su parte, la Figura 2.15 muestra la comparación para el escenario a cota definitiva. Se observa que los grados de acuerdo alcanzados son muy satisfactorios. Esto se corrobora con los indicadores de bondad de ajuste, presentados en las tablas 2.7 y 2.8. En particular, hay una reducción significativa de los errores en la estación Puerto Iguazú respecto de lo obtenido en la calibración anterior (presentada en el Segundo Informe Parcial).

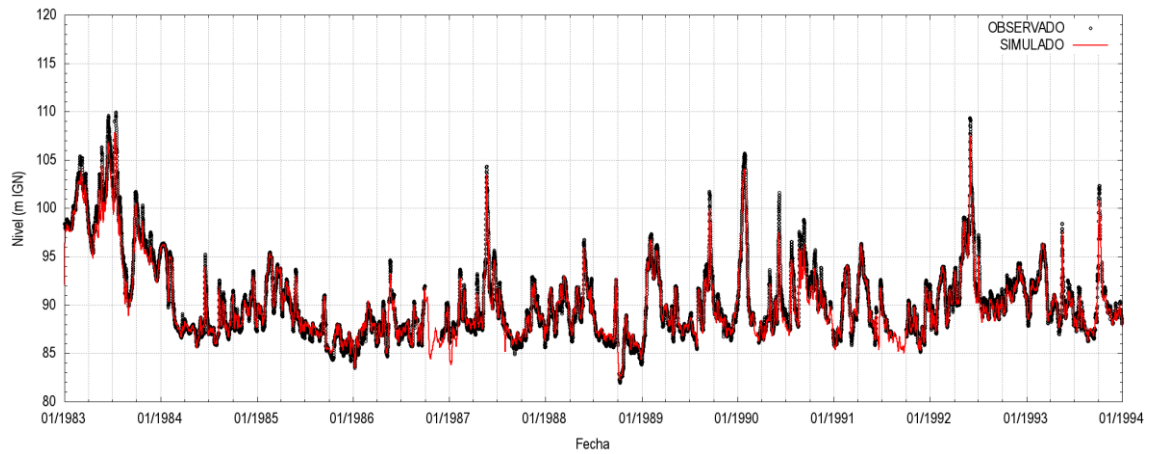
La Figura 2.16 presenta en una escala temporal ampliada la comparación en la estación Puerto Macuco para el escenario a cota definitiva, de modo de apreciar mejor el grado de acuerdo con las dos observaciones disponibles. También se incluyen los resultados del modelo para la estación Puerto Iguazú. Se observa que el desnivel entre ambas estaciones oscila entre unos pocos centímetros y más de 5 metros; los menores desniveles se dan para relativamente altos caudales del río Paraná, tal como surge de comparar con la Figura 2.17.



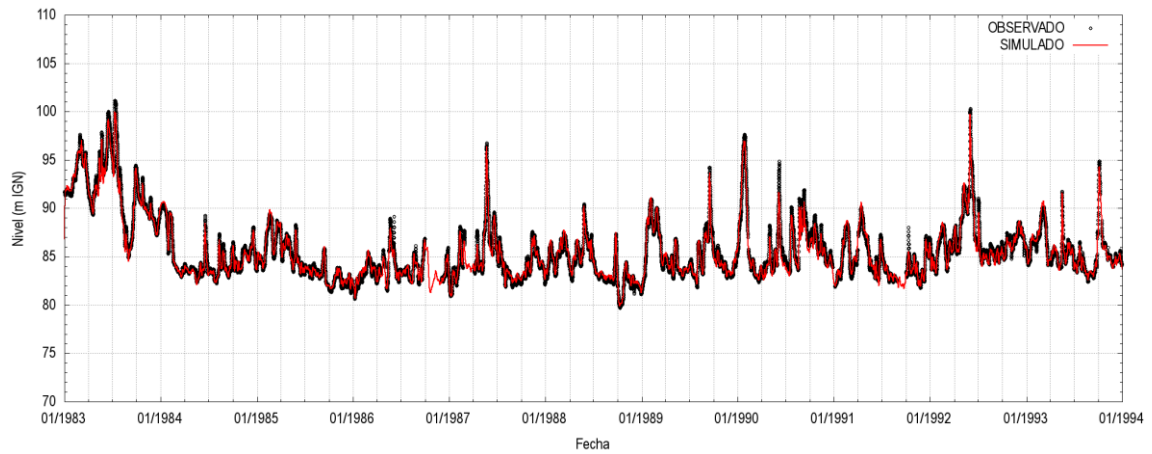
a) Puente de la Amistad



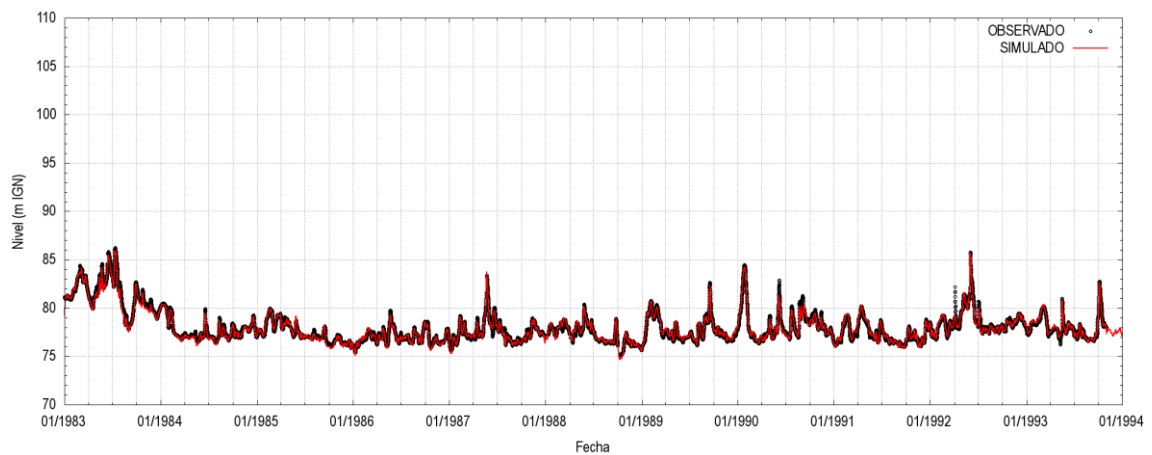
b) Puerto Iguazú



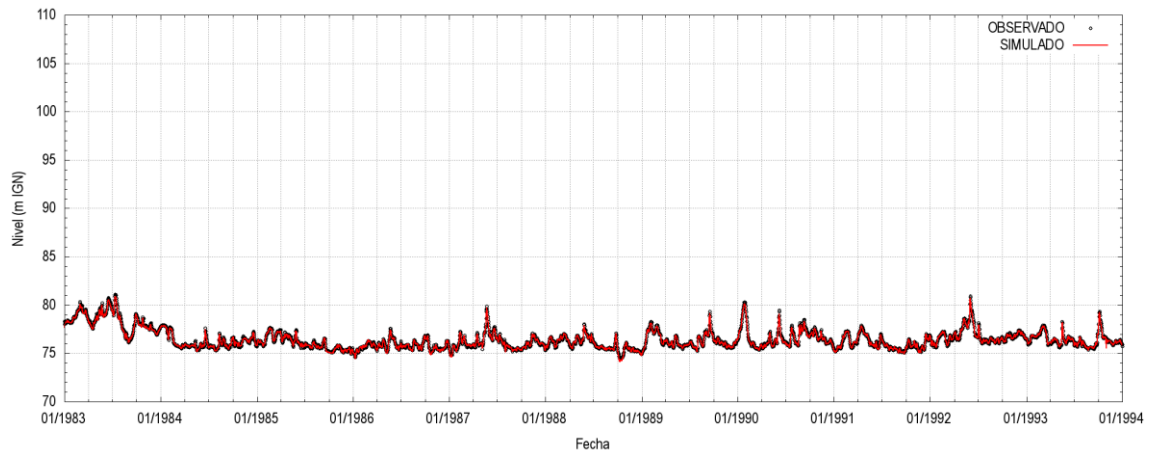
**c) El Dorado**



**d) Libertador Gral. San Martín**

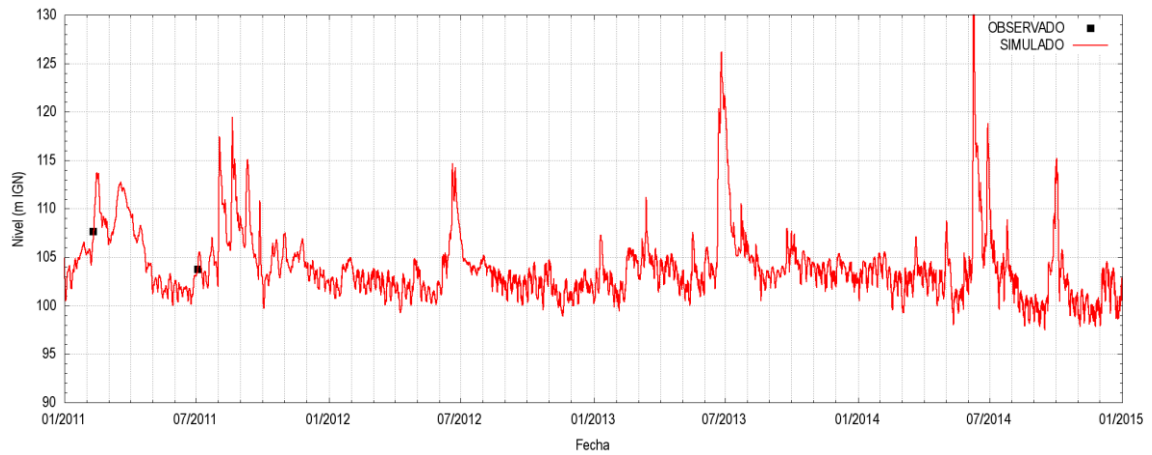


**e) Santa Ana**

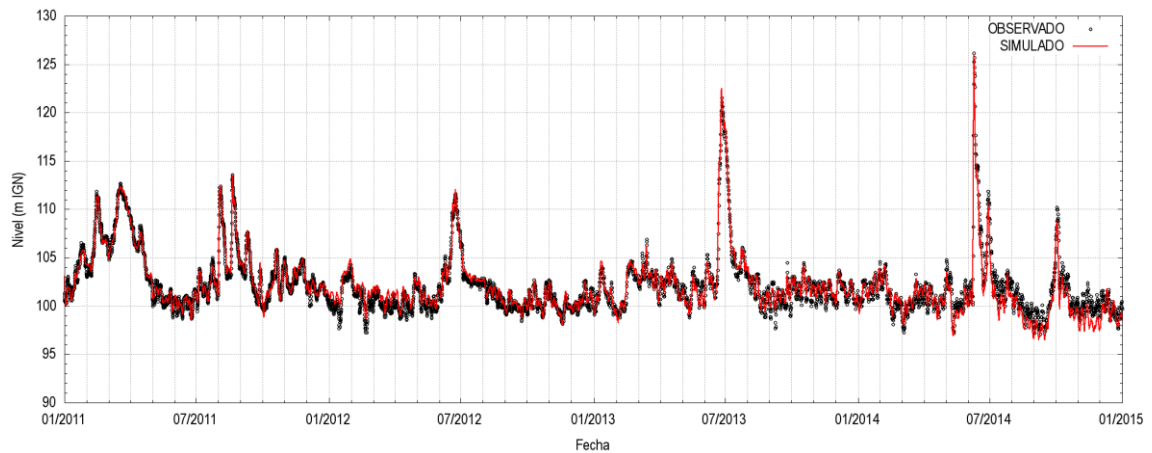


**f) Posadas Ita Cuá**

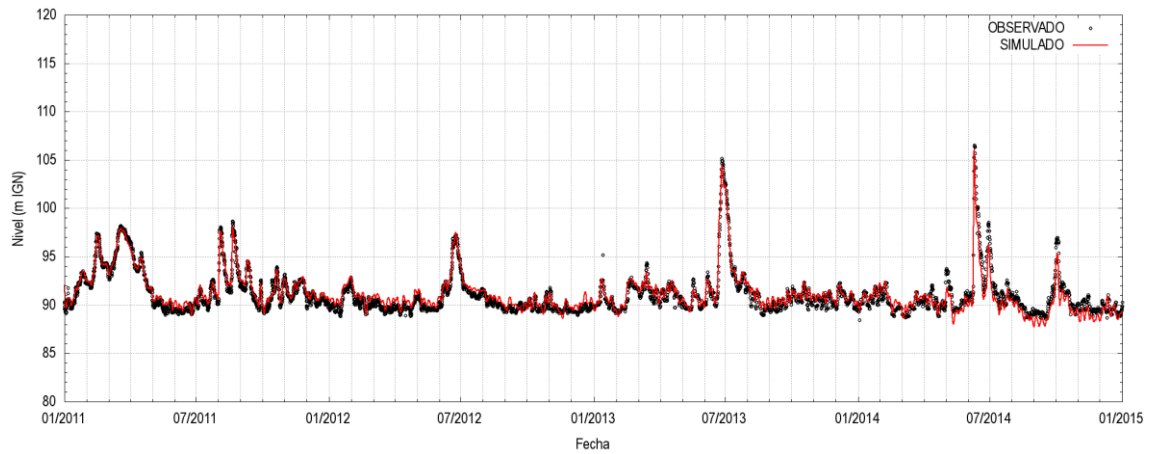
**Figura 2.14.** Comparación entre niveles observados y simulados para la etapa previa al llenado.



**a) Puerto Macuco**



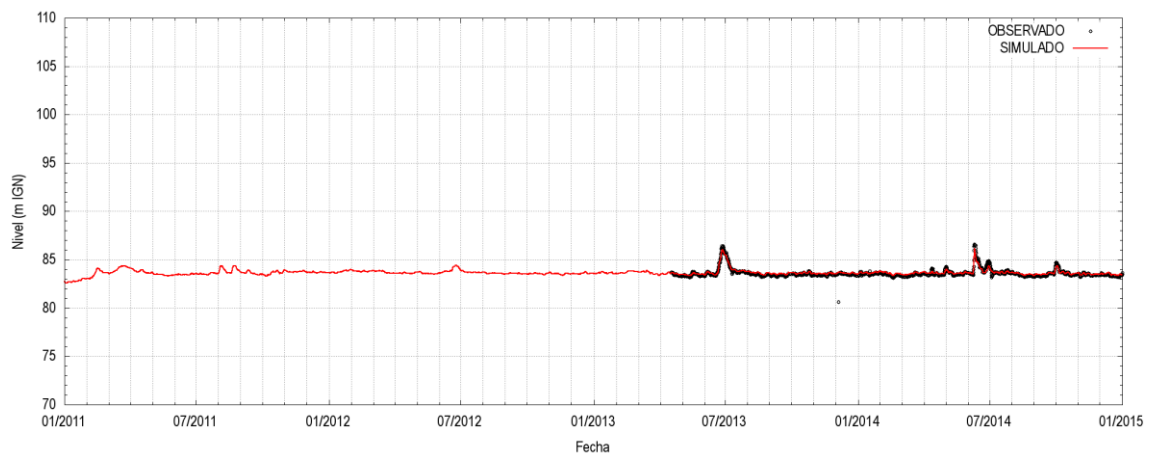
**b) Puerto Iguazú**



**c) El Dorado**



**d) Libertador Gral. San Martín**



**e) Santa Ana**

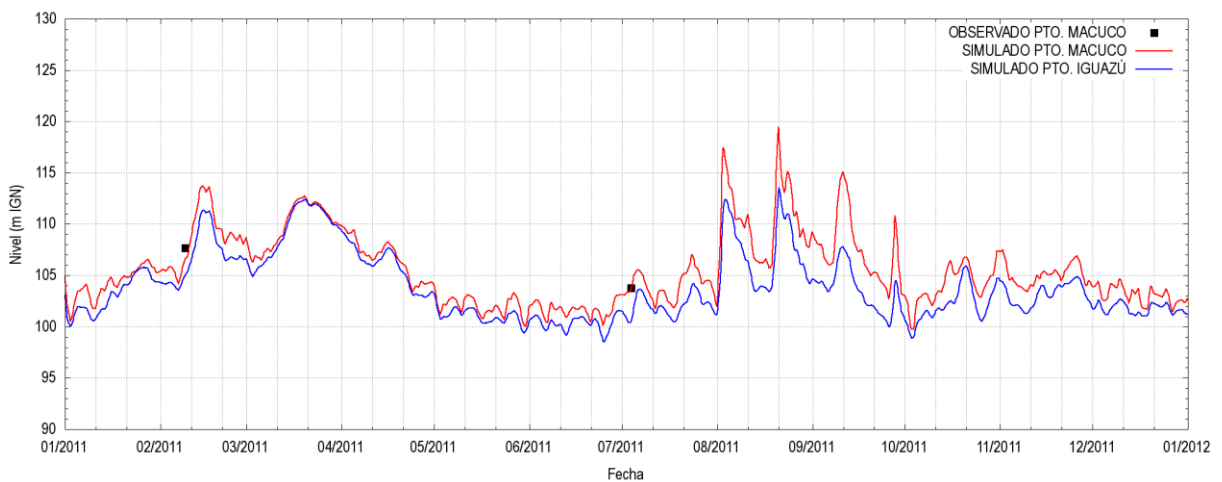
**Figura 2.15.** Comparación entre niveles simulados y observados para etapa posterior al llenado.

**Tabla 2.7.** Indicadores de bondad de ajuste para la etapa previa al llenado en las estaciones de calibración.

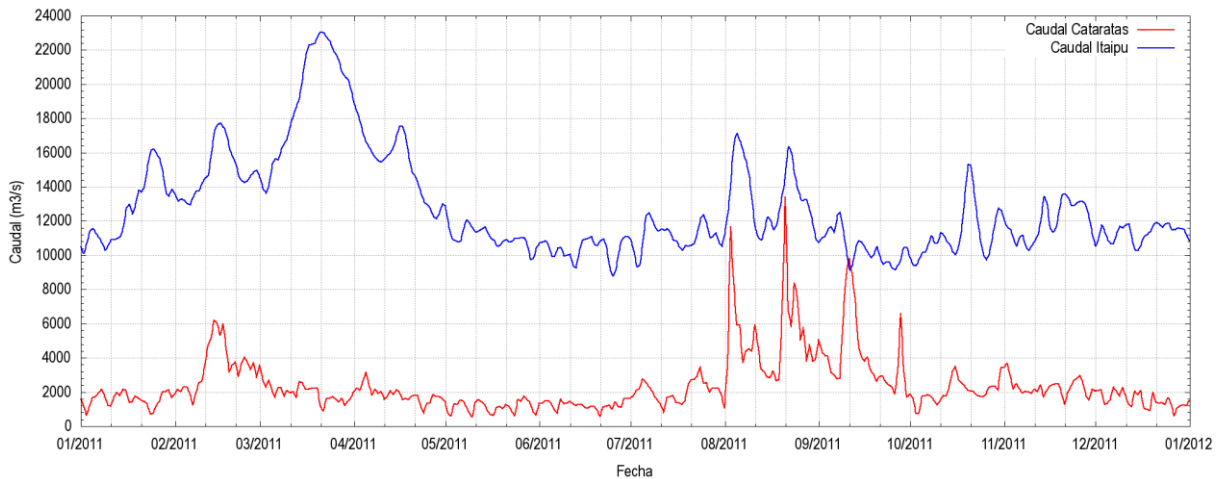
Estación	MED (m)	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	NSE
Puerto Iguazú	-0,10	0,62	0,99	0,99
Puente de la Amistad	0,07	0,50	0,99	0,99
El Dorado	0,20	0,68	0,98	0,98
Libertador Gral. San Martín	0,05	0,42	0,98	0,98
Santa Ana	0,04	0,24	0,98	0,98
Posadas Ita Cuá	0,04	0,09	0,99	0,99

**Tabla 2.8.** Indicadores de bondad de ajuste para etapa posterior al llenado en estaciones de calibración

Estación	MED (m)	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	NSE
Puerto Macuco (puntuales)	0,17	0,78	1,00	0,84
Puerto Iguazú	-0,02	0,75	0,95	0,94
El Dorado	-0,13	0,63	0,92	0,92
Libertador Gral. San Martín	0,00	0,42	0,92	0,92
Santa Ana	-0,06	0,16	0,92	0,87



**Figura 2.16.** Comparación ampliada entre niveles simulados y observaciones puntuales en Puerto Macuco para la etapa posterior al llenado.



**Figura 2.17.** Caudales en Cataratas e Itaipú para el año 2011.

## 2.5 Verificación

Para verificar el modelo se utilizó la siguiente información:

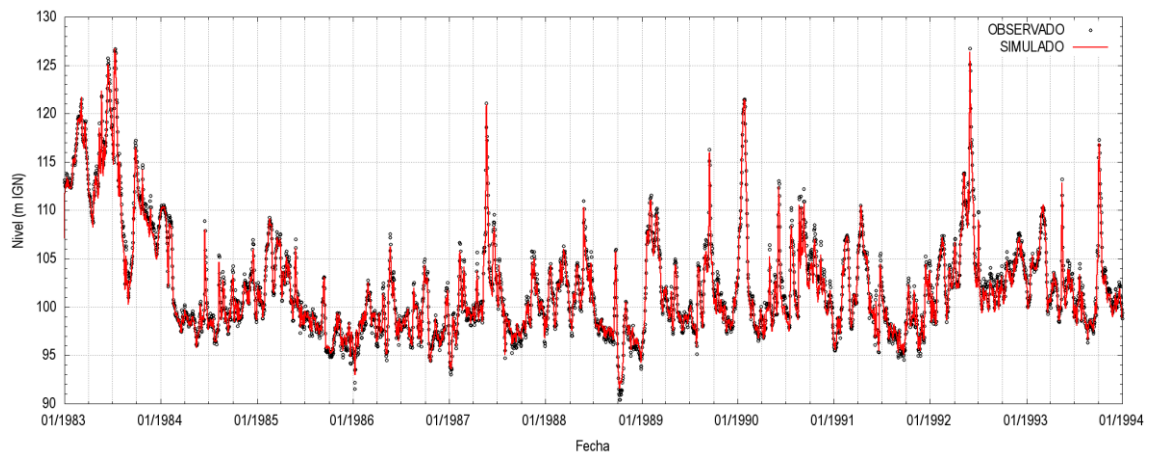
- Niveles registrados en la estación R11 para el escenario previo al llenado de Yacyretá.
- Registros de niveles de la estación automática de Puerto Macuco para el escenario a cota definitiva.
- Curva altura-caudal en la estación Libertador General San Martín.

