



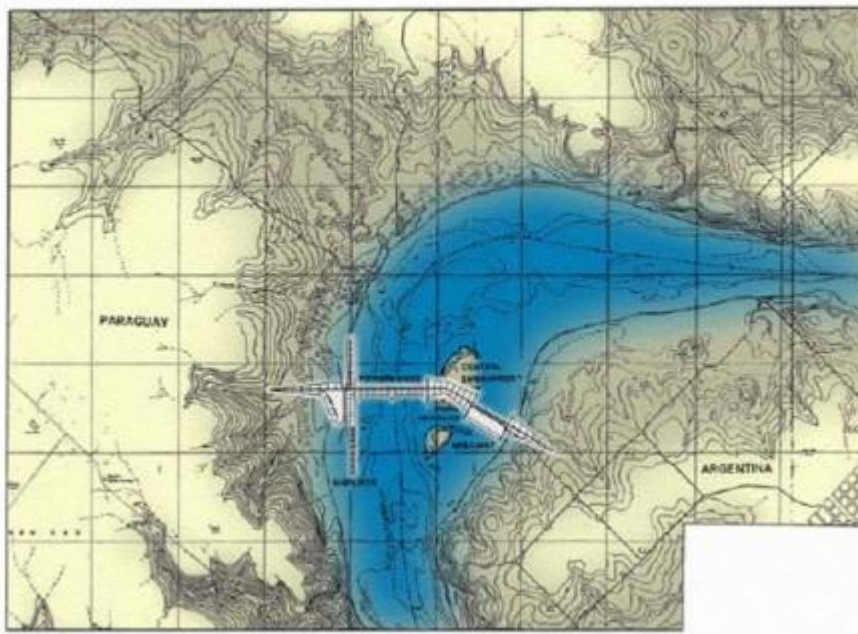
INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



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

Cuarto Informe Parcial

Emplazamiento Pindo – í.



*Proyecto LHA 357
Informe LHA 04-357-15
Ezeiza, Julio 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

Cuarto Informe Parcial

RESUMEN

Se presentan fe de erratas de cero de escala y tabla de caudales informados anteriormente. Se analizan los efectos de la presencia de la presa de Corpus incorporando el efecto de suavizado del cauce que impondrían las nuevas condiciones hidrodinámicas por el embalse de las aguas. Se describe la extensión del modelo hasta el cierre de Yacyretá.

Descriptores temáticos: Modelación numérica, modelación hidrodinámica, régimen hidrológico, modelo digital de elevación

Descriptores geográficos: Río Paraná, Río Iguazú, Embalse de Yacyretá, Argentina, Paraguay, Brasil

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	CORRECCIONES	6
2.1	Ceros de escala	6
2.2	Tabla de caudales	6
3	EFFECTOS DE LA PRESA DE CORPUS	9
3.1	Suavización del fondo	9
3.2	Condiciones hidrológicas normales	13
3.2.1	Río Paraná	13
3.2.2	Río Iguazú	20
3.3	Sensibilidad a la rugosidad de las márgenes	27
3.4	Crecidas extremas	28
3.4.1	Río Paraná	28
3.4.2	Río Iguazú	37
3.5	Síntesis de sobrelevaciones	46
3.6	Mapas de inundación	48
4	MODELO EXTENDIDO	51

4.1 Implementación	51
4.2 Calibración	54
5 CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	59

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 incluye las siguientes actividades:

- A. Análisis de datos topobatimétricos, 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 topobatimétrica 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 el Tercer Informe Parcial se efectuó la calibración definitiva del modelo hidrodinámico, se caracterizó el escenario actual, se analizó la influencia producida por la presencia del embalse de Yacyretá, se ensayaron escenarios futuros con la presa de Corpus construida y se efectuó un análisis de la operación de la presa de Itaipú.

En este Cuarto Informe Parcial se lleva a cabo el análisis completo de los efectos de la presa de Corpus. La organización del informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se presentan correcciones de información presentada en informes previos.
- En el capítulo 3 se desarrolla un análisis completo de la influencia de la presa de Corpus sobre el régimen hidrodinámico de los ríos Paraná e Iguazú, considerando el efecto de suavizado que impondrá el embalse.
- En el capítulo 4 se describe la extensión del modelo para incluir el embalse de Yacyretá.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones de esta fase del estudio.