### 2.5.1 Niveles en estación R11

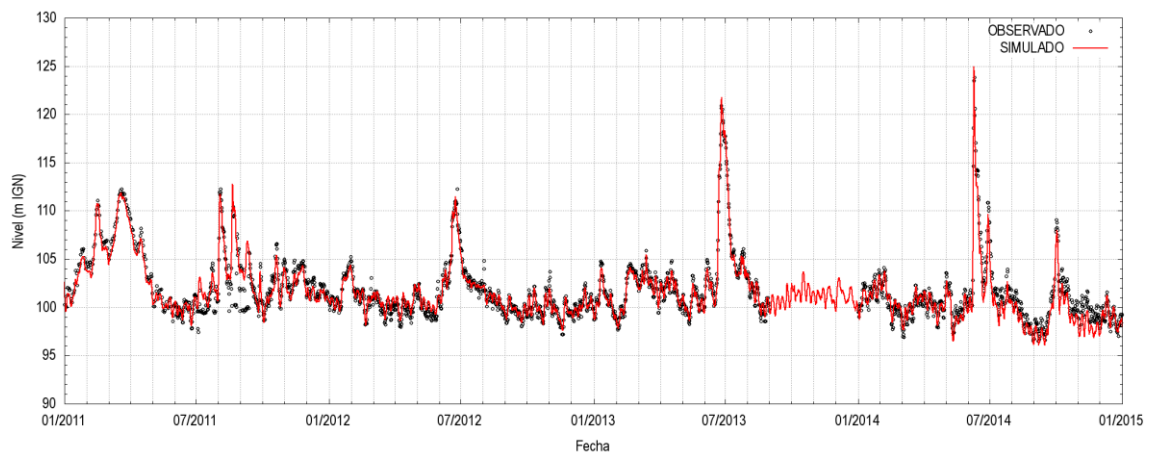
En la Figura 2.18 se muestra la comparación entre observaciones y modelo en la estación R11, tanto para el escenario previo como el posterior al llenado. Se observa que el nivel de acuerdo es excelente en ambos casos, aunque aparecen algunas discrepancias durante el año 2011, que parecen deberse a deficiencias en los valores observados. Los indicadores de bondad de ajuste para esta estación se presentan en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9.** Indicadores de bondad de ajuste en la estación R11.

Estación	MED (m)	RMSE (m)	R <sup>2</sup>	NSE
R11 previo al llenado	0,22	0,56	0,99	0,99
R11 posterior al llenado	0,15	1,00	0,91	0,91



a) Escenario previo al llenado de Yacyretá

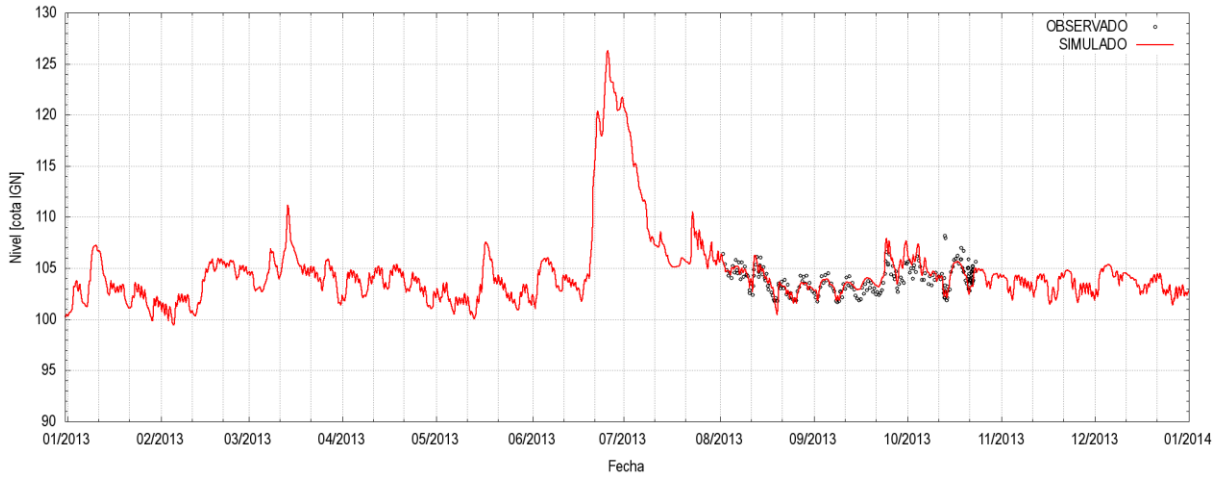


b) Escenario posterior al llenado de Yacyretá

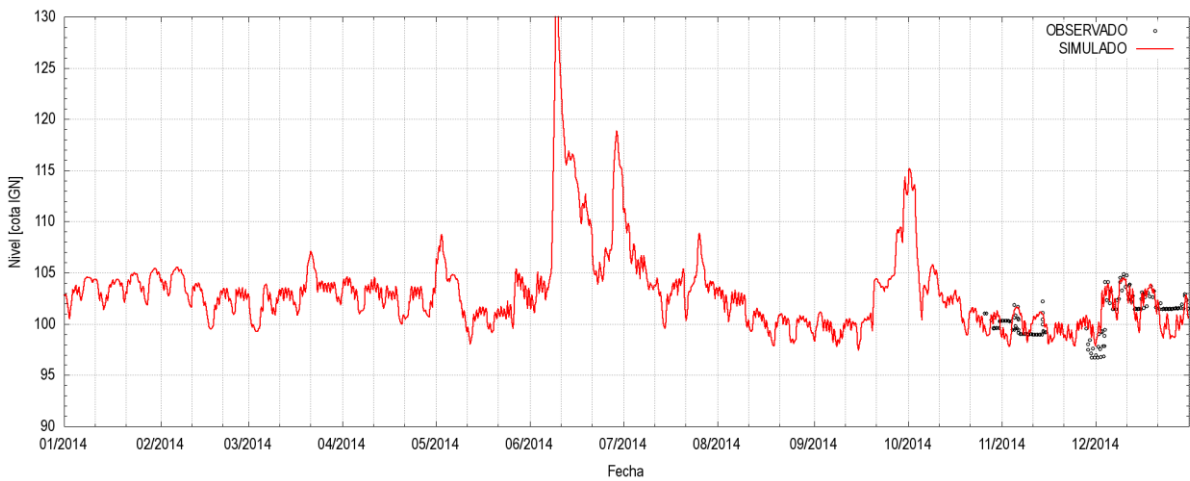
**Figura 2.18.** Comparación entre niveles observados y simulados para la etapa previa al llenado de Yacyretá en la estación R11.

### 2.5.2 Niveles en estación Puerto Macuco

Tal como se explicó en la sección 2.1, a priori se rescataron dos ventanas de tiempo para las cuales el instrumento proveyó datos razonables. Cabe aclarar que el cero provisto es erróneo, lo cual explica la imposibilidad de utilizarlos para calibrar el modelo. De hecho, el cero se ajustó durante la verificación de modo de reproducir correctamente el valor medio, resultando de +96,84 mIGN. La Figura 2.19 presenta la comparación entre registros y modelo. Se observa que el acuerdo durante la primera ventana de tiempo es muy bueno. Durante la segunda ventana de tiempo la comparación es buena en términos generales, aunque se observan varios períodos durante los cuales los datos registrados permanecen constantes, lo que se asocia a los problemas de malfuncionamiento del aparato.



**a) 8 de Agosto de 2013 a 23 de Octubre de 2013**

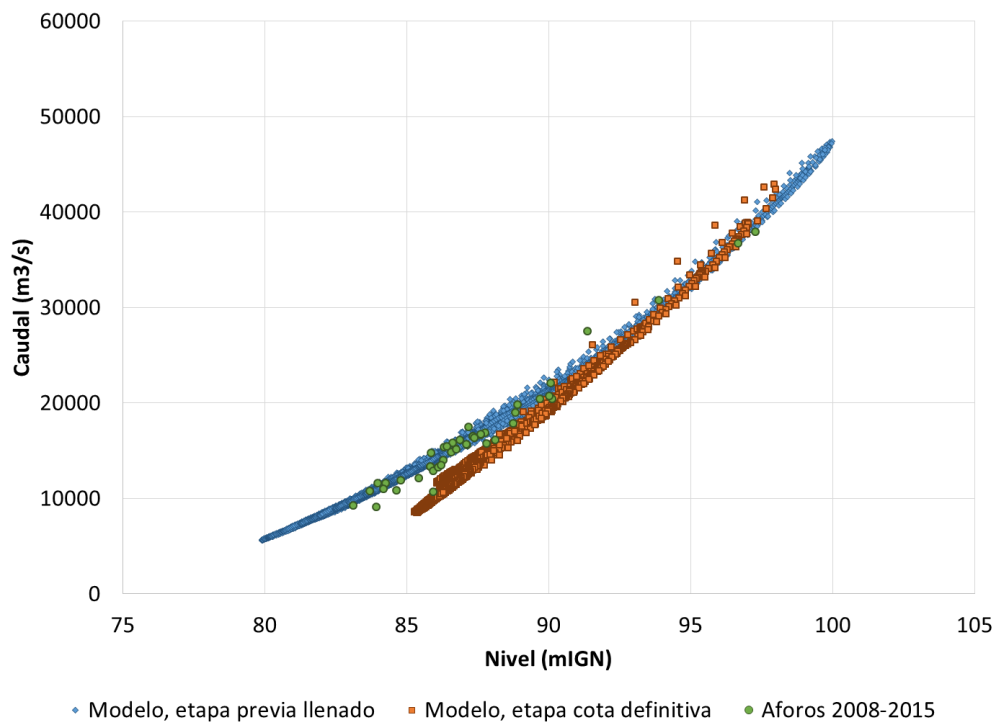


**b) 26 de Octubre de 2014 a 31 de Diciembre de 2014**

**Figura 2.19.** Comparación entre niveles observados y simulados para la etapa posterior al llenado de Yacyretá en la estación Puerto Macuco.

### 2.5.3 Relaciones altura-caudal

En la Figura 2.20 se presentan los aforos efectuados entre 2008 y 2015 en la estación Libertador San Martín, junto con los pares de puntos altura-caudal que surgen de las simulaciones para las etapas previa y posterior al llenado de Yacyretá. A partir de los resultados del modelo se observa claramente la desviación introducida por el llenado del embalse para bajos caudales por el efecto de remanso.



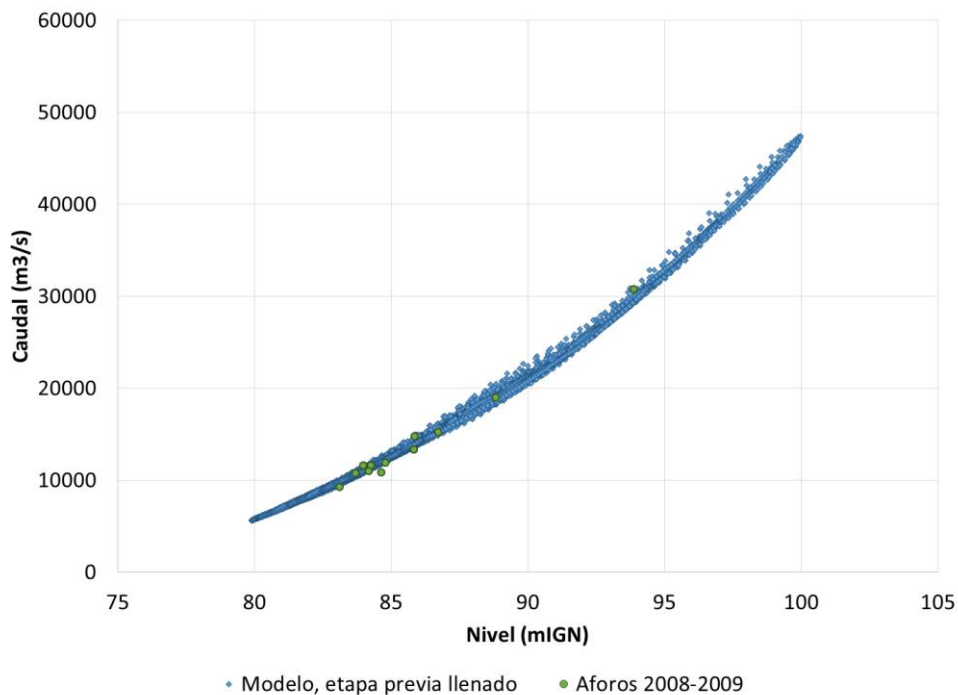
**Figura 2.20.** Comparación entre aforos y resultados del modelo en la estación Libertador San Martín.

A los fines de tener en cuenta este cambio de comportamiento se ha procedido a efectuar una separación en etapas. La Figura 2.21a presenta la comparación entre aforos efectuados en el período 2008-2009 y resultados del modelo para la etapa previa al llenado de Yacyretá. Se observa un acuerdo muy satisfactorio, a pesar de que ya existía el embalse de Yacyretá; pero este aún se encontraba en una cota reducida, con lo cual prácticamente no afectaba la relación altura-caudal en Libertador General San Martín.

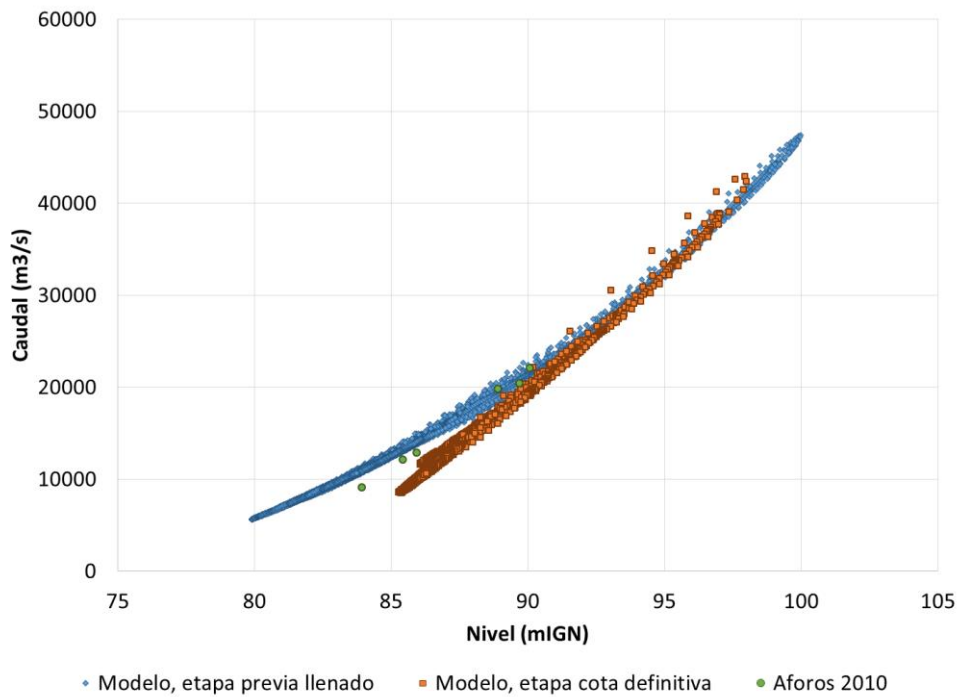
En la Figura 2.21b se comparan los aforos de 2010 con los resultados del modelo para ambas etapas. Se observa que las mediciones caen dentro del rango de transición entre ambos estados, lo cual es muy consistente.

La Figura 2.21c muestra la comparación entre aforos efectuados en el año 2011 y resultados del modelo para la etapa a cota definitiva, observándose un muy buen acuerdo.

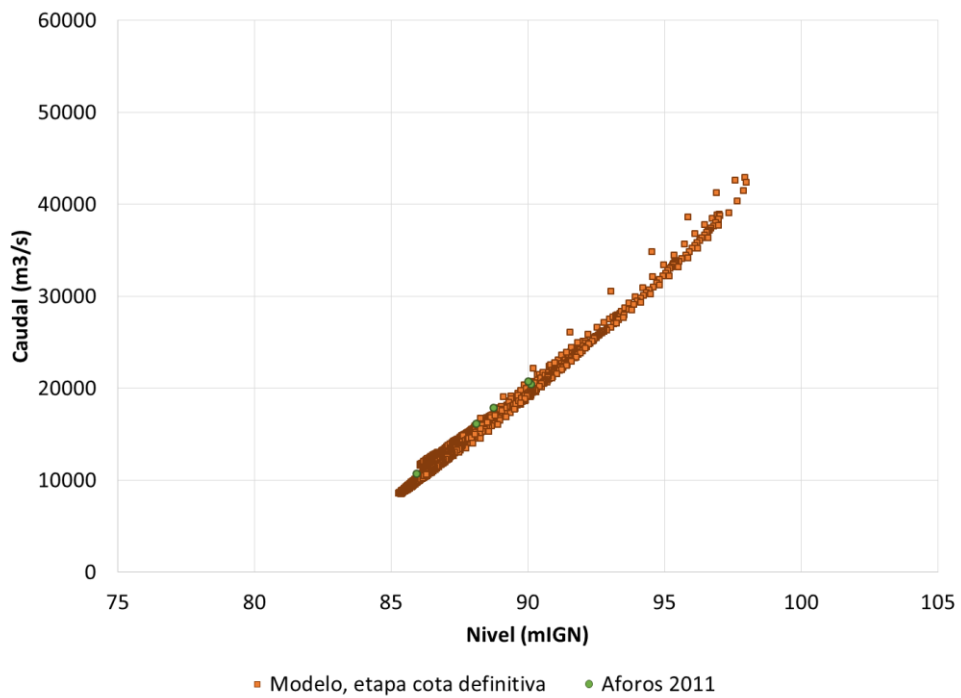
Finalmente, se comparan los aforos llevados a cabo entre 2011 y 2015 con los resultados del modelo para la etapa a cota definitiva en la Figura 2.21d. Se observa que, desde 2012, tienden a aparecer algunos caudales aforados sistemáticamente mayores que los indicados por el modelo, y de hecho más compatibles con los resultados del modelo para la etapa previa al llenado. Se verificó que estos caudales aforados no son compatibles con los caudales informados por Itaipú para esas fechas. En efecto, en la Figura 2.22 se muestra la comparación instantánea de los niveles y caudales aforados con los resultados del modelo. Se observa que los niveles tienen en todos los casos muy buenos grados de acuerdo, con diferencias medias de 0,25 m, mientras que los caudales presentan un buen acuerdo solo en las primeras 4 de las 5 determinaciones del 2011, y en los picos medidos en 2013. En el resto de las mediciones se sobreestima sistemáticamente el caudal respecto de los resultados del modelo (que son muy confiables ya que se trata básicamente de un traslado de los caudales impuestos como condiciones de borde en Itaipú y Cataratas). En consecuencia, se considera que existe alguna anomalía en los aforos.



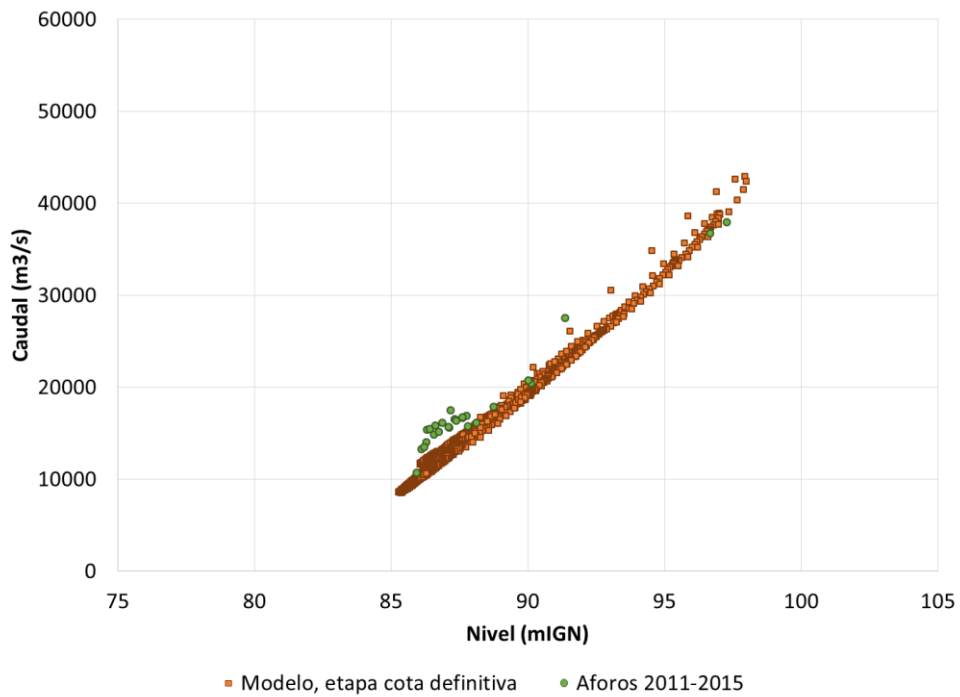
**a) Aforos en 2008-2009**



**b) Aforos en 2010**

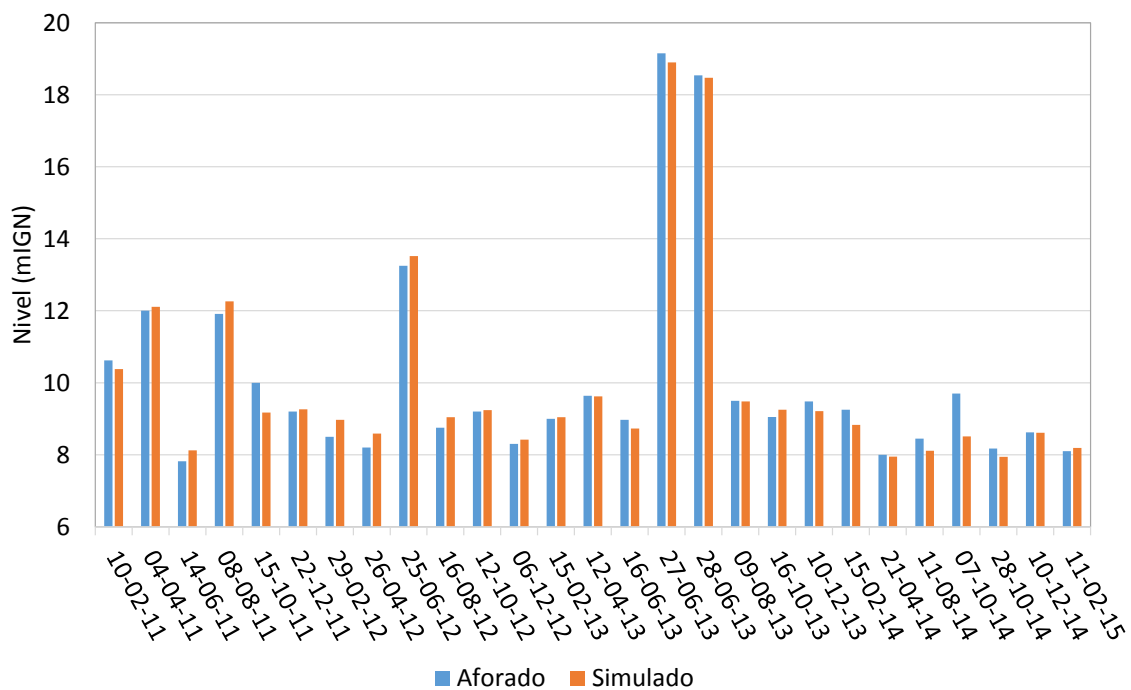


**c) Aforos en 2011**

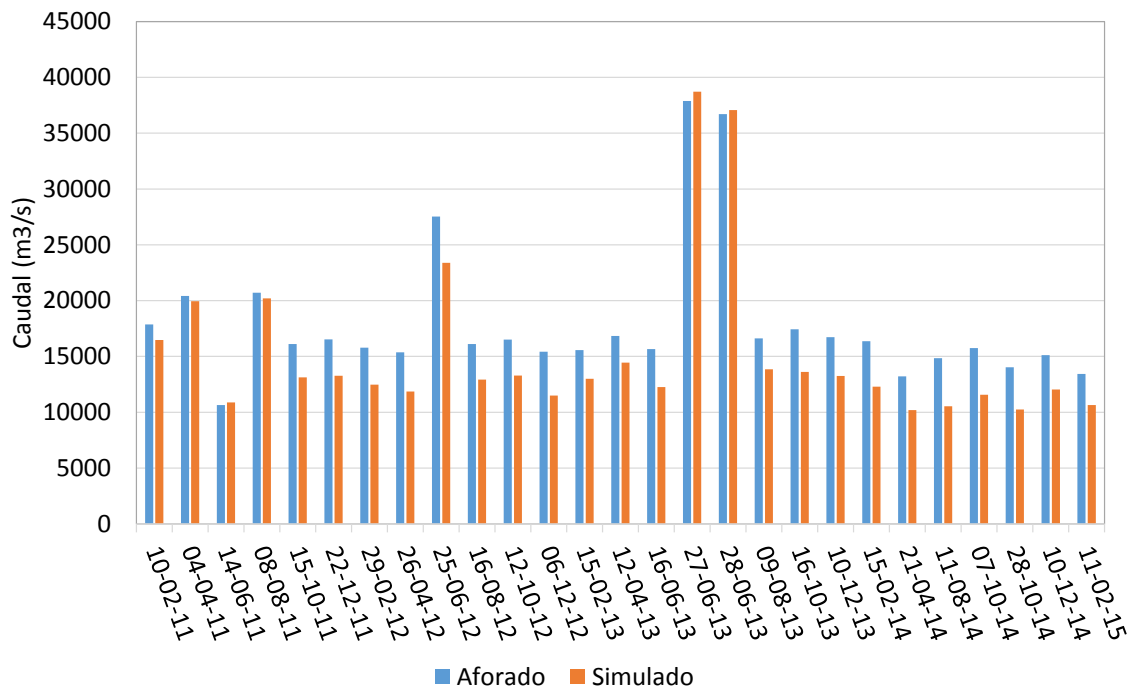


**d) Aforos en 2011-2015**

**Figura 2.21.** Comparación entre aforos y resultados del modelo en la estación Libertador San Martín para distintos períodos.



**a) Niveles aforados y simulados 2011-2015**



**b) Caudales aforados y simulados 2011-2015**

**Figura 2.22.** Comparación instantánea entre aforos y resultados del modelo en la estación Libertador San Martín

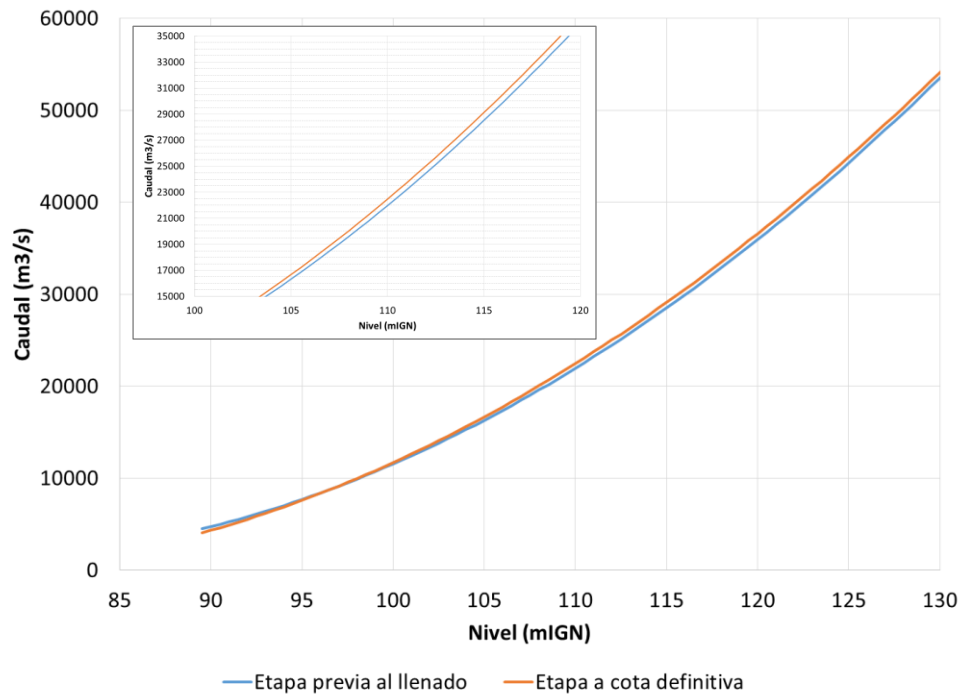
## 2.6 Aplicación a estación R11

La Figura 2.23 presenta las curvas altura-caudal para la estación R11 que surgen de ajustes a los resultados del modelo para las etapas previa y posterior al llenado. Sus ecuaciones son las siguientes:

$$\text{Etapa previa al llenado: } Q = 17.9 H^2 - 2724 H + 104727$$

$$\text{Etapa a cota definitiva: } Q = 16.9 H^2 - 2472 H + 90017$$

Se observa una leve tendencia hacia caudales ligeramente más altos para igual nivel en el período actual respecto del previo al llenado de Yacyretá, producto de la suavización. Esto resulta más claro en la ampliación incluida como inserto para el rango de caudales de 15 a 35 mil m<sup>3</sup>/s. Nótese que las diferencias de caudal son del orden de los 500 m<sup>3</sup>/s.

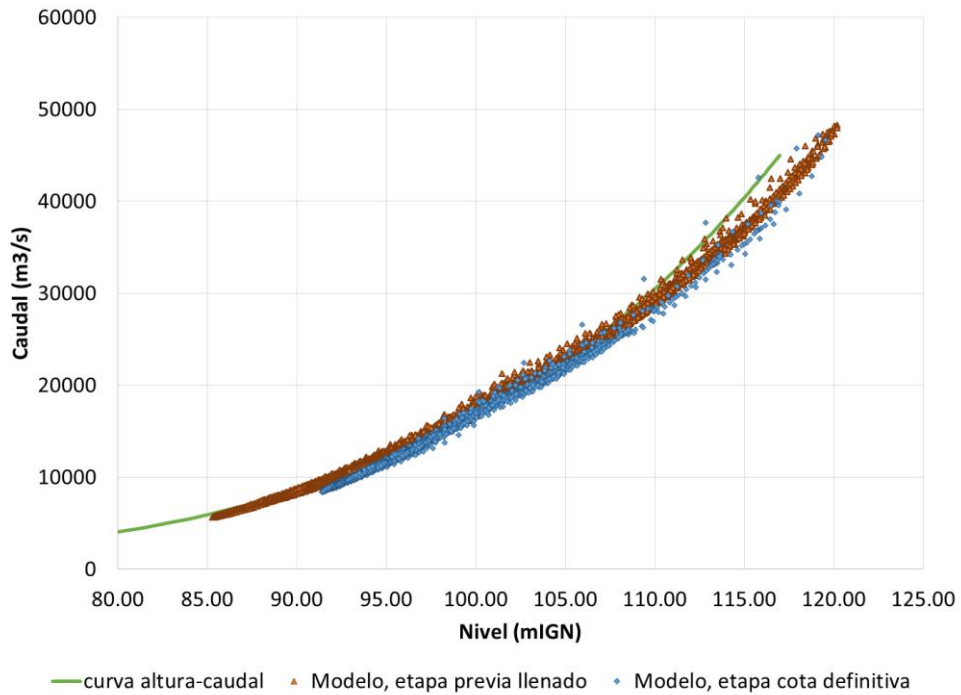


**Figura 2.23.** Curvas altura-caudal en la estación R11 de acuerdo al modelo

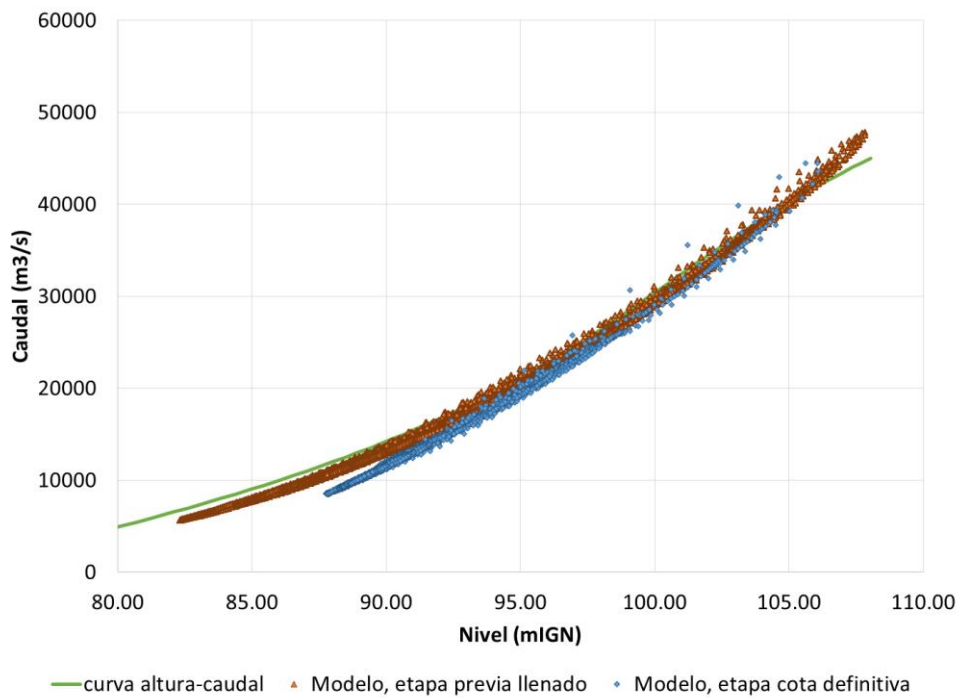
## 2.7 Comparación con curvas sintéticas altura-caudal

Se utilizó el modelo *MOAGAR-3* para efectuar comparaciones con las curvas sintéticas altura-caudal en estaciones hidrométricas del río Paraná construidas por Almirón (2009), que fueron descritas en la sección 2.1.

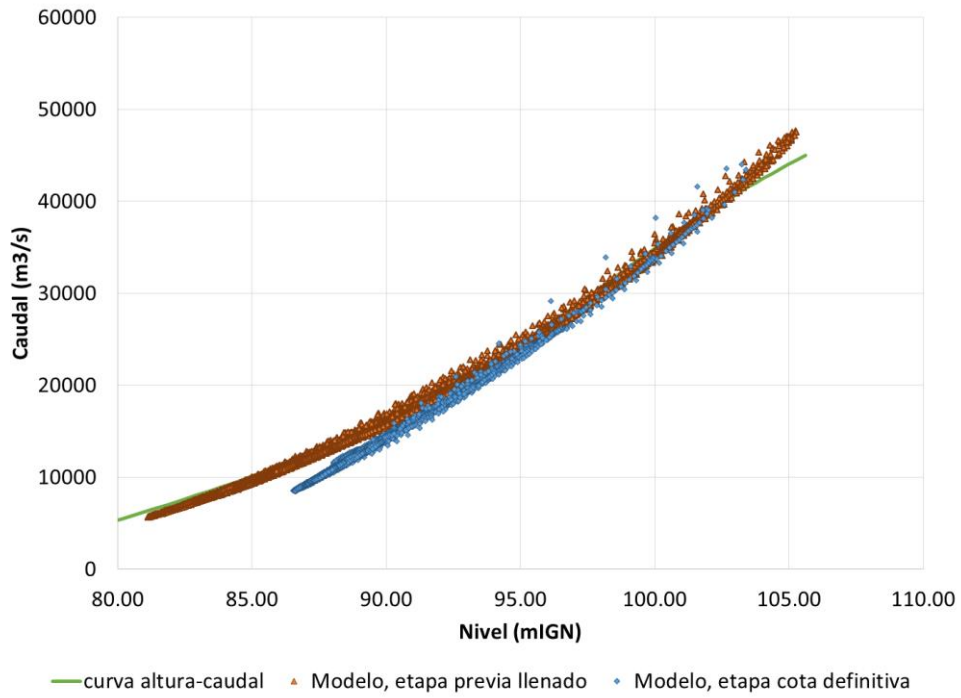
En la Figura 2.24 se presentan estas comparaciones. Salvo para la estación Corpus, se observa un nivel de acuerdo satisfactorio entre las curvas sintéticas (aparentemente construidas utilizando niveles registrados entre los años 1988 y 1992) y los resultados del modelo para la etapa previa al llenado de Yacyretá, que tiende a degradarse para altos y bajos caudales. La fuerte desviación observada en la estación Corpus indicaría algún tipo de anomalía en la determinación de la curva altura-caudal.



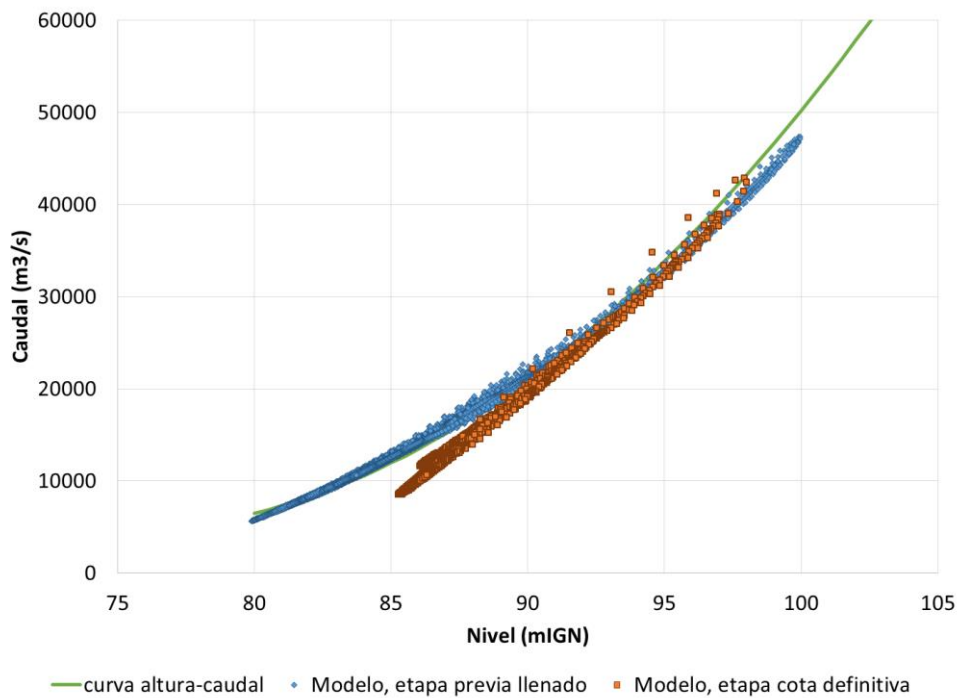
**a) Libertad**



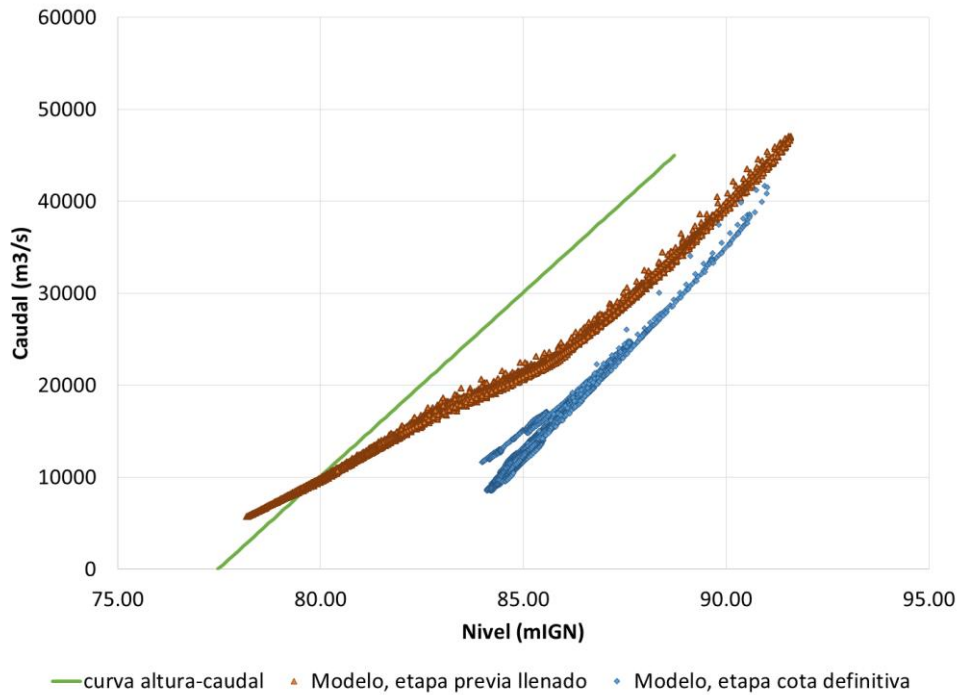
**b) El Dorado**



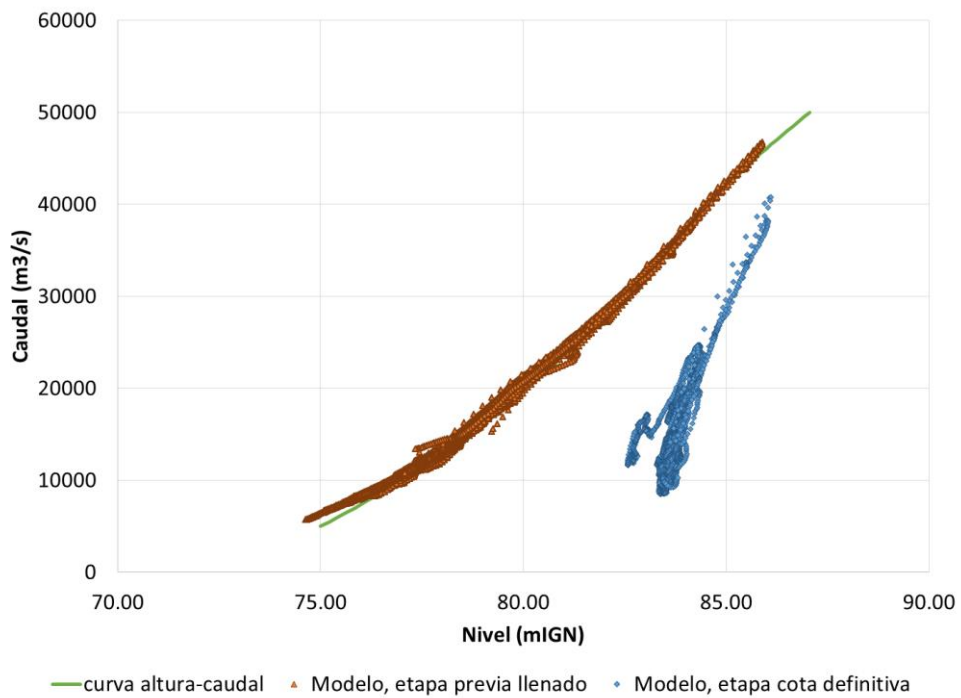
**c) Montecarlo**



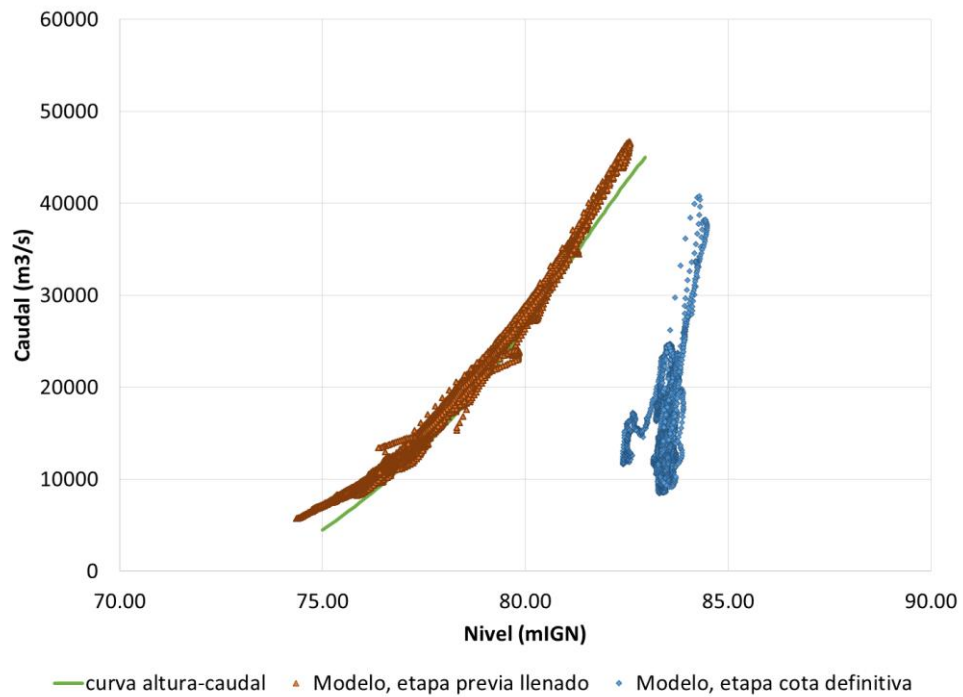
**d) Libertador San Martín**



e) *Corpus*



f) *Santa Ana*



**g) La Mina**

**Figura 2.24.** Comparación entre curvas sintéticas altura-caudal y resultados del modelo.

### 3 ESCENARIO ACTUAL

#### 3.1 Estadísticas de niveles

La construcción de la presa Yacyretá y su llenado a cota definitiva de 83 mIGN en Posadas produjo un cambio significativo en la hidrodinámica de la zona estudiada. A continuación este efecto se estudia de manera estadística utilizando los resultados del modelo matemático.

Para hacer el análisis de impacto más genuino, se realizaron simulaciones con y sin Yacyretá (es decir, con las respectivas rugosidades) para el mismo período de tiempo de 11 años, tomándose como ventana de tiempo de prueba la que se extiende entre enero de 1983 y diciembre de 1993, durante la cual se almacenaron resultados cada 4 horas. Para el caso previo al llenado de Yacyretá se utilizó como condición de borde de nivel en Posadas la serie de niveles registrada en ese período. En cambio, para el caso con Yacyretá a cota definitiva se fijó como condición de borde un nivel constante de 83 mIGN en Posadas, compatible con la política de operación de la represa supuesta cumplida de manera ideal.