2 CORRECCIONES

2.1 Ceros de escala

En el Tercer Informe Parcial (Tabla 2.1) se presentó el listado actualizado de la información hidrométrica disponible. En esa oportunidad se informó erróneamente el cero de la escala de Puerto Iguazú. La Tabla 2.1 repite la información, pero ahora incluye el valor correcto de ese cero.

Además, en el Tercer Informe Parcial se explicó que el cero originalmente provisto para la estación Puerto Macuco era erróneo, y que en consecuencia ese valor fue estimado a través de los resultados del modelo, resultando en +96,84 mIGN. La COMIP llevó a cabo una nivelación, obteniéndose el valor +96,78 mIGN, que resulta totalmente consistente con el asumido (este valor también se incluye en la Tabla 2.1).

2.2 Tabla de caudales

En el Primer Informe Parcial (Tabla 2.8) se presentó el listado de caudales para distintos períodos de retorno correspondientes a distintas estaciones hidrométricas: Capanema (CAP) y Andresito (AND) sobre el río Iguazú, e Itaipú (ITA) y R11 sobre el río Paraná. En esa oportunidad se informaron erróneamente los valores asociados a Itaipú. La Tabla 2.2 repite la información con los valores correctos correspondientes a esa estación.

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	96,78	NO	SI	NO
7	Iguazú	Pto. Iguazú	SSRH – Argentina	25° 35' 36" S	54° 34' 47" W	88,13	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

Tabla 2.2. Caudales para distintos períodos de retorno (en m³/s).

Recurrencia (años)	Iguazú		Paraná	
	CAP	AND	ITA	R11
2	9.804	9.535	20.032	24.583
5	13.544	13.685	23.982	30.879
10	16.020	16.432	26.598	35.048
20	18.395	19.068	29.106	39.046
50	21.469	22.479	32.354	44.222
100	23.773	25.035	34.787	48.100

3 EFECTOS DE LA PRESA DE CORPUS

3.1 Suavización del fondo

En el Tercer Informe Parcial se evaluó la sobreelevación que produciría la eventual construcción de la presa de Corpus, pero manteniendo la rugosidad de fondo en todo el Paraná superior calibrada a partir de datos observados pos-Yacyretá.

Ahora bien, en el mismo Informe se analizó el efecto de suavizado observado aguas arriba de la presa de Yacyretá tras su construcción, y se mostró que este puede ser explicado con relativa precisión a partir de las ecuaciones de van Rijn (1984) para las formas de fondo. A continuación se aplica este tratamiento para prever el suavizado que podría esperarse por la construcción de Corpus, y se reevalúan los efectos de la presa de Corpus bajo esta hipótesis.

El análisis de formas de fondo se llevó a cabo para cuatro estaciones ubicadas aguas arriba de la presa de Corpus: San Martín, El Dorado, R11 y Puente de la Amistad. La rugosidad de las formas de fondo se estimó para la situación anterior y posterior a Corpus, considerada ésta a distintas cotas de embalse. A continuación se detalla el procedimiento empleado:

1. Para cada condición de Corpus (sin Corpus y con Corpus a cota de embalse fija en 95, 100 y 105 mIGN) se realizó una simulación sobre el período 1983-2015, utilizando la rugosidad de fondo y márgenes calibradas para el período 2011-2015.
2. Para cada estación y en cada condición se calculó el valor medio del nivel y de la velocidad.
3. A partir del valor medio de los niveles se calculó, en cada caso, el tirante medio.
4. Asumiendo un tamaño de grano medio d_{50} de 0,35mm y una densidad de grano ρ_s de 2650 kg/m³ se calculó el diámetro adimensional de grano D_* y la tensión crítica θ_{cr} . El diámetro adimensional arrojó en todos los casos un valor de 8,9.

$$s \equiv \rho_s / \rho$$

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

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

5. Estimando que d_{90} es el doble de d_{50} , y suponiendo por simplicidad que el radio hidráulico es del orden del tirante, se calcularon el coeficiente de Chezy C' y la velocidad de corte u'_* asociados a la rugosidad del grano. En esta etapa del cálculo se incorpora la velocidad media U , que es la mayor fuente de variación entre las distintas condiciones.