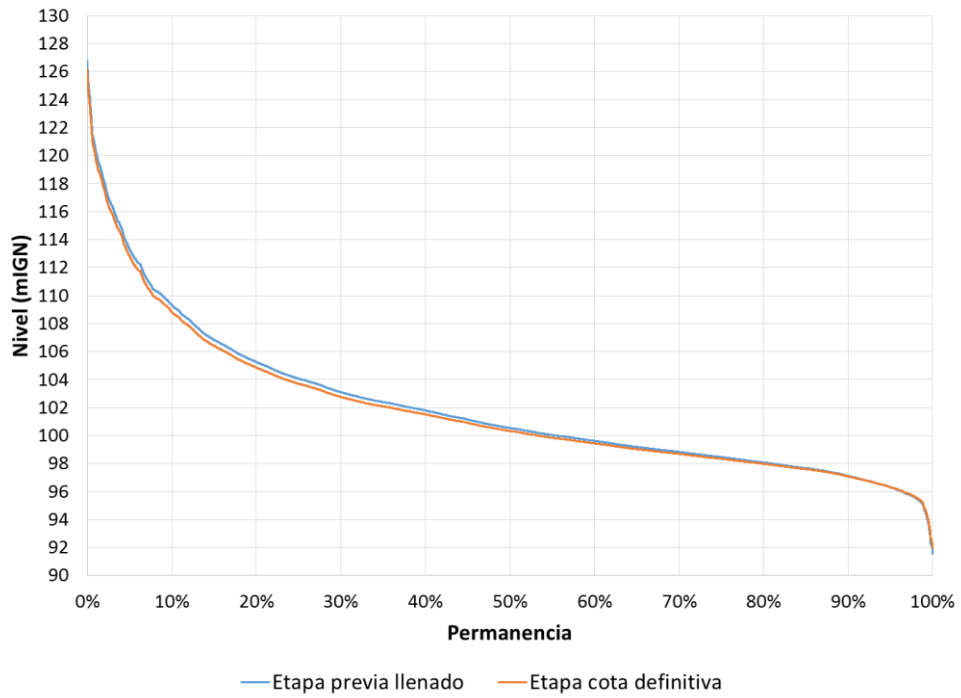
Los resultados de permanencia de niveles para distintas estaciones se presentan en la Figura 3.1 y se resumen en la Tabla 3.1 para las permanencias de 90% y 50% del tiempo. En la Figura 3.2 y la Tabla 3.2 se hace lo propio para la sobre elevación del escenario a cota definitiva respecto del escenario previo al llenado. Se observa que el 90% del tiempo la sobre elevación supera 3,8 m en Santa Ana, 2,0 m en Corpus, 0,6 m en San Martín y 0,4 m en El Dorado. Aguas arriba de ese punto el efecto comienza a neutralizarse, dado que el remanso de Yacyretá deja de tener efecto salvo para caudales muy bajos, y además comienza a pesar el suavizado del tramo alto. De hecho, los niveles simulados en R11 resultan la mayor parte del tiempo menores en el escenario con el embalse a cota definitiva que en el escenario previo al llenado.

**Tabla 3.1. Niveles asociados a permanencias**

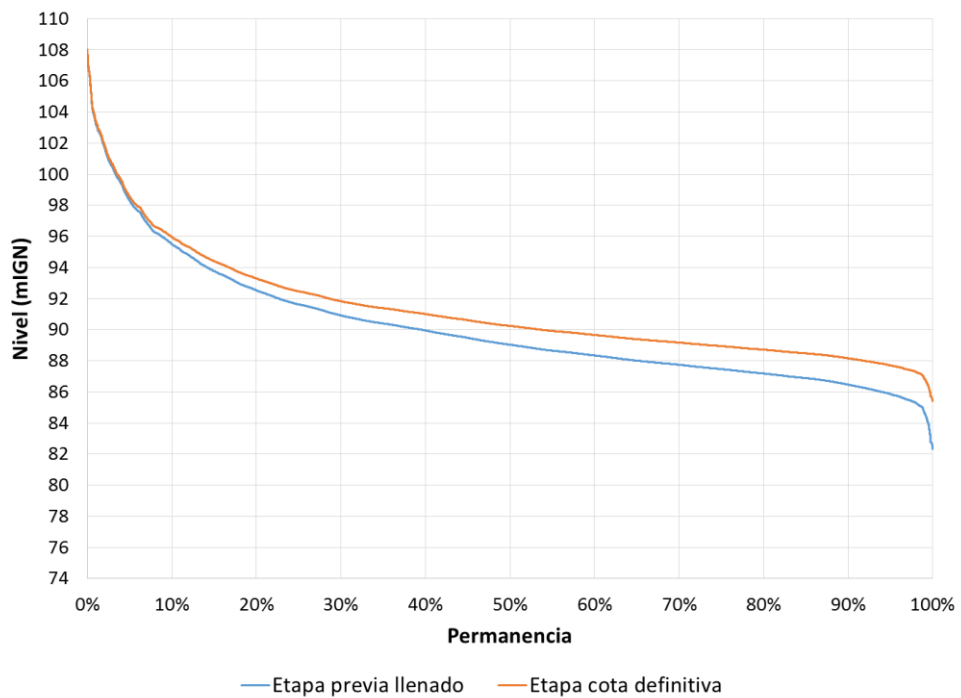
Sitio	Permanencia	Presa Yacyretá	
		Sin	83 mIGN
R11	90%	97.1	97.1
	50%	100.5	100.3
El Dorado	90%	89.0	90.2
	50%	86.5	88.2
San Martín	90%	82.7	85.4
	50%	84.6	86.6
Corpus	90%	78.8	83.9
	50%	80.1	84.5
Santa Ana	90%	76.4	83.1
	50%	77.5	83.2

**Tabla 3.2. Sobrelevaciones asociadas a permanencias**

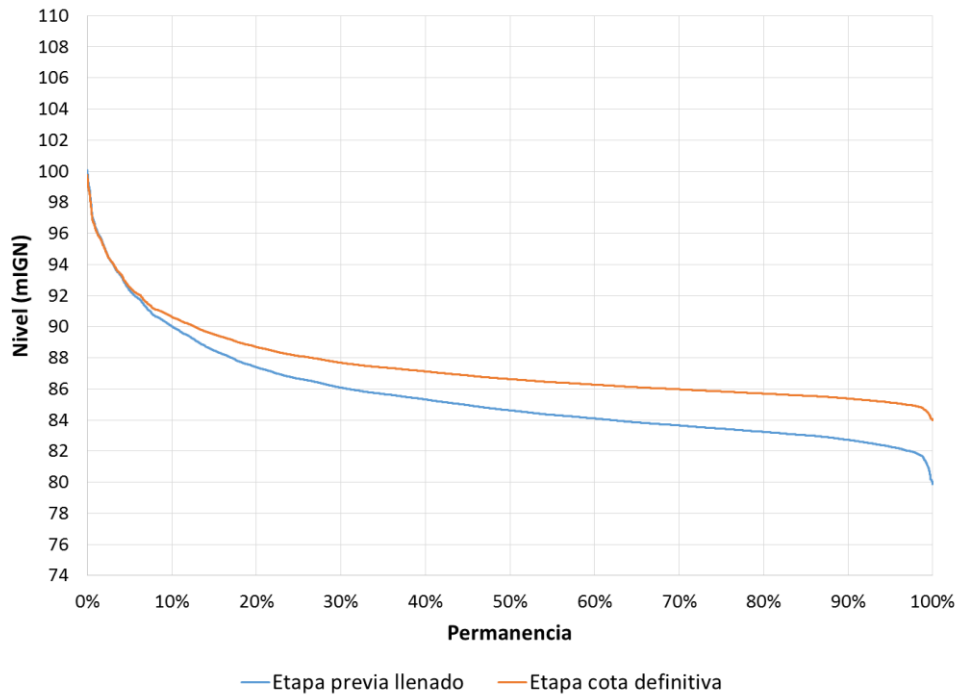
Sitio	Permanencia	Presa Yacyretá
		83 mIGN
R11	90%	-0.5
	50%	-0.2
El Dorado	90%	0.4
	50%	1.2
San Martín	90%	0.6
	50%	2.0
Corpus	90%	2.0
	50%	4.4
Santa Ana	90%	3.8
	50%	5.7



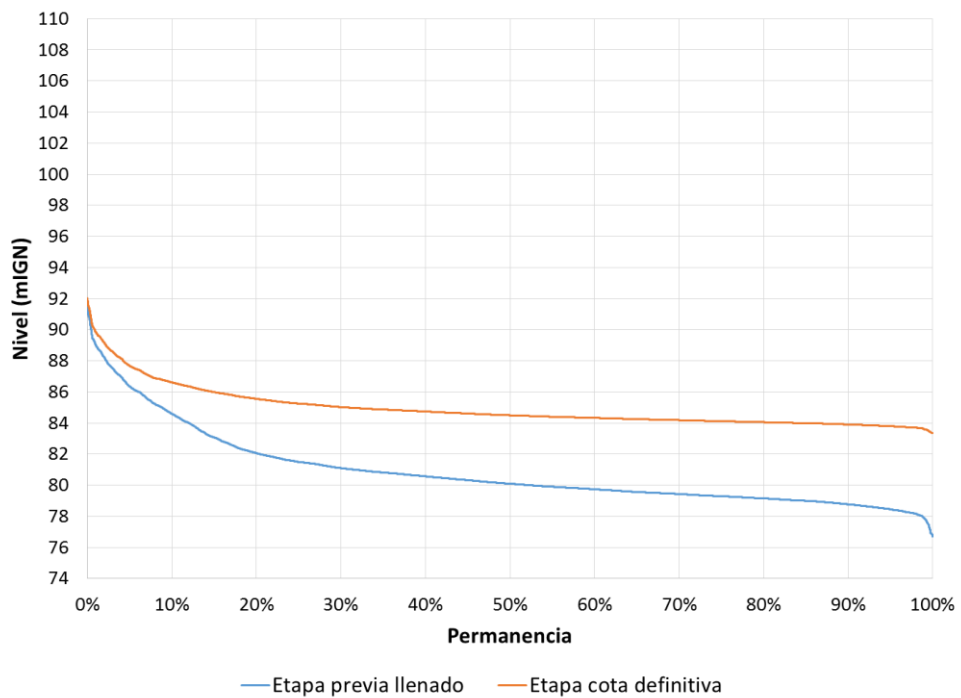
**a) R11**



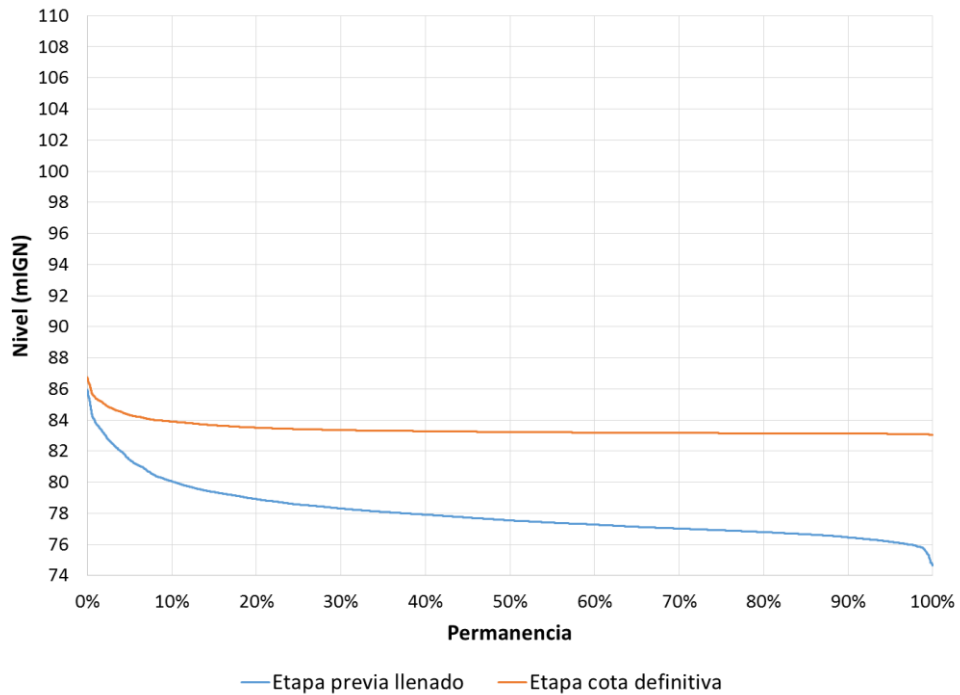
**b) El Dorado**



**c) San Martín**



**d) Corpus**



e) Santa Ana

Figura 3.1. Estadísticas de permanencia de niveles antes y después de Yacyretá.

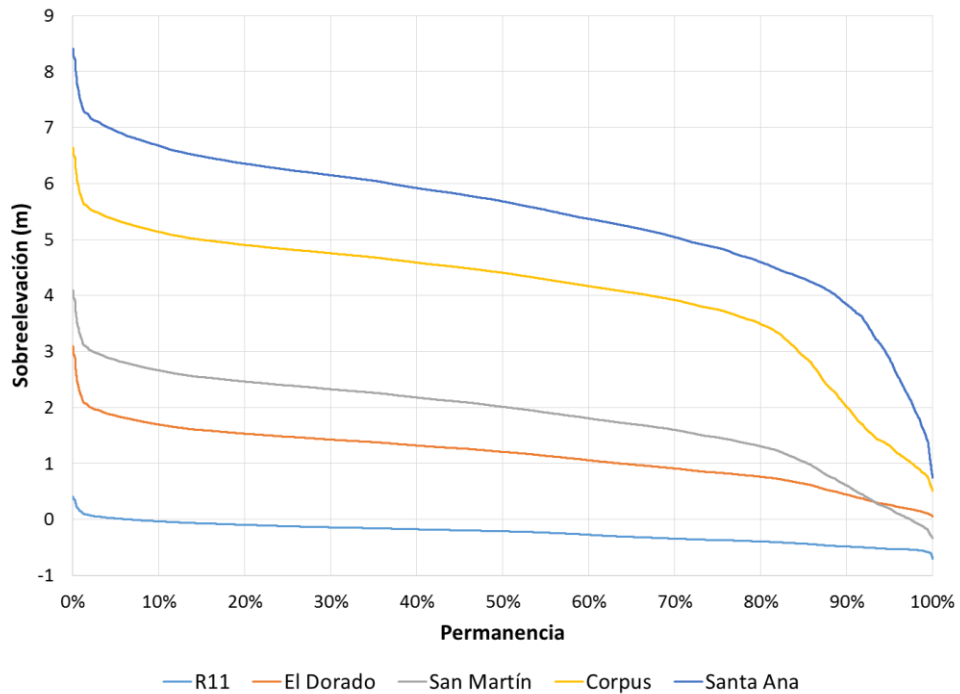


Figura 3.2. Estadísticas de permanencia de sobreelevaciones para Yacyretá a cota 83 mIGN.

## 3.2 Influencia de Yacyretá

### 3.2.1 Observación

La modelación ha indicado que se produce una suavización efectiva del cauce al pasar de la etapa previa al llenado de Yacyretá a la del embalse a cota definitiva. Se identificaron a priori tres causas como las principales que deberían contribuir a este fenómeno:

- Disminución de la altura de las formas de fondo por el aumento de nivel y la disminución de la velocidad, con el consiguiente decremento de la resistencia por forma (transferencia de energía a los torbellinos de eje horizontal por desprendimiento de la capa límite de fondo).
- Disminución del gradiente de tensiones de corte entre el flujo encauzado y en planicie por la disminución de la diferencia relativa de profundidad, con el consiguiente decremento de la intensidad de los torbellinos de eje vertical.
- Disminución de la resistencia por forma de la vegetación de la planicie, al descomponerse y eventualmente desaparecer.

En lo que sigue se efectúa un análisis para cuantificar el primero de los tres efectos, que se presume como el más significativo.

### 3.2.2 Teoría de van Rijn

En el Alto Paraná el cauce es de arena, y se producen formas de fondo (Pinto Martins, 2004; Sandbach, 2012) que son las que contribuyen significativamente a determinar la resistencia hidráulica efectiva al flujo de agua, la cual se cuantifica en términos de la rugosidad efectiva expresada como el coeficiente de Manning. Se utilizó la teoría desarrollada por van Rijn (1984), que se sintetiza a continuación.

Los parámetros que determinan la rugosidad efectiva del fondo son los siguientes: diámetro característicos de la distribución granulométrica,  $d_{50}$  y  $d_{90}$ , densidad del sedimento,  $\rho_s$ , profundidad,  $h$ , velocidad de flujo,  $U$ , densidad del agua,  $\rho$ , y viscosidad cinemática del agua,  $\nu$ .

Paso 1: Se determina el diámetro medio adimensional

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

donde  $s \equiv \rho_s / \rho$  y  $g$  es la aceleración de la gravedad. En términos de este parámetro se calcula el coeficiente de movilidad crítico de iniciación del movimiento

$$\theta_{cr} \equiv \frac{(u_{cr}^*)^2}{g \cdot (s-1) \cdot d_{50}} = \begin{cases} 0.24 \cdot D_*^{-1} & \text{si } D_* \leq 4 \\ 0.14 \cdot D_*^{-0.64} & \text{si } 4 \leq D_* \leq 10 \\ 0.04 \cdot D_*^{-0.10} & \text{si } 10 \leq D_* \leq 20 \\ 0.013 \cdot D_*^{0.29} & \text{si } 20 \leq D_* \leq 150 \\ 0.055 & \text{si } 150 \leq D_* \end{cases}$$

que es la representación adimensionalizada de la tensión de corte crítica, expresada aquí en términos de la velocidad de corte crítica,  $u_{cr}^*$ .

**Paso 2:** Se calcula el coeficiente de Chezy asociado a la rugosidad del grano,  $C'$ ,

$$C' = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot R_H}{3 \cdot d_{90}}\right)$$

donde  $R_H$  es el radio hidráulico de la sección, que se aproximará al tirante  $h$ . En base a este coeficiente se determina la velocidad de corte asociada al grano,  $u'_*$ ,

$$u'_* = \frac{\sqrt{g} \cdot U}{C'}$$

Con esta velocidad de corte y el valor crítico determinado en el Paso 1 se calcula el parámetro de estado,  $T$ ,

$$T = \frac{u'_* - u_{cr}^*}{u_{cr}^*}$$

**Paso 3:** En base al diámetro adimensional,  $D_*$ , y el parámetro de estado,  $T$ , se determina el tipo de forma de fondo que se produce, de acuerdo a la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Tipos de formas de fondo en función de diámetro de partícula y régimen de transporte.

Régimen de Transporte		Tamaño de la partícula	
		$1 \leq D_* \leq 10$	$D_* > 10$
Inferior	$0 \leq T \leq 3$	Mini rizos	Dunas
	$3 < T \leq 10$	Mega rizos y dunas	Dunas
	$10 < T \leq 15$	Dunas	Dunas
Transición	$15 < T < 25$	Dunas arrasadas, ondas de arena	
Superior	$T \geq 25, Fr < 0,8$	ondas de arena (simétricas)	
	$T \geq 25, Fr \geq 0,8$	Lecho plano o antidunas	

Se calculan las alturas y longitudes de dunas ( $h_d$  y  $\lambda_d$ , respectivamente) y rizos ( $h_r$  y  $\lambda_r$ , respectivamente), según las siguientes ecuaciones:

$$\frac{h_d}{h} = 0.11 \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T}) (25 - T); \quad \lambda_d = 7,3h$$

$$\frac{h_r}{h} = 0.02 (1 - e^{-0.1T}) (10 - T); \quad \lambda_r = 0,5h$$

Paso 4: Se determinan las alturas de rugosidad equivalente de grano,  $k_g$ , dunas,  $k_d$ , y rizos,  $k_r$ ,

$$k_g = 3d_{90}$$

$$k_d = 1,1 \cdot h_d \cdot \left( 1 - e^{-25 \cdot \frac{h_d}{\lambda_d}} \right)$$

$$k_r = 20 \cdot \frac{h_r^2}{\lambda_r}$$

La altura total de rugosidad es, entonces,

$$k_s = k_g + k_r + k_d$$

Paso 5: El coeficiente de Chezy total se calcula como

$$C = 18 \cdot \log \left( \frac{12 \cdot R_H}{k_s} \right)$$

de donde surge el coeficiente de Manning efectivo

$$n = \frac{R_H^{1/6}}{C}$$

### 3.2.3 Aplicación

Para las propiedades se tomaron los siguientes valores:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$$

El diámetro medio se fijó en  $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$  (Sandbach, 2012). Para el diámetro pasante en un 90% se usó la relación  $d_{90} = 2d_{50}$ , de donde  $d_{90} = 0,70 \text{ mm}$ .

Se analizó en primer lugar el Tramo 3 (entre estaciones Santa Ana y San Martín), en el cual los valores de Manning del cauce, según el modelo, fueron de 0,0400 para la etapa previa al llenado, y de 0,0379 para la etapa a cota definitiva, es decir, se produjo una disminución del 5,2%.

Para la etapa previa al llenado, de acuerdo al modelo el tirante medio es de alrededor de 36 m, mientras que la velocidad media en el cauce es de aproximadamente 1,2 m/s. Con estos valores se obtiene un coeficiente de Manning efectivo de 0,0402, que explica muy satisfactoriamente el valor de calibración para esta etapa.

Es interesante hacer notar que el régimen de formas de fondo es de dunas y mega-rizos, y que los segundos dan una contribución a la rugosidad mayor que la primera:  $k_d = 0,28 \text{ m}$  (asociado a  $h_d = 1,7 \text{ m}$ ) contra  $k_r = 1,05 \text{ m}$  (asociado a  $h_r = 0,97 \text{ m}$ ). La contribución por grano es despreciable ( $k_g = 0,002 \text{ m}$ ), con lo cual  $k_s = 1,34 \text{ m}$ .

Ahora bien, la inclusión de Yacyretá a cota definitiva produce en este tramo un incremento de tirante a aproximadamente 51 m y una disminución de la velocidad a alrededor de 1 m/s. Con ello resulta un valor de Manning efectivo de 0,0381 ( $k_d = 0,21 \text{ m}$  y  $k_r = 0,75 \text{ m}$ , asociados a  $h_d = 1,5 \text{ m}$  y  $h_r = 0,75 \text{ m}$ ), que también explica en forma muy satisfactoria el valor de calibración para esta segunda etapa.

Se concluye entonces que para el Tramo 3 el cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa (mayores tirantes y menores velocidades) produce la suavización efectiva del cauce a través de la disminución de la altura de las formas de fondo.

En el caso del Tramo 2 (entre estaciones Ita Cuá y Santa Ana) los valores de Manning del cauce, según el modelo, fueron de 0,0495 para la etapa previa al llenado, y de 0,0300 para la etapa a cota definitiva, es decir, se produjo una disminución del 39%. Para la etapa previa al llenado, de acuerdo al modelo el tirante medio es de alrededor de 23 m, mientras que la velocidad media en el cauce es de aproximadamente 1,25 m/s, resultando un coeficiente de Manning efectivo de 0,0387, que es 22% menor al valor de calibración para esta etapa. La diferencia restante se asigna a la pérdida hacia los torbellinos de eje vertical, ya que ese es esencialmente el cambio relativo que se obtuvo en el Estudio PAE al pasar de modelación 1D (que no resuelve los torbellinos de eje vertical) a modelación 2D (que sí los resuelve)

para el tramo de aguas abajo de la presa de Yacyretá. La inclusión de Yacyretá a cota definitiva produce en este tramo un incremento de tirante a aproximadamente 41 m y una disminución de la velocidad a alrededor de 0,5 m/s, con lo que resulta un valor de Manning efectivo de 0,0238, que representa una disminución del 39%, explicando entonces muy satisfactoriamente el cambio relativo de rugosidad. Esto permite concluir entonces que para el Tramo 2 la suavización efectiva del cauce también se da a través de la disminución de la altura de las formas de fondo debido al cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa, a pesar de que hay una contribución significativa a la resistencia hidráulica por parte de los torbellinos de eje vertical, pero que no varía significativamente entre ambas etapas.

Las suavizaciones de los tramos 5 y 6 ya no pueden asignarse al efecto de remanso de la presa de Yacyretá. Si bien seguramente este efecto también se debería poder explicar por la disminución de las alturas de las formas de fondo, la causa de esta disminución debería estar asociada a la operación de la presa de Itaipú, que impone un régimen diario en el que predominan durante la mayor parte del tiempo velocidades de corriente menores a las del antiguo régimen natural.

## 4 ESCENARIOS FUTUROS

### 4.1 Planteo

Ante la construcción de la presa de Corpus se producirán efectos sobre las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio. En particular, resulta importante cuantificar estos efectos en tres zonas características: el pie de las Cataratas del Iguazú, el pie de la presa de Itaipú, y el Punto Trifinio.

El modelo matemático construido es la herramienta pertinente para predecir la nueva situación, de modo que se la utilizó con este propósito.

### 4.2 Escenarios de ensayo

La implementación de la presa de Corpus generaría efectos de distintas escalas temporales sobre la hidrodinámica. Es conveniente avanzar por pasos en la comprensión de estos efectos, de modo que se establecerá una secuencia progresiva de escenarios.

En esta fase del estudio, la presa de Corpus se implementó como una condición de borde interna de nivel constante (en la progresiva 1656,7 Km). De esta manera no se tienen en cuenta ni las variaciones intradiarias producidas por su empuntamiento, ni posibles políticas de laminación de crecidas.

Para representar la variabilidad hidrológica intra e interanual, se tomó como ventana de tiempo de simulación a la comprendida entre enero de 1983 y diciembre de 2014.

Se utilizaron los caudales registrados en Itaipú y en Salto Cataratas como condición de borde de agua arriba. En las Cataratas del Iguazú se repartieron los caudales de acuerdo al criterio explicado en la sección 2.3.

Se fijó como condición de borde de aguas abajo un nivel constante de 83 mIGN en Posadas, compatible con la política de operación de la represa Yacyretá a cota definitiva.

Se establecieron tres cotas posibles para el embalse de Corpus: 105, 100 y 95 mGN. También se simuló el escenario actual, sin la presa de Corpus.

Cabe destacarse que en este primer análisis no se tienen en cuenta las disminuciones de rugosidad del cauce que podrían producirse por la modificación de las formas de fondo al construirse la represa e incrementarse los tirantes. Se espera que este efecto disminuya ligeramente el impacto hidrodinámico de Corpus calculado a continuación.

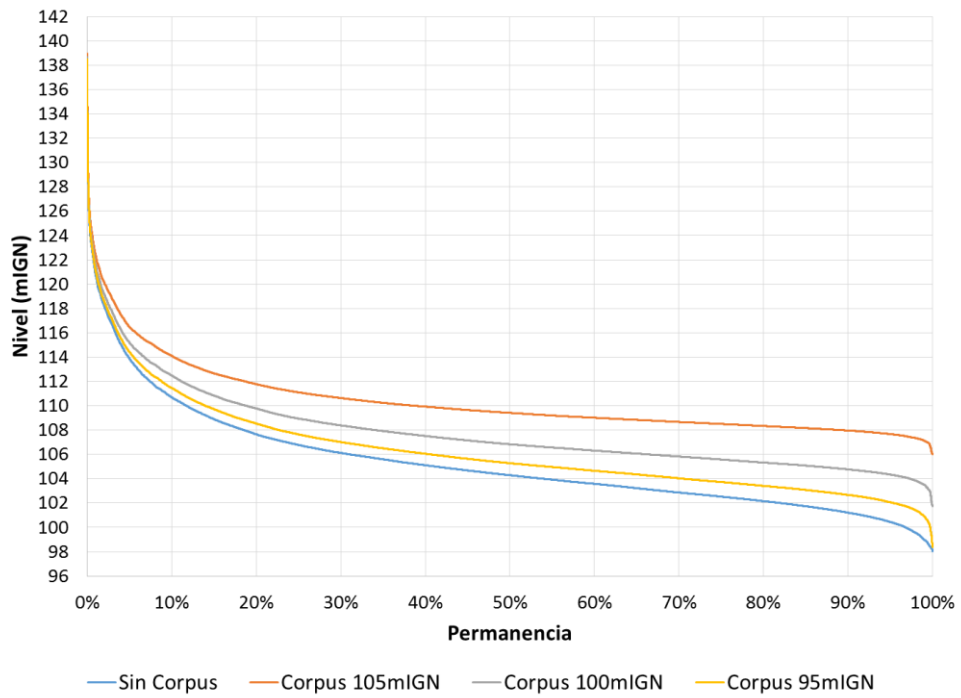
### 4.3 Efectos de la presa de Corpus

Para cada escenario se simuló un período de 33 años, almacenando resultados cada 4 horas. Luego se realizaron estadísticas de permanencia de niveles en las siguientes estaciones:

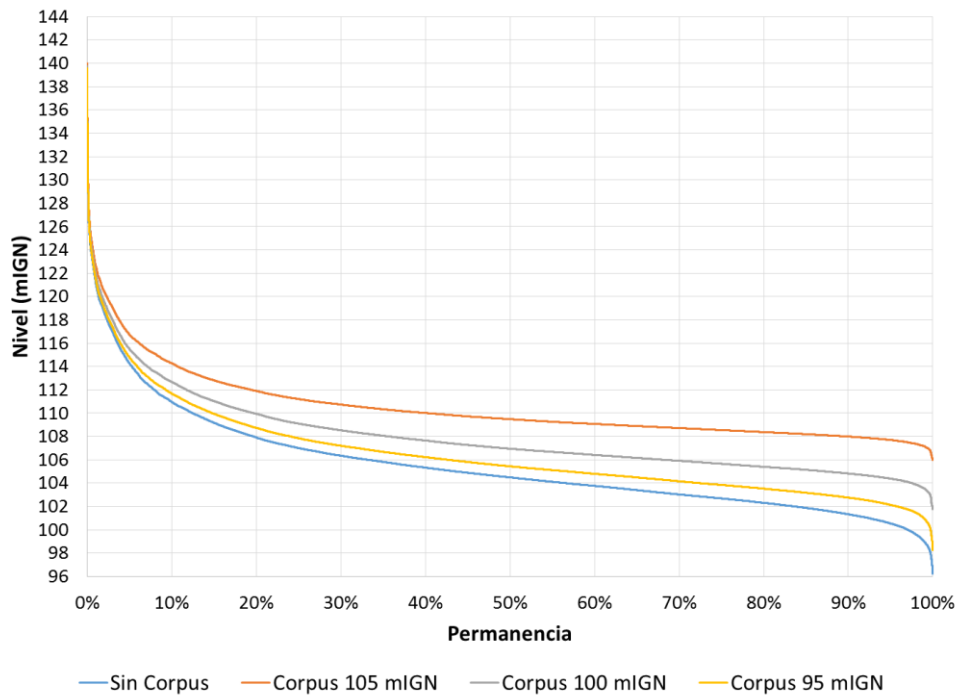
- Al pie del Salto San Martín, en la sección final del brazo corto.
- Aguas abajo de la Garganta del Diablo, sobre el río Iguazú. Dado que es difícil predecir con precisión el comportamiento de la superficie libre en el primer tramo del brazo largo debido a los significativos aportes laterales existentes, los niveles se analizan para la sección Brazolargo\_4A de la Figura 2.7, donde todos los aportes de la Garganta del Diablo se encuentran incorporados al cauce.
- En la progresiva 23 Km del río Iguazú, aguas abajo de la confluencia del brazo corto y el brazo largo.
- Al pie de la presa de Itaipú.
- En las estaciones Corpus y R11, sobre el Alto Paraná.

Cabe remarcar que los niveles calculados al pie del Salto San Martín y aguas abajo de la Garganta del Diablo tienen incertidumbres derivadas de la manera en que fueron construidas las secciones transversales. No obstante, no se aprecian desniveles muy significativos entre estos sitios y la progresiva 23 Km del río Iguazú, donde la certidumbre es mucho mayor.

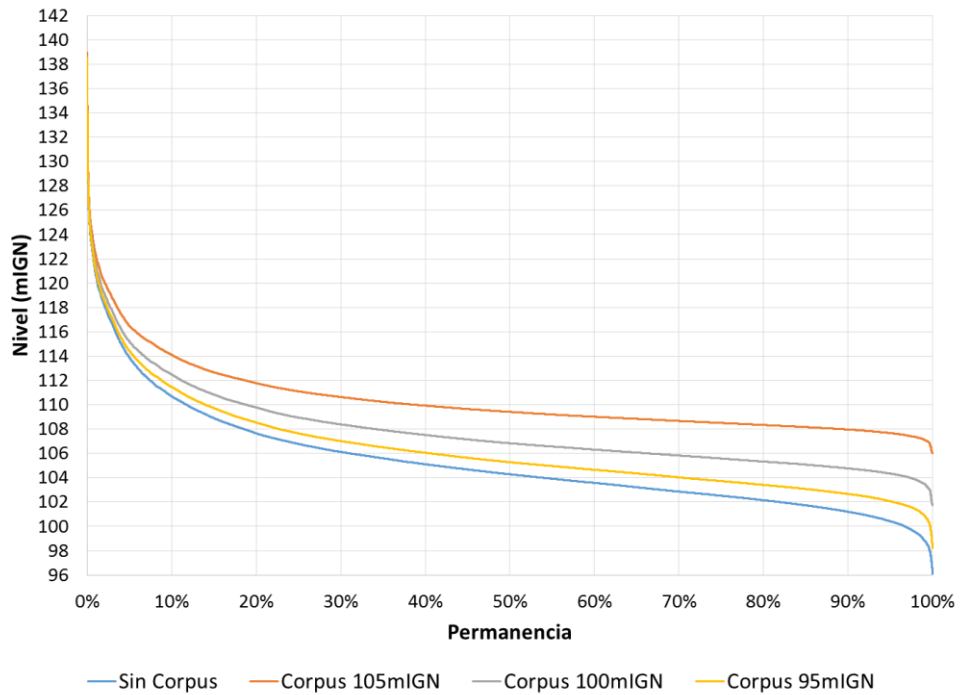
La Figura 4.1 presenta las curvas de permanencia para los distintos escenarios, incluyendo el actual sin la presa de Corpus. En la Tabla 4.1 se muestran los niveles correspondientes a las permanencias de 90% y 50% del tiempo. Las sobrelevaciones que la presencia de Corpus impone sobre esos sitios se grafican en la Figura 4.2, mientras que en la Tabla 4.2 se indican los valores correspondientes al 90% y 50% de permanencia. Se observa que Corpus a cota 105 mIGN impondría en Cataratas sobrelevaciones de algo más de 3 m el 90% del tiempo, y de más de 5 m el 50% del tiempo; estas sobrelevaciones bajarían a algo más de 0,50 m y a 1,0 m, respectivamente, si la cota fuera de 95 mIGN. Respecto de Itaipú, con la cota 105 mIGN de Corpus tendría sobrelevaciones de algo más de 4 m y 6 m, respectivamente, mientras que estas se reducirían a algo más de 1 m y a 1,6 m si la cota fuera 95 mIGN. En el caso de R11, las sobrelevaciones serían de más de 5 m y 8 m a cota 105 mIGN, y de 1,6 m y 2,4 m a cota 95 mIGN.



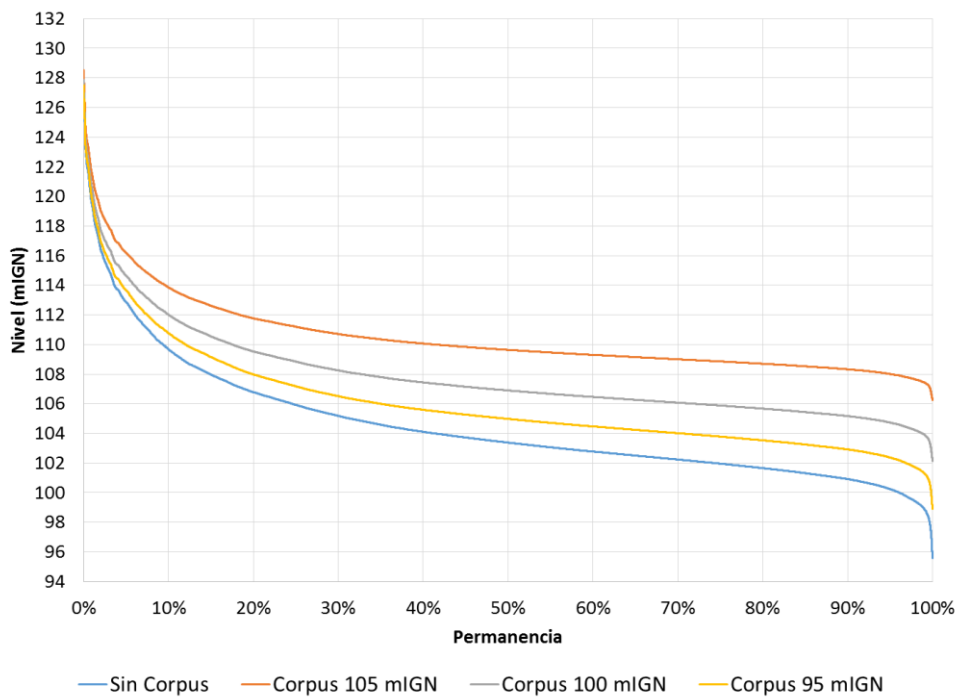
**a) Pie de Salto San Martín**



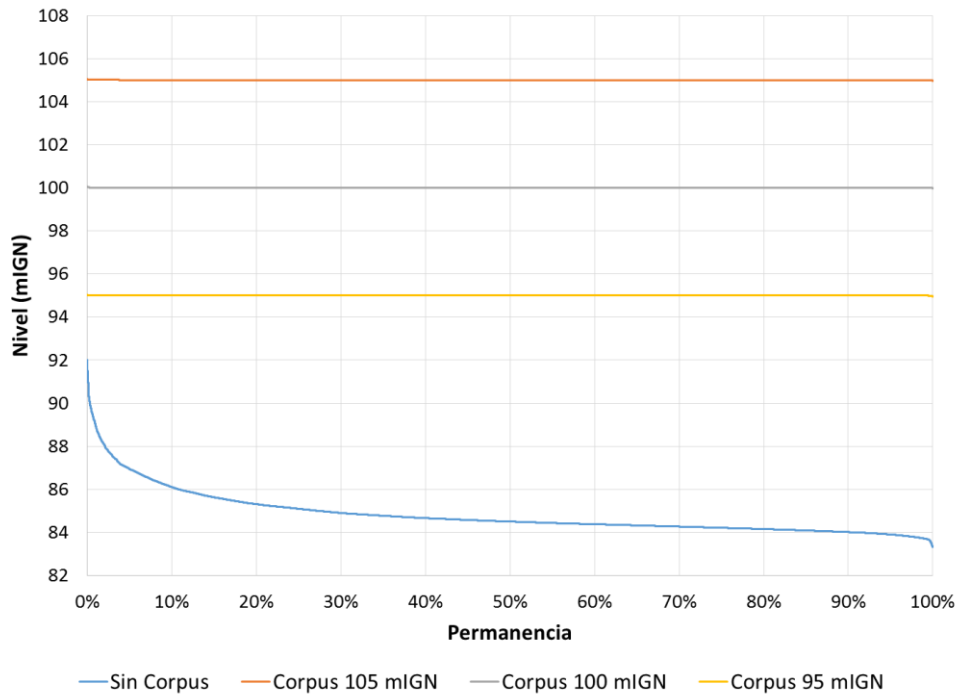
**b) Aguas abajo de Garganta del Diablo**



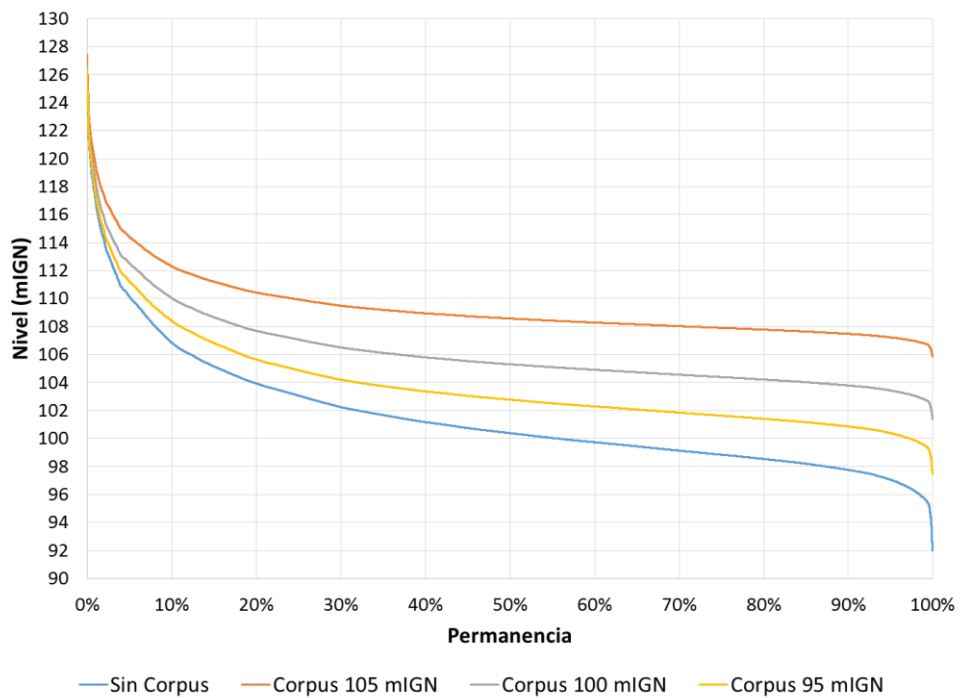
**c) Río Iguazú 23 Km**



**d) Pie de Itaipú**



**e) Corpus**

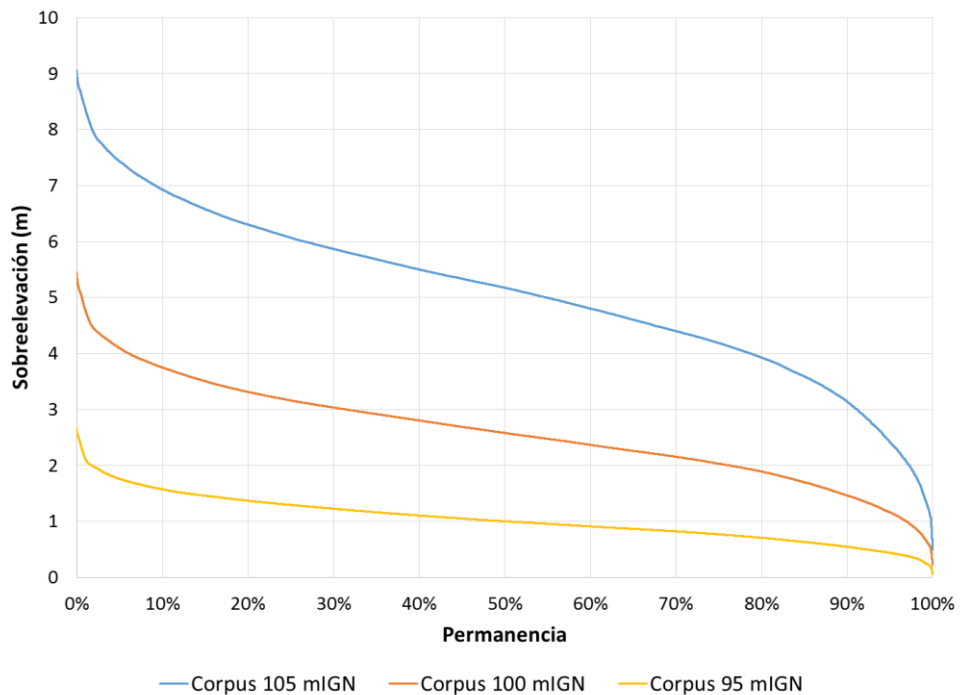


**a) R11**

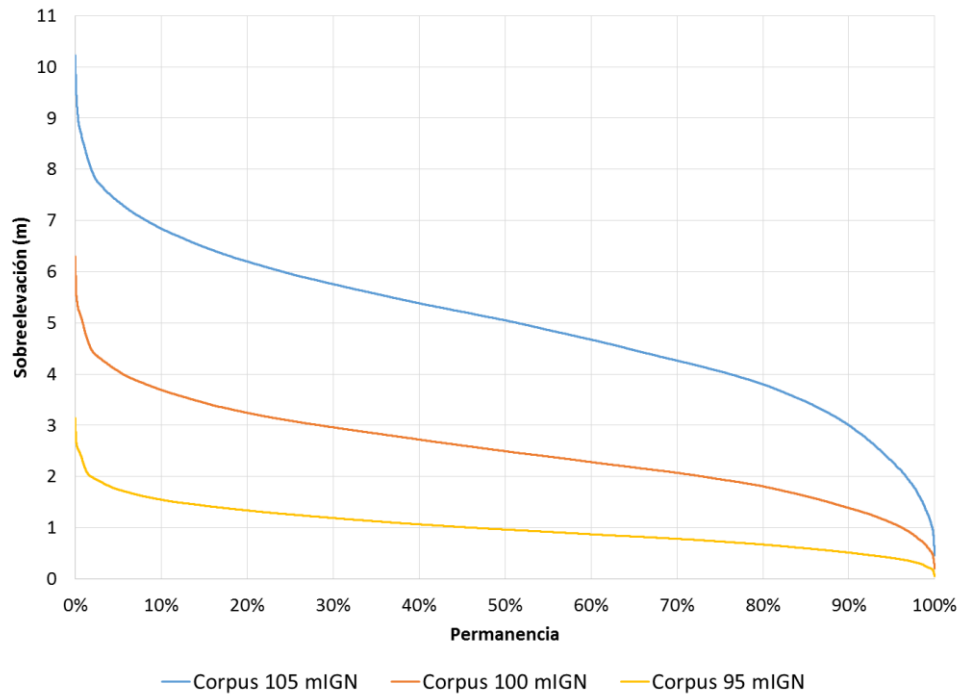
**Figura 4.1.** Estadísticas de permanencia de niveles para distintas cotas de Corpus.