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

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

6. Con estos valores se computó el parámetro de estado T , que en todos los casos arrojó valores entre 0 y 3,1, indicando un régimen mayormente caracterizado por la existencia de minirizos.

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

7. Se calcularon las alturas y longitudes de dunas (h_d y λ_d , respectivamente) y de rizos (h_r y λ_r , respectivamente).

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

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

8. Se determinaron las alturas de rugosidad equivalente de grano k_g , dunas k_d y rizos k_r , así como la altura de rugosidad total.

$$k_g = 3d_{90}$$

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

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

$$k_s = k_g + k_r + k_d$$

9. A partir de la altura de rugosidad total se calculó el coeficiente de Chezy C y el coeficiente efectivo de Manning n .

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

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

10. Se compararon los resultados del método en cada estación antes y después del llenado de Corpus, y se calculó un coeficiente de suavización como la relación entre ambos.
11. En cada sección del modelo del río Paraná ubicada aguas arriba de Corpus se redujo el coeficiente de Manning de cauce calibrado para el período 2011-2015, multiplicándolo por el coeficiente de suavización. Dado que las formas de fondo no son responsables de la totalidad de las pérdidas de carga que ocurren en los tramos, y que además la metodología de van Rijn es solo aproximada, se adoptaron valores ligeramente conservadores del coeficiente de suavización para cada tramo, redondeando para arriba los valores calculados a un solo dígito significativo.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores calculados para cada sección de análisis en cada condición.

En función de los resultados obtenidos para las cuatro secciones analizadas se realizó la siguiente segmentación:

- Se definió como tramo *Inferior* al que va desde la sección de la presa hasta el punto medio entre las estaciones San Martín y El Dorado.
- Se definió como tramo *Medio* al que se extiende desde el final del tramo Medio hasta el punto medio entre las estaciones El Dorado y R11.
- Dado que los resultados de R11 y Puente de la Amistad resultaron muy similares, se consideraron ambas estaciones como representativas de un único tramo *Superior*, que se extiende desde el final del tramo Medio hasta el pie de Itaipú.

Tabla 3.1. Coeficiente de suavización para cada sección analizada.

Sección	Tirante medio (m)				Velocidad media (m/s)				Coeficiente de suavización (-)		
	Sin Presa	95 mIGN	100 mIGN	105 mIGN	Sin Presa	95 mIGN	100 mIGN	105 mIGN	95 mIGN	100 mIGN	105 mIGN
San Martín	56,08	64,36	69,08	73,93	0,98	0,67	0,53	0,42	0,83	0,68	0,58
El Dorado	38,65	44,63	48,78	53,29	1,61	1,18	0,98	0,83	0,92	0,87	0,81
R11	40,21	42,41	44,79	47,88	1,75	1,59	1,44	1,29	0,99	0,97	0,94
Pte. Amistad	42,26	44,23	46,37	49,25	1,68	1,53	1,38	1,23	0,98	0,96	0,93

En la Tabla 3.2 se presentan las progresivas de cada tramo, así como el coeficiente de suavización adoptado. Se observa que las suavizaciones aplicadas resultan significativas, alcanzando hasta el 40% para Corpus a 105 m. La suavización es más intensa para el tramo Inferior, y de manera aproximada puede afirmarse que se reduce a una tercera parte para el tramo Medio y a una décima parte en el tramo Superior. Nótese además que el efecto de suavización es más intenso cuanto mayor es la cota de embalse de Corpus.

Tabla 3.2. Reducción de Manning adoptada para cada tramo

Tramo	Progresivas (km)			Coeficiente de suavización		
	Inicial	Final	Long.	Corpus 95m	Corpus 100m	Corpus 105m
Tramo Inferior	1.657	1.773	116	0,85	0,70	0,60
Tramo Medio	1.773	1.865	92	0,95	0,90	0,85
Tramo