**Tabla 4.1. Niveles asociados a permanencia**

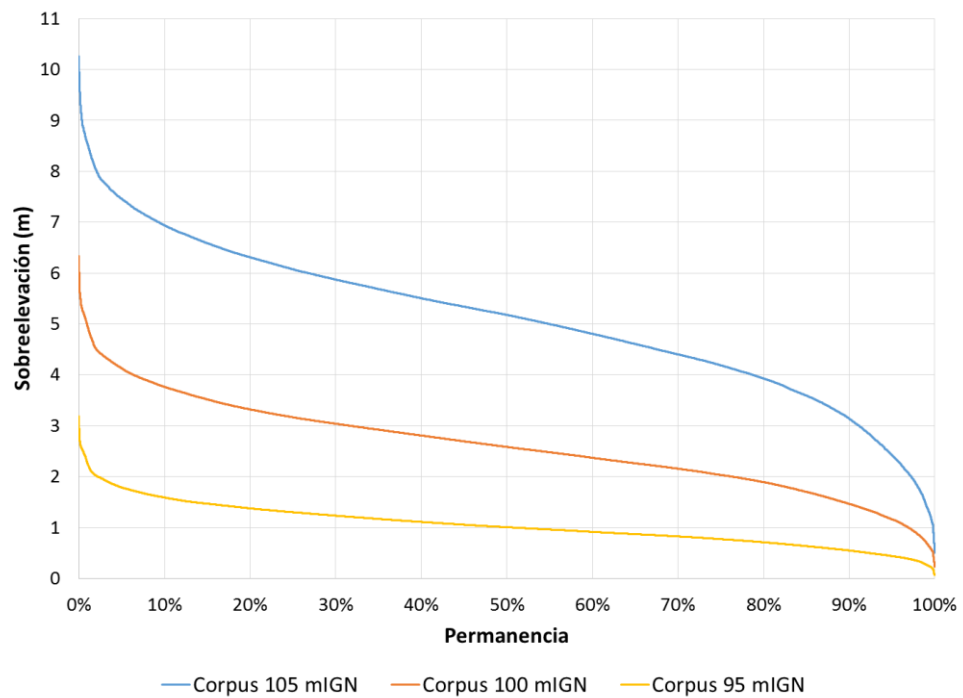
Sitio	Permanencia	Presa de Corpus			
		Sin	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
S. San Martín	90%	101.2	108.0	104.8	102.7
	50%	104.3	109.4	106.8	105.3
G. del Diablo	90%	101.3	108.0	104.8	102.8
	50%	104.5	109.5	106.9	105.4
Iguazú 23 Km	90%	101.2	108.0	104.8	102.7
	50%	104.3	109.4	106.8	105.3
Itaipú	90%	100.9	108.3	105.2	102.9
	50%	103.4	109.6	106.9	105.0
Corpus	90%	84.0	105.0	100.0	95.0
	50%	84.5	105.0	100.0	95.0
R11	90%	97.8	107.5	103.8	100.9
	50%	100.4	108.6	105.3	102.8



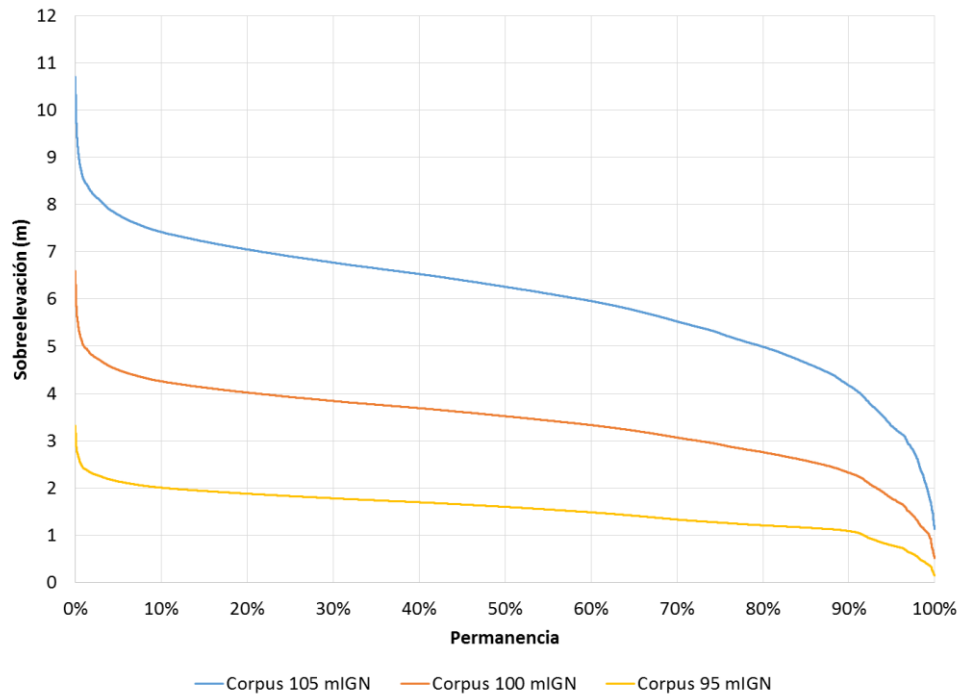
**a) Pie de Salto San Martín**



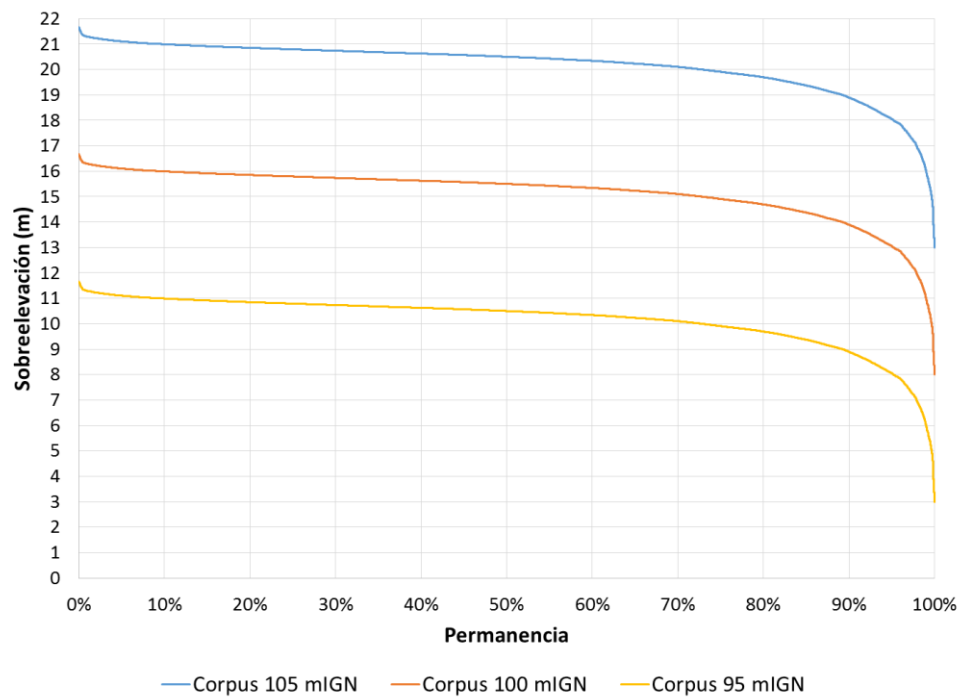
**b) Aguas abajo de Garganta del Diablo**



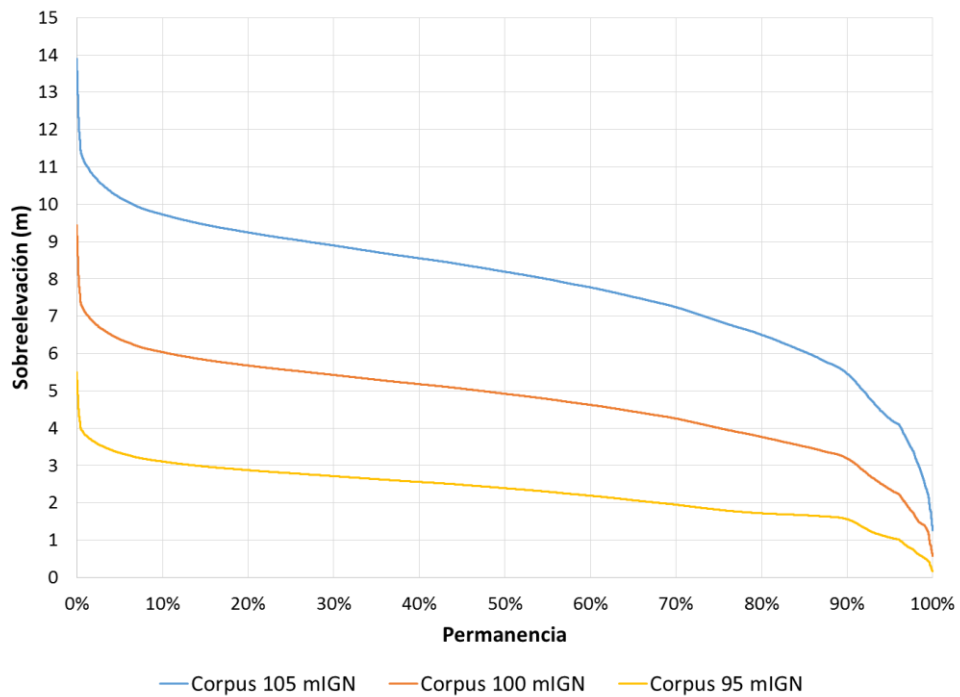
**c) Río Iguazú 23 Km**



**d) Pie de Itaipú**



**e) Corpus**



f) R11

Figura 4.2. Estadísticas de permanencia de sobreelevaciones para distintas cotas de Corpus.

Tabla 4.2. Sobreelevaciones asociadas a permanencia

Sitio	Permanencia	Presa de Corpus		
		105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
S. San Martín	90%	3.1	1.5	0.5
	50%	5.2	2.6	1.0
G. del Diablo	90%	3.0	1.4	0.5
	50%	5.0	2.5	1.0
Iguazú 23 Km	90%	3.1	1.5	0.5
	50%	5.2	2.6	1.0
Itaipú	90%	4.2	2.3	1.1
	50%	6.3	3.5	1.6
Corpus	90%	18.9	13.9	8.9
	50%	20.5	15.5	10.5
R11	90%	5.5	3.2	1.6
	50%	8.2	4.9	2.4

Para complementar las estadísticas de nivel en estaciones puntuales se construyeron, además, perfiles longitudinales de la superficie libre a caudal constante. Se utilizaron los mismos valores de caudal del río Paraná en Itaipú y del río Iguazú en Cataratas que los empleados en el estudio de pre-factibilidad (UNLP 2012), de modo de que los resultados fueran comparables. Estos caudales se indican en la Tabla 4.3, junto con su significación estadística de acuerdo a los análisis efectuados sobre el período 1994-2011 (presentados en el Primer Informe Parcial).

**Tabla 4.3.** Caudales seleccionados para las simulaciones a caudal constante (Tr: recurrencia).

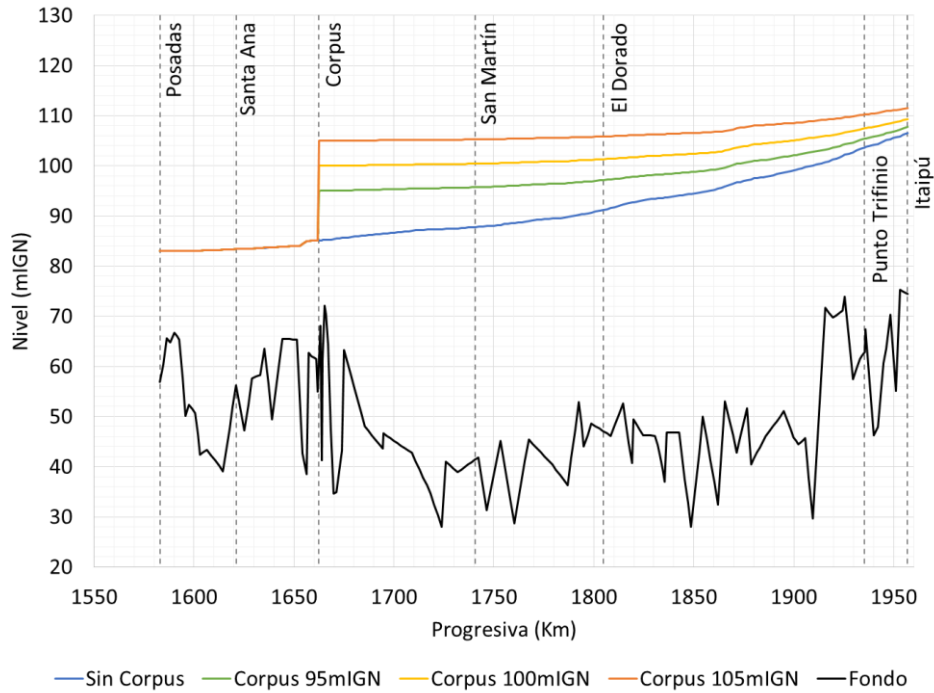
Condición	Caudal Itaipú		Caudal Cataratas	
	Valor (m <sup>3</sup> /s)	Significación	Valor (m <sup>3</sup> /s)	Significación
A- Paraná con caudal alto	14.000	Superado 15%	1.000	Superado 80%
B- Paraná con caudal muy alto	24.000	Tr = 6 años	1.000	Superado 80%
C- Paraná con caudal extremo	44.000	Tr > 100 años	1.000	Superado 80%
D- Iguazú con caudal bajo	10.500	Superado 50%	740	Superado 90%
E- Iguazú con caudal medio	10.500	Superado 50%	1.500	Superado 50%
F- Iguazú con caudal alto	10.500	Superado 50%	3.435	Superado 10%

En la Figura 4.3 se presentan los perfiles longitudinales del río Paraná entre Posadas e Itaipú para las condiciones A, B y C. Como era de esperarse, se observa que la sobre-elevación respecto del escenario sin Corpus disminuye a medida que el caudal aumenta, y también cuando la cota de embalse se reduce. Para los escenarios de caudal más elevados se aprecia una zona de pendiente relativamente alta entre las progresivas 1860 y 1870 Km, cerca de la localidad de Puerto Esperanza (donde se produce un angostamiento de la sección transversal). No se grafican los perfiles del río Iguazú para estos escenarios ya que, dados los altos caudales del Paraná y el bajo caudal del Iguazú, la superficie libre de este último se mantiene prácticamente horizontal, con un nivel similar al del Punto Trifinio.

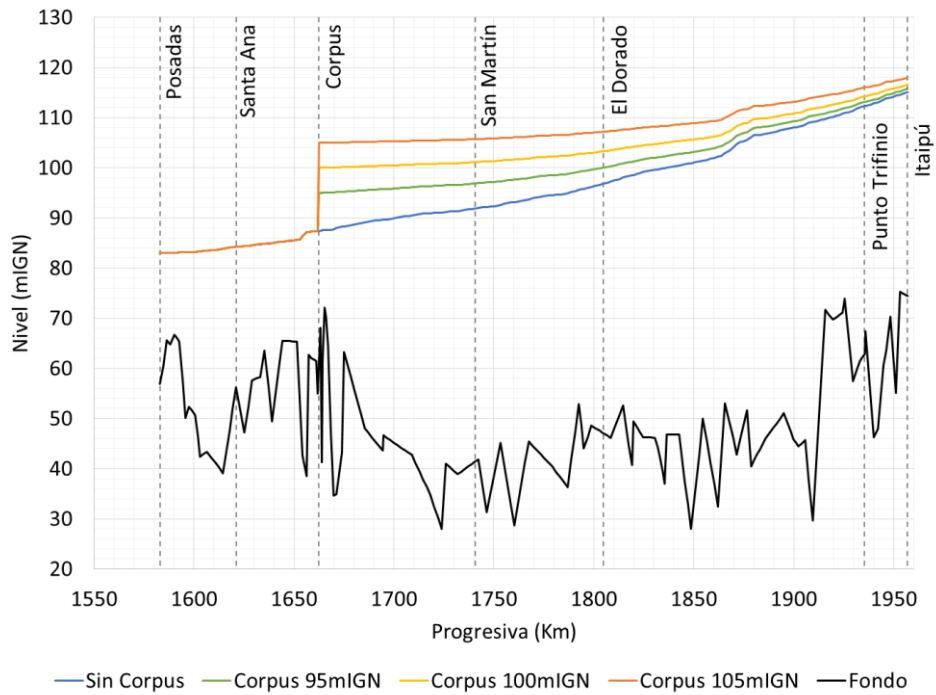
La Figura 4.4 muestra los perfiles longitudinales del río Iguazú entre el Punto Trifinio y el Salto San Martín, por un lado, y la Garganta del Diablo, por el otro, ambos partiendo de la progresiva 23 Km, para las condiciones D, E y F. Los niveles a lo largo de ambas ramas prácticamente se superponen (por eso no se distinguen en la figura). Se observa que para caudales bajos del Iguazú la superficie libre se encuentra muy nivelada, excepto en el escenario sin Corpus a partir de la estación Puerto Macuco, donde tiende a empinarse a medida que se acerca a las Cataratas. Para los caudales más altos se observan pendientes más pronunciadas en todo el tramo, que aumentan para menores cotas de Corpus y a menor distancia de las Cataratas.

En la Figura 4.5 se comparan los resultados para las condiciones A, B y C con los publicados en el estudio de pre-factibilidad. Se observa que en este estudio previo se tiende a subestimar la capacidad de conducción del río Paraná aguas arriba de la estación El Dorado, con lo cual resultan niveles de agua mayores en este tramo, que resultan relativamente más significativos cuanto menor es el caudal y menor la cota de embalse de

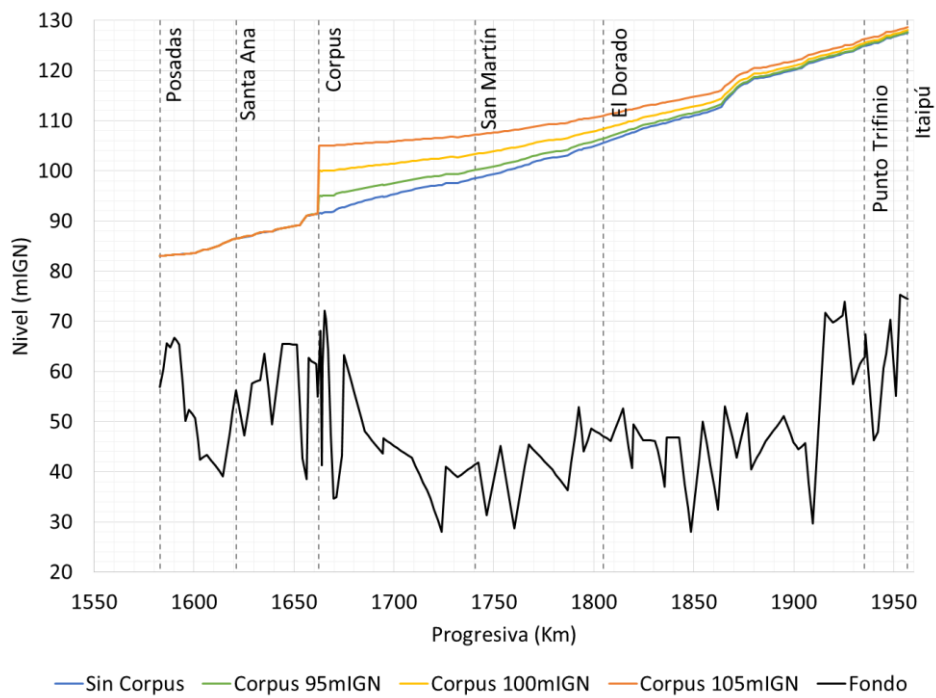
Corpus. Se enfatiza que el presente modelo se considera de mayor certidumbre dado el excelente grado de acuerdo entre los niveles simulados y registrados en las estaciones R11 y Puerto Iguazú.



**a) Condición A**

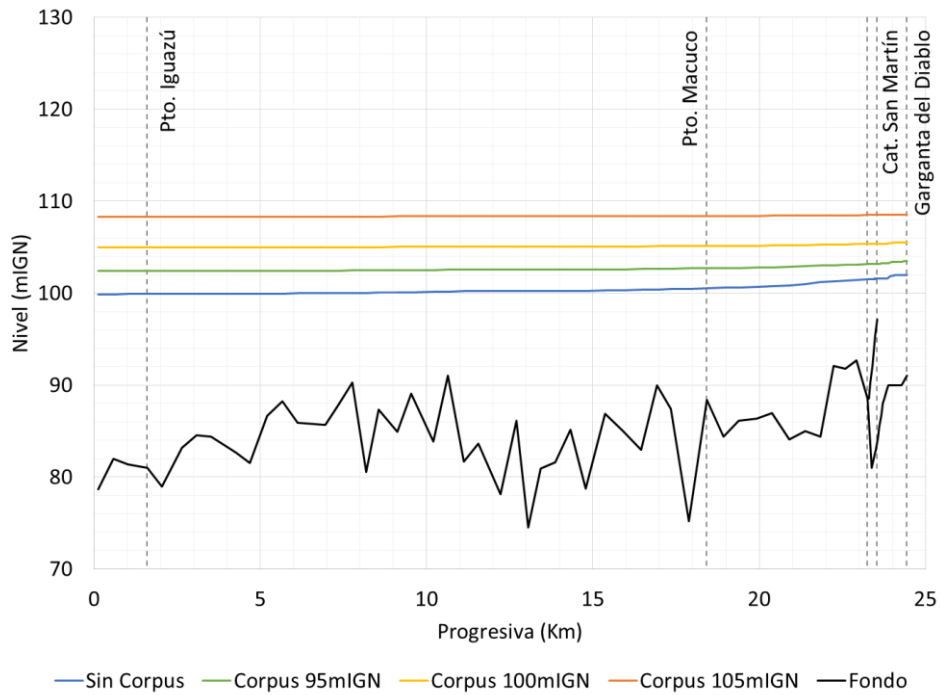


**b) Condición B**

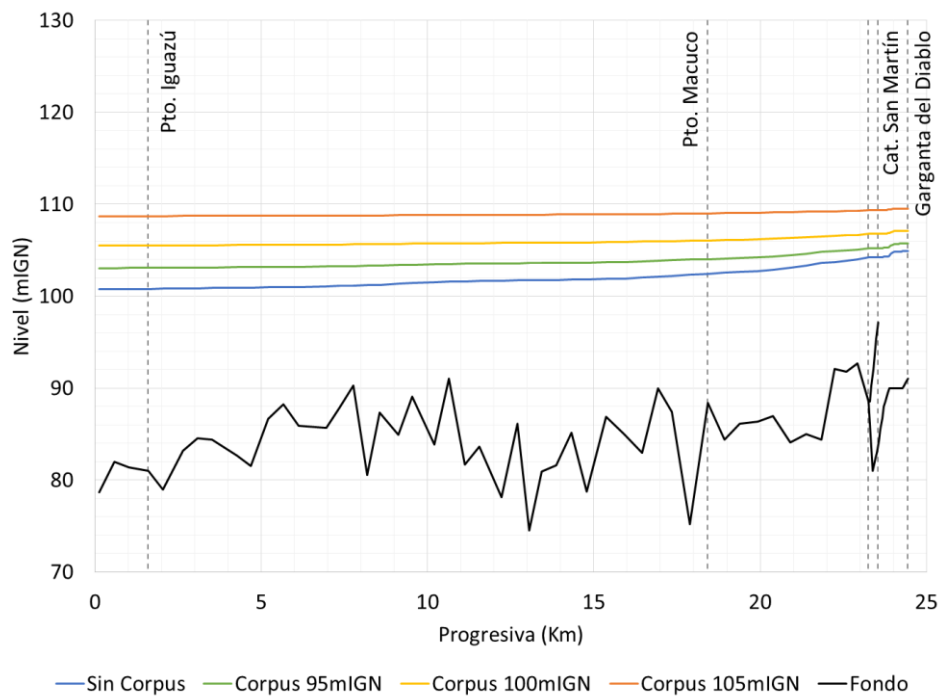


**c) Condición C**

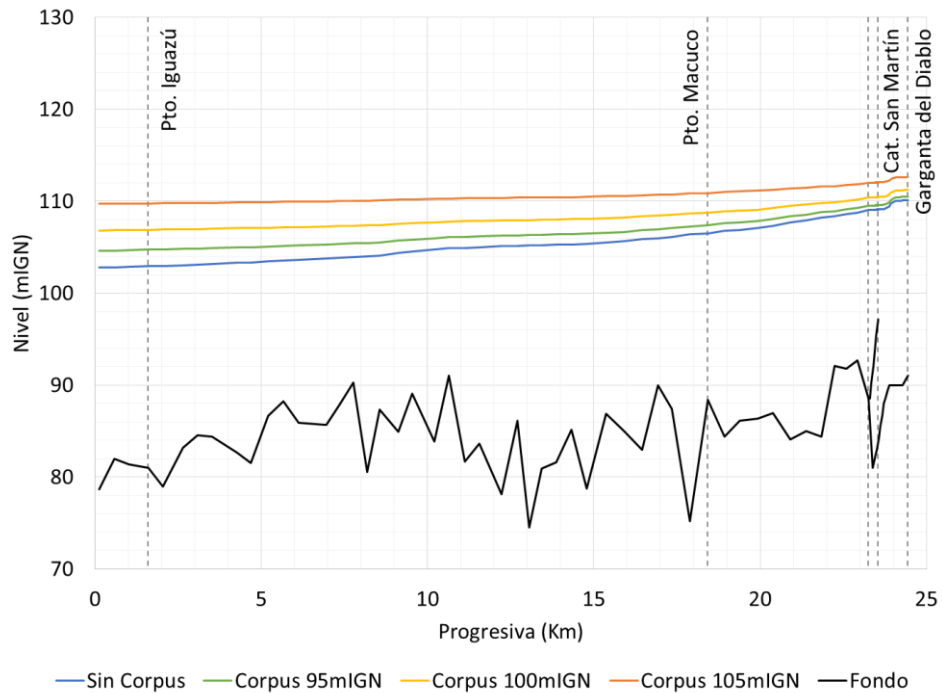
**Figura 4.4.** Perfiles longitudinales del río Paraná a caudal constante.



**a) Condición D**

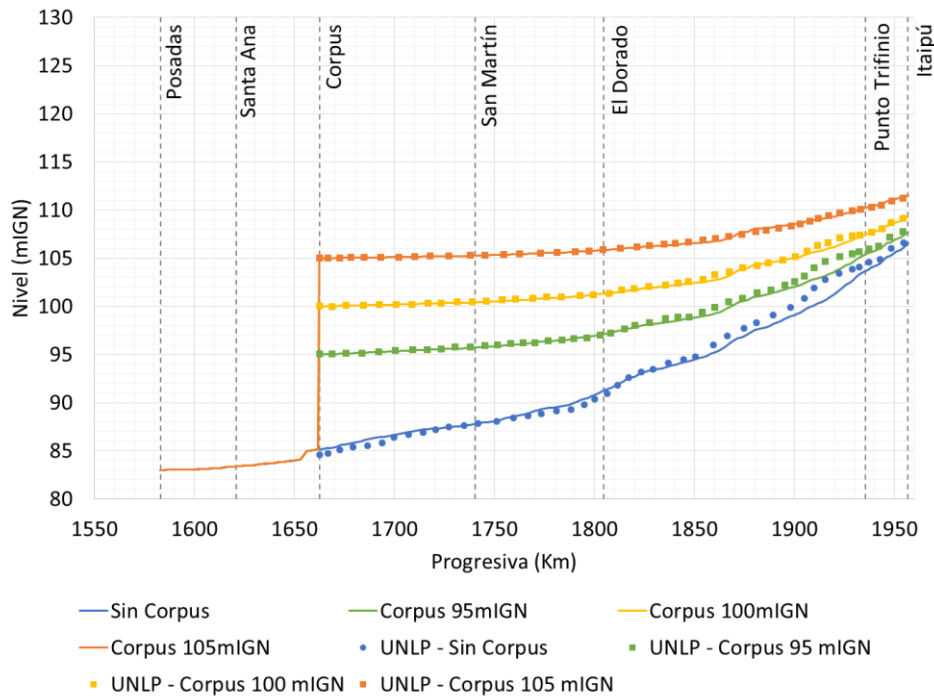


**b) Condición E**

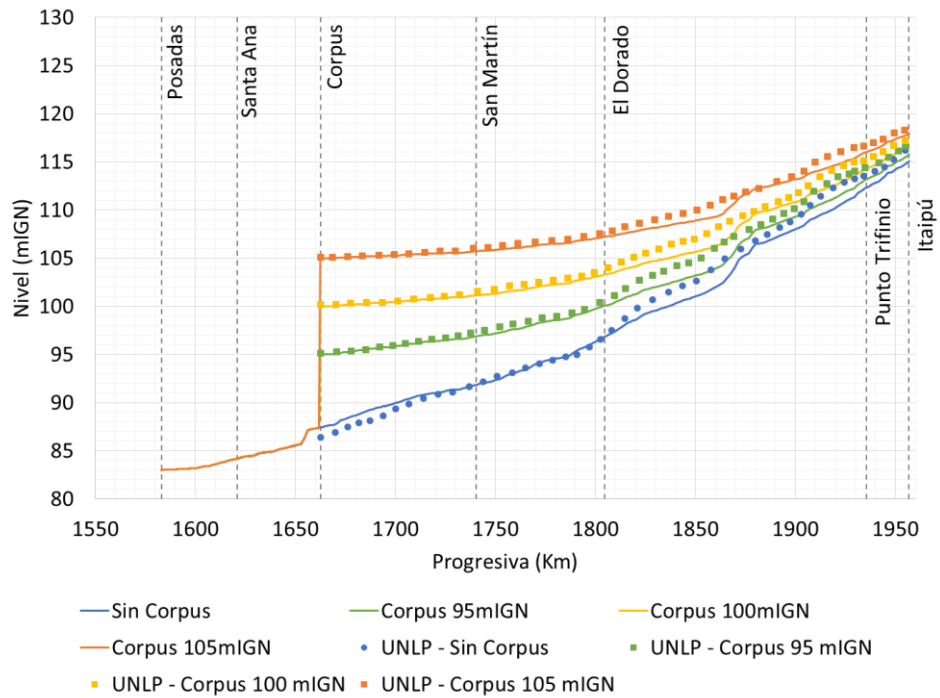


**c) Condición F**

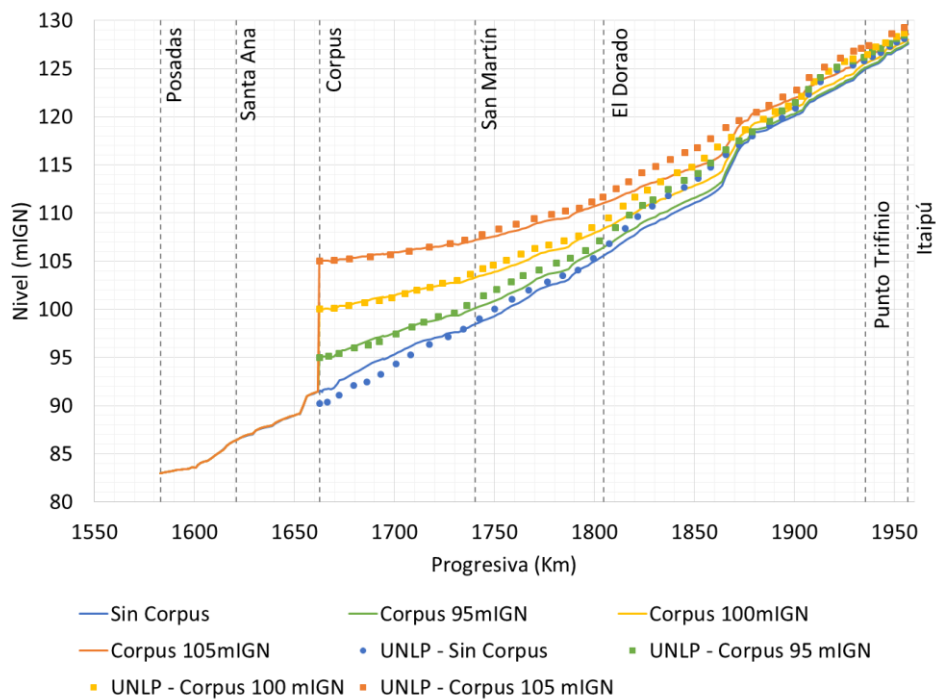
**Figura 4.4.** Perfiles longitudinales del río Iguazú a caudal constante.



**a) Condición A**



**b) Condición B**



**c) Condición C**

**Figura 4.5.** Comparación de perfiles longitudinales del río Paraná a caudal constante.

## 5 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE ITAIPÚ

### 5.1 Importancia

La operación de la presa de Itaipú ejerce un efecto significativo sobre las condiciones hidrodinámicas del río Paraná aguas abajo de ese cierre. De hecho, esa operación está condicionada por el acuerdo tripartito entre Argentina, Paraguay y Brasil que obliga a limitar las tasas de variación del nivel en el Punto Trifinio.

No se conoce cuál es la política de operación de la central, de modo que sólo podrían inferirse algunas pautas a través del análisis de los datos disponibles. A continuación se efectúa un análisis en esta dirección.

### 5.2 Datos disponibles

Se cuenta con datos de erogación de caudales medio diarios de la presa de Itaipú (turbinados y erogados por vertedero), y caudales medios diarios en Guaira, que es la cola del embalse de Itaipú (Figura 5.1). Los datos de caudal de Itaipú fueron provistos por la EBY, mientras que los de caudal de Guaira se tomaron de la base de datos del Sistema de Información y Alerta Hidrológico del INA.

Los datos cubren un período extenso de tiempo (desde 1982 hasta el presente en Itaipú, y el período 2006-2015 en Guaira) pero con algunos vacíos, por lo que para el presente análisis se decidió utilizar el último período completo, que abarca los años 2013 y 2014 (Figura 5.2).

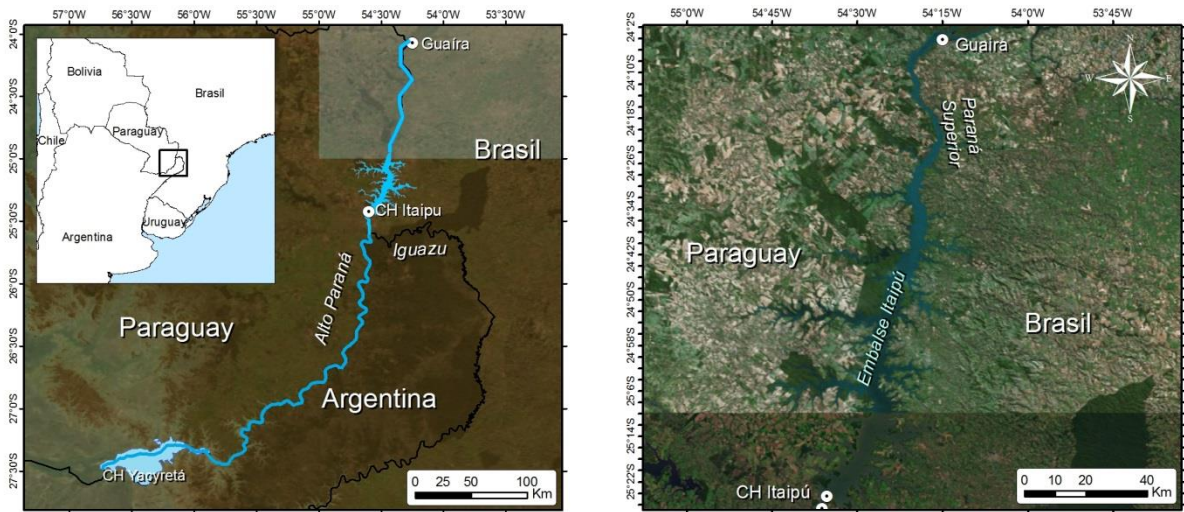


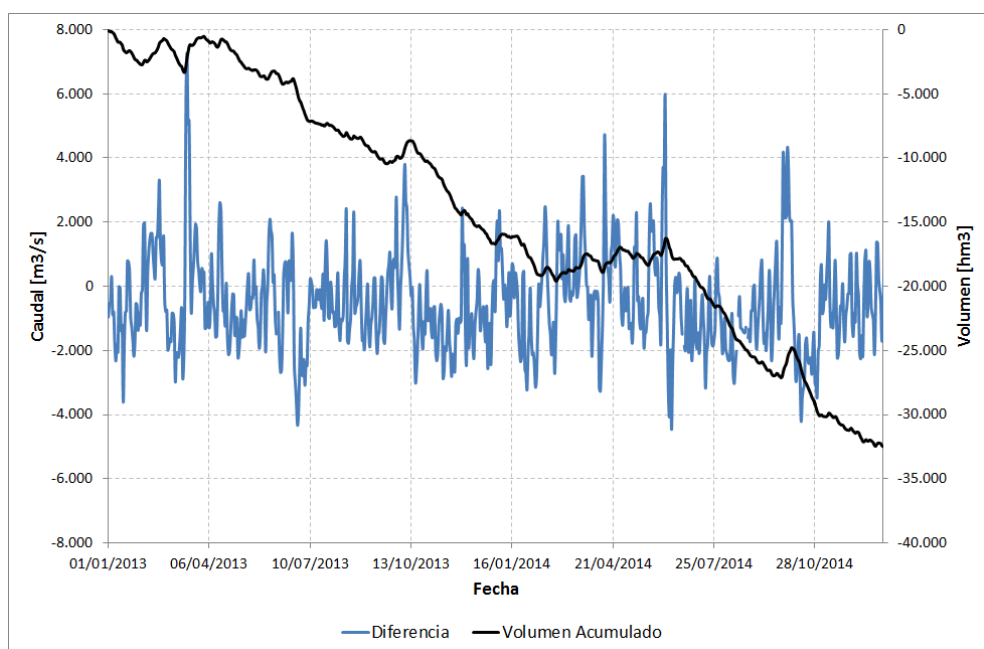
Figura 5.1. Ubicación de las estación Guaira e Itaipú.



Figura 5.2. Series temporales de datos para el análisis.

### 5.3 Análisis de datos

En primer lugar, se analizó la diferencia entre el caudal entrante al embalse (Guaira) y saliente por la presa (Itaipú), la cual se muestra en la Figura 5.3. Se observa que esta oscila alrededor del cero. Sin embargo, hay una tendencia negativa, tal como surge de la diferencia acumulada de volumen que también se muestra en la figura, lo cual indica que existe un aporte lateral, el cual resulta de aproximadamente el 5% del caudal ingresado, valor relativamente pequeño pero no despreciable. Cabe destacar que este ejercicio se repitió aplicando atrasos de uno y dos días al caudales entrante respecto del saliente, sin observarse mayores cambios.

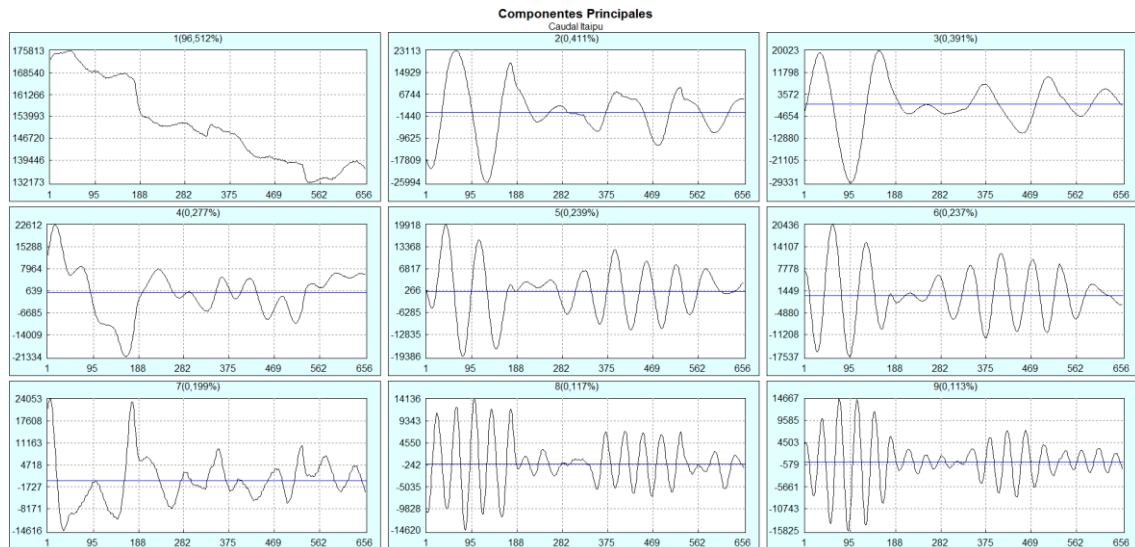


**Figura 5.3.** Diferencia entre los caudales entrante y saliente al embalse (azul) y diferencia de volumen acumulada (negro).

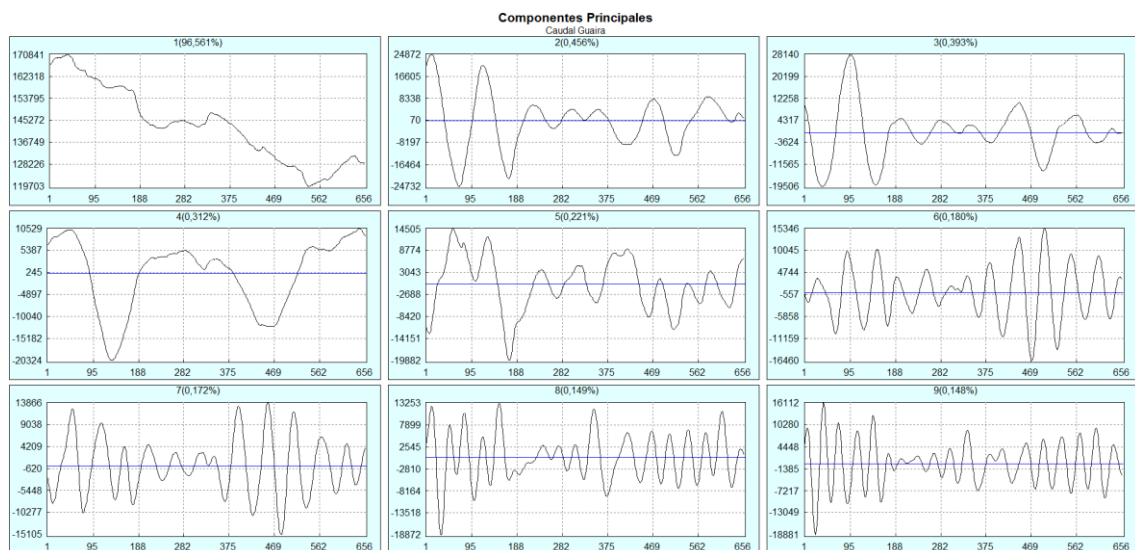
A continuación se procedió a efectuar un análisis espectral singular (SSA por sus siglas en inglés, *Singular Spectral Analysis*) de cada una de las dos series de datos (Elsner & Tsonis 1996). Mediante SSA es posible extraer en forma eficiente información de series de tiempo relativamente cortas y ruidosas, aumentando la relación señal/ruido, al separarla en componentes principales aditivas, estadísticamente independientes, a saber: tendencias (componentes de baja frecuencia), oscilaciones (no necesariamente armónicas, y que pueden estar moduladas en amplitud y fase), y “ruido”. Esta técnica se ha aplicado con éxito en ríos de la Cuenca del Plata (Jaime & Menéndez 2002, Maciel et al. 2010, García & Mechoso 2005).

Se utilizó el software Caterpillar SSA<sup>2</sup>.

En la Figura 5.4 se presentan las 9 primeras componentes principales de ambas series, donde se observa el aumento de la frecuencia de oscilación al avanzar siguiendo el orden de las componentes.



a) Itaipú

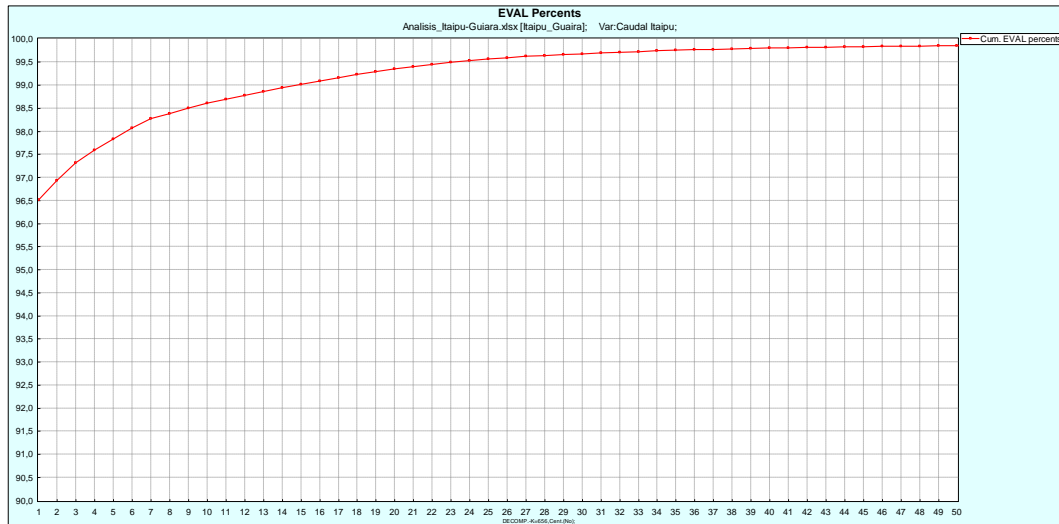


b) Guaira

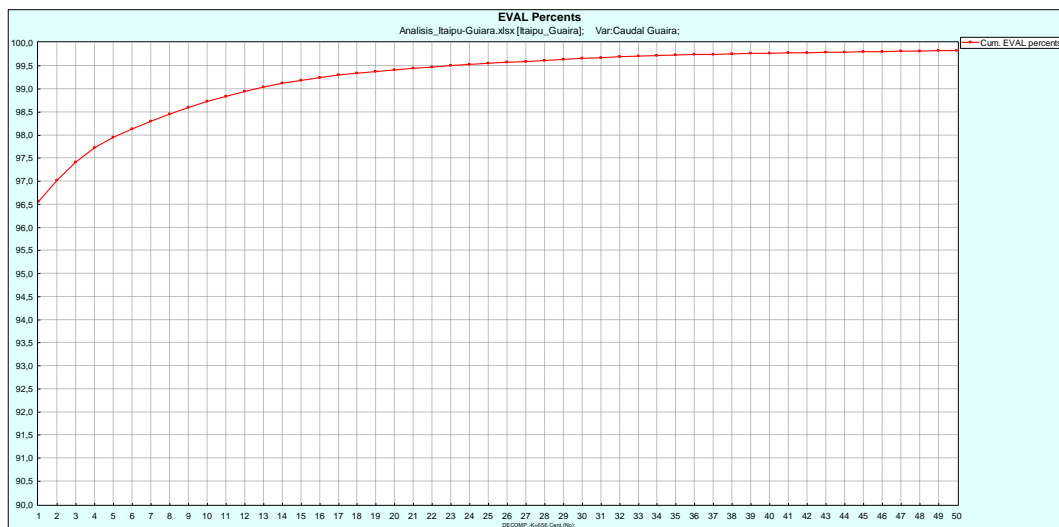
**Figura 5.4.** Primeras 9 componentes principales para las series de caudales de Itaipú y Guaira.

<sup>2</sup> [www.gistatgroup.com/cat/](http://www.gistatgroup.com/cat/)

En la Figura 5.4 se indica que la primera componente (tendencia de la serie) explica en ambos casos alrededor del 96,5% de la varianza, mientras que el resto sólo explica menos del 0,5% cada una. Esto se aprecia mejor en la Figura 5.5, donde se muestra el gráfico de la varianza acumulada para ambas series (notar que la ordenada arranca en 90%).



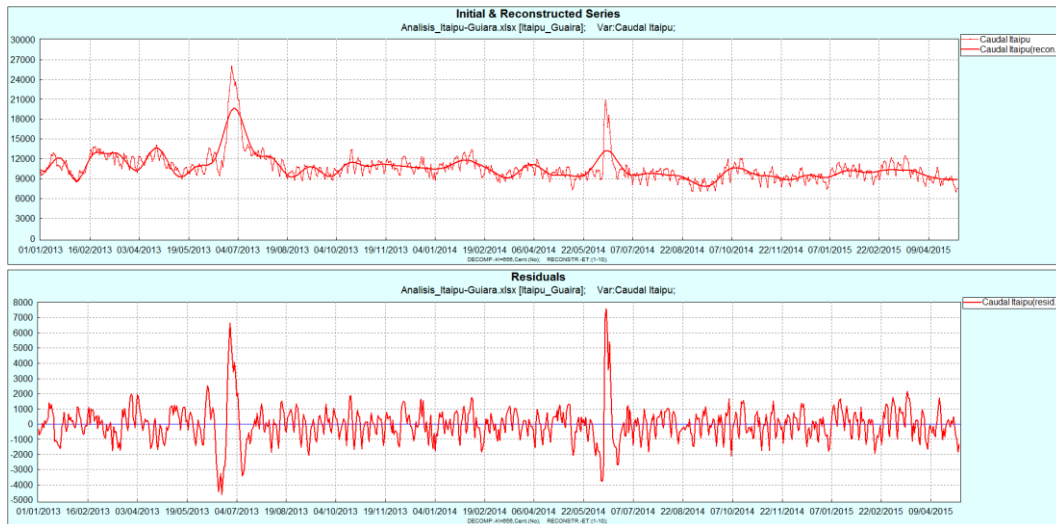
**a) Itaipú**



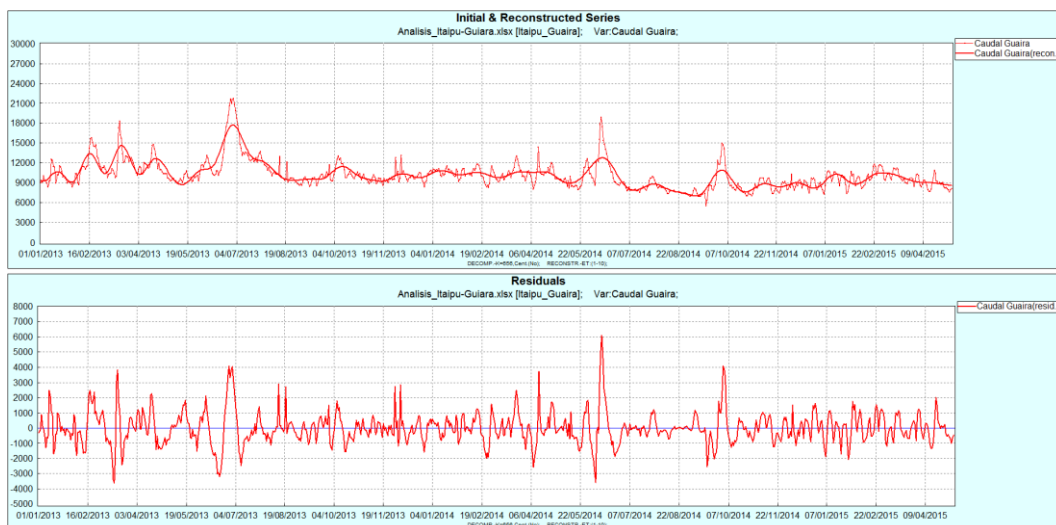
**b) Guaira**

**Figura 5.5.** Varianza explicada por las primeras 50 componentes principales en Itaipú y Guaira.

La Figura 5.6 muestra la reconstrucción de las series utilizando las primeras 9 componentes, y los residuos obtenidos de la resta entre la serie original y la serie reconstruida. Se observa que las series reconstruidas capturan la modulación mensual del caudal, pero filtra la de escala diaria.



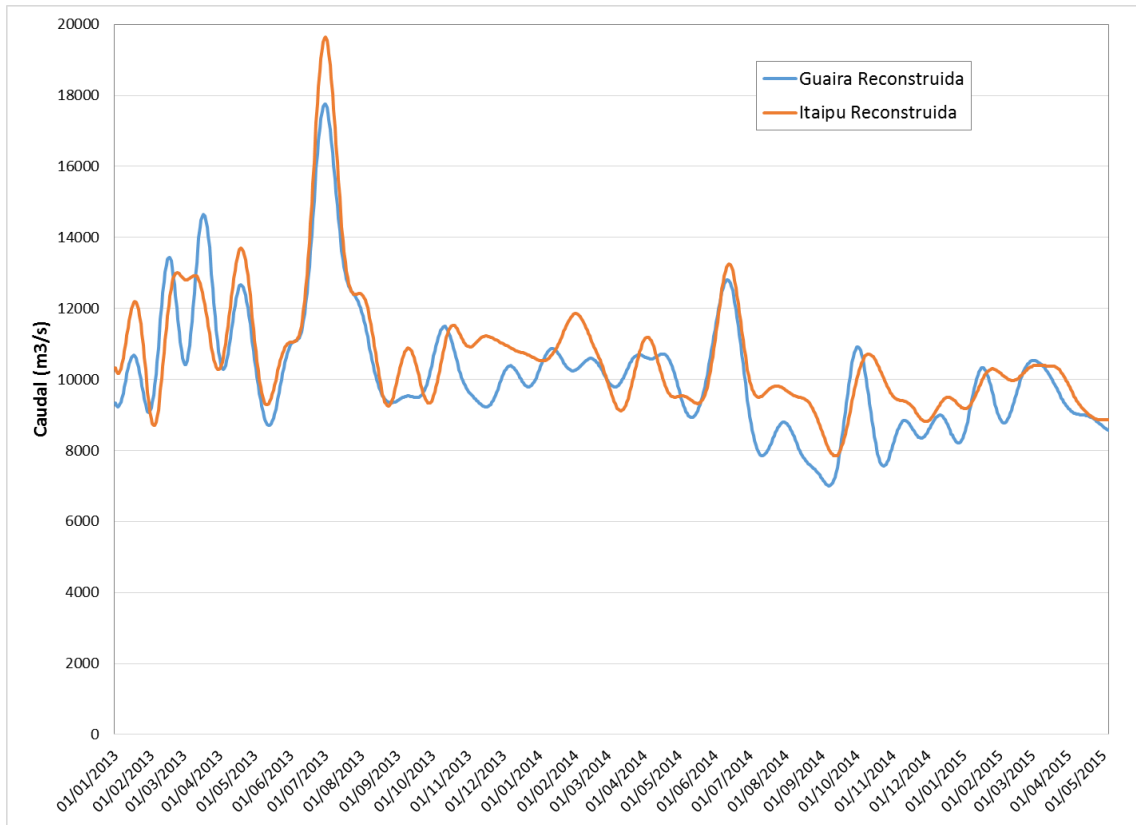
a) Itaipú



b) Guaira

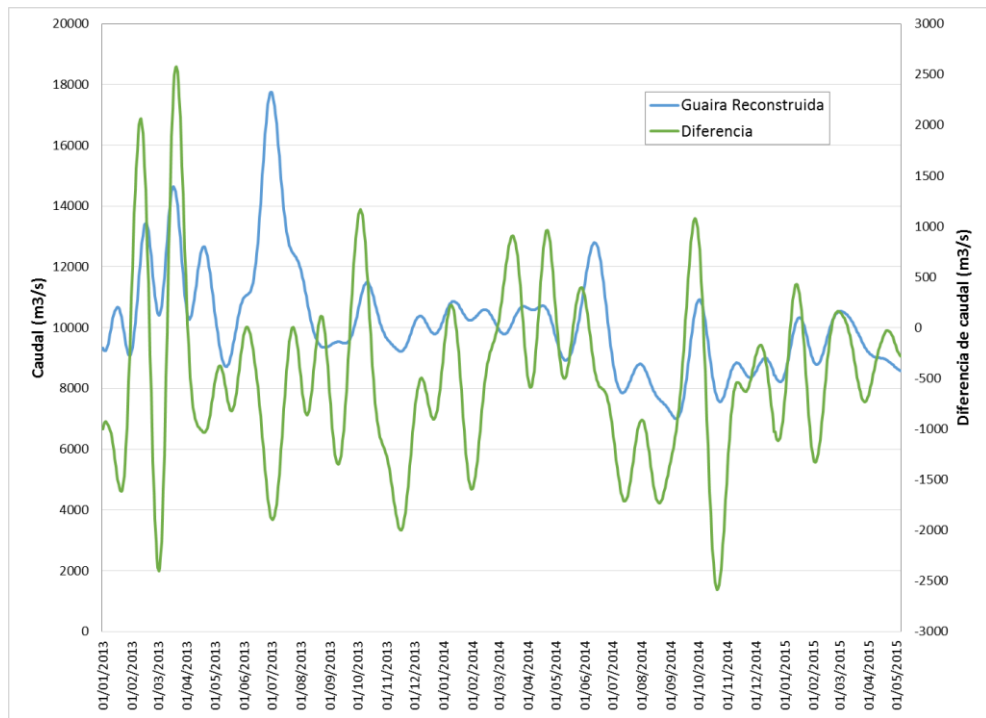
**Figura 5.6.** Reconstrucción de la serie original con las primeras 9 componentes y residuos para las series de Itaipú y Guaira.

La Figura 5.7 compara las series de caudal reconstruidas en Guaira e Itaipú. Se observa claramente la regulación que impone la operación de la presa, suavizando las oscilaciones.



**Figura 5.7.** Series reconstruidas de los caudales en Guaira e Itaipú.

En la Figura 5.8 se muestra la diferencia entre los caudales reconstruidos entrante (Guairá) y saliente (Itaipú) del embalse, junto con los caudales entrantes como referencia. Valores negativos de esa diferencia significan descargas (turbinado y eventualmente vertido) más altas que ingresos (es decir, tendencia al vaciado del embalse), y viceversa. No se distingue estacionalidad en la diferencia de caudales, aunque (con alta incertidumbre debido a la corta extensión temporal de la serie) se puede observar que las tendencias más fuertes de vaciado (valores pico negativos de la diferencia) se darían en febrero/marzo, julio/agosto y octubre/noviembre. Por otro lado, tampoco se distingue una correlación significativa entre ambas señales. Sólo podría apuntarse que la tendencia de vaciado que se observa en julio de 2013 tiene que estar relacionada, al menos parcialmente, con la gran crecida que tuvo lugar en ese momento.



**Figura 5.8.** Serie de diferencia de caudales reconstruidos entrante y saliente.

## 6 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta etapa del estudio:

- Se incorporaron nuevos ítems de información para la calibración y verificación del modelo. De los registros de la estación Puerto Macuco (sobre el río Iguazú), que ha padecido de un funcionamiento defectuoso y tenía asignado un valor erróneo del cero de escala, se rescataron dos ventanas de tiempo. A partir del relevamiento batimétrico realizado en el río Iguazú, se dispuso de dos datos instantáneos del nivel de agua en la progresiva de la estación Puerto Macuco. De un estudio previo desarrollado para la COMIP se contó con curvas sintéticas altura-caudal en estaciones hidrométricas del río Paraná.
- Se incorporó el tramo faltante del río Iguazú hasta el pie de las Cataratas, mediante un 'brazo corto' hasta el salto San Martín y un 'brazo largo' hasta la Garganta del Diablo.
- Se procedió a la calibración definitiva del modelo *MOAGAB-3*. Se tomó la estación Puerto Iguazú, en lugar de R11, para calibrar el tramo del río Paraná entre El Dorado y el Punto Trifinio. Se utilizaron los datos puntuales de nivel de agua registrados en Puerto Macuco para calibrar el río Iguazú. Los grados de acuerdo alcanzados entre las series de nivel simuladas y observadas en las estaciones de calibración fueron muy satisfactorios para ambos escenarios. Para el escenario actual se observó una reducción significativa de la rugosidad de cauce en la mayoría de los tramos respecto del escenario previo al llenado.
- A título de verificación, el grado de acuerdo entre niveles observados y modelados en la estación R11 fue excelente para ambos escenarios, aunque aparecieron algunas discrepancias durante el año 2011 que parecen deberse a deficiencias en los valores observados.
- También como verificación, la comparación entre niveles registrados y modelados en la estación Puerto Macuco fue muy bueno para la primera ventana de tiempo. Durante la segunda ventana de tiempo la comparación fue buena en términos generales, aunque se observaron varios períodos durante los cuales los datos registrados permanecieron constantes, lo que se asocia a los problemas de malfuncionamiento del aparato.

- Como tercera forma de verificación, se compararon los aforos efectuados entre 2008 y 2015 en la estación Libertador San Martín con los pares de puntos altura-caudal que surgieron de las simulaciones para las etapas previa y posterior al llenado de Yacyretá. Se observó un acuerdo muy satisfactorio entre aforos efectuados en el período 2008-2009 y resultados del modelo para la etapa previa al llenado de Yacyretá (a pesar de que ya existía el embalse de Yacyretá durante los aforos, este aún se encontraba en una cota reducida, con lo cual prácticamente no afectaba la relación altura-caudal en Libertador General San Martín).
- También se observó un muy buen acuerdo entre aforos efectuados en el año 2011 y resultados del modelo para la etapa a cota definitiva. Se notó que desde 2012 tienden a aparecer algunos caudales aforados sistemáticamente mayores que los indicados por el modelo, los cuales no son compatibles con los caudales informados por Itaipú para esas fechas, considerándose entonces que existe alguna anomalía en esos aforos.
- Se obtuvieron curvas altura-caudal en la estación R11 a partir de ajustes a los resultados del modelo para las etapas previa y posterior al llenado. Se observó una leve tendencia hacia caudales ligeramente más altos para igual nivel en el período actual respecto del previo al llenado de Yacyretá (debido al efecto de suavización), con diferencias del orden de los 500 m<sup>3</sup>/s.
- Se efectuaron comparaciones con las curvas sintéticas altura-caudal en estaciones hidrométricas del río Paraná. Salvo para la estación Corpus, se observó un nivel de acuerdo satisfactorio con los resultados del modelo para la etapa previa al llenado de Yacyretá, que tiende a degradarse para altos y bajos caudales.
- La construcción de la presa de Yacyretá y su llenado a cota definitiva de 83 mIGN en Posadas produjo un cambio significativo en la hidrodinámica de la zona estudiada. Durante el 90% del tiempo la sobreelevación del escenario a cota definitiva respecto del escenario previo al llenado supera 3,8 m en Santa Ana, 2,0 m en Corpus, 0,6 m en San Martín y 0,4 m en El Dorado. Aguas arriba de ese punto el efecto comienza a neutralizarse, dado que el remanso de Yacyretá deja de tener efecto salvo para caudales muy bajos, y además comienza a pesar el suavizado del tramo alto. De hecho, los niveles simulados en R11 resultan la mayor parte del tiempo menores en el escenario con el embalse a cota definitiva que en el escenario previo al llenado.
- La modelación ha indicado que se produce una suavización efectiva del cauce al pasar de la etapa previa al llenado de Yacyretá a la del embalse a cota definitiva. Para el tramo entre las estaciones Ita Cuá y San Martín el cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa (mayores tirantes y menores velocidades) produce la suavización efectiva del cauce a través de la disminución de la altura de las formas de fondo. No se distinguió cambio de rugosidad en el tramo San Martín-El Dorado. La suavización del tramo El Dorado-Itaipú también se supone asociada a la disminución de las alturas de las formas de fondo, pero esto debería estar asociado a la operación de la presa de Itaipú, que impone un régimen diario en el que predominan durante la mayor parte del tiempo velocidades de corriente menores a las del antiguo régimen natural.

- La potencial construcción de la presa de Corpus produciría un cambio significativo en las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio. En particular, afectaría los niveles de agua en tres zonas críticas: el pie de las Cataratas del Iguazú, el pie de la presa de Itaipú, y el Punto Trifinio.
- En esta fase del estudio la presa de Corpus se implementó como una condición de borde interna de nivel constante (no se tuvieron en cuenta ni las variaciones intradiarias producidas por su empuntamiento, ni posibles políticas de laminación de crecidas). Además, no se consideraron las disminuciones de rugosidad del cauce que podrían producirse por la modificación de las formas de fondo al construirse la represa e incrementarse los tirantes. Se espera que este efecto disminuya ligeramente el impacto hidrodinámico calculado de Corpus.
- El modelo indicó que Corpus a cota 105 mIGN impondría en Cataratas sobrelevaciones de algo más de 3 m el 90% del tiempo, y de más de 5 m el 50% del tiempo; estas sobrelevaciones bajarían a algo más de 0,50 m y a 1,0 m, respectivamente, si la cota fuera de 95 mIGN. Respecto del pie de la presa de Itaipú, con la cota 105 mIGN de Corpus tendría sobrelevaciones de algo más de 4 m y 6 m, respectivamente, mientras que estas se reducirían a algo más de 1 m y a 1,6 m si la cota fuera 95 mIGN. En el caso de la estación R11, las sobrelevaciones serían de más de 5 m y 8 m a cota 105 mIGN, y de 1,6 m y 2,4 m a cota 95 mIGN.
- La sobrelevación en el río Paraná, respecto del escenario sin Corpus, disminuiría a medida que el caudal aumenta, y también cuando la cota de embalse de Corpus se redujera.
- Para caudales bajos del Iguazú la superficie libre de este río se encuentra muy nivelada, excepto en el escenario sin Corpus a partir de la estación Puerto Macuco, donde tiende a empinarse a medida que se acerca a las Cataratas. Para los caudales más altos se observaron pendientes más pronunciadas en todo el tramo, que aumentan para menores cotas de Corpus y a menor distancia de las Cataratas.
- La diferencia entre el caudal entrante al embalse de Itaipú y el saliente por la presa oscila alrededor del cero. Sin embargo, hay una tendencia negativa, lo cual indica que existe un aporte lateral, el cual resulta de aproximadamente el 5% del caudal ingresado, valor relativamente pequeño pero no despreciable.
- Comparando las series de caudal reconstruidas utilizando las primeras 9 componentes principales en las estaciones Guaira (ingreso) e Itaipú (egreso), se observó claramente la suavización de las oscilaciones que impone la operación de la presa.
- No se distinguió estacionalidad en la diferencia entre los caudales reconstruidos entrante (Guairá) y saliente (Itaipú) del embalse. Las tendencias más fuertes de vaciado (valores pico negativos de la diferencia, asociados a fuertes descargas por turbinado y eventualmente vertido) se darían en febrero/marzo, julio/agosto y octubre/noviembre. No se distinguió una correlación significativa entre la diferencia y el caudal entrante. La tendencia de vaciado que se observa en julio de 2013 tiene que estar relacionada, al menos parcialmente, con la gran crecida que tuvo lugar en ese momento.

## REFERENCIAS

- Almirón, 2009. Funcionamiento hidráulico del tramo Iguazú Posadas del río Paraná. Informe Final.
- Elsner, J. B. and Tsonis, A. A, 1996. Singular Spectral Analysis. A New Tool in Time Series Analysis. Springer US. DOI 10.1007/978-1-4757-2514-8
- García, N. O., Mechoso, C. R. 2005. Variability in the discharge of South American rivers and in climate / Variabilité des débits de rivières d'Amérique du Sud et du climat, Hydrological Sciences Journal, 50:3, -478, DOI: 10.1623/hysj.50.3.459.65030
- Itaipú Binacional, 2011. Informe de levantamiento batimétrico del río Iguazú. Cataratas del Iguazú y la desembocadura del río Iguazú, Dirección Técnica, Superintendencia de Operación, División de Estudios Hidrológicos y Energéticos.
- Jaime, P., Menéndez, A.N., 2002. Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA-LHA 05-216-02, Comitente: Proyecto Freplata.
- Maciel, F., Diaz, A., Terra, R. 2010. Variabilidad multi-anual de caudales en ríos de la Cuenca del Plata. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre, 2010.
- Pinto Martins, D., 2004. Dinamic das formas de leito e transporte de carga de fundo no Alto rio Paraná, Universidad Estadual de Maringá.
- Sandbach, S. D. et al., 2012. Application of a roughness-length representation to parameterize energy loss in 3-D numerical simulations of large rivers, Water Resour. Res., 48, W12501, doi:10.1029/2011WR011284.
- UNLP (Universidad Nacional de la Plata), 2012. Estudio de Pre-Factibilidad de Generación Hidroeléctrica en el Río Paraná.
- Van Rijn L. C., 1984, Sediment Transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness, Journal of Hydraulic Engineering, 110-12, pp 1733-1754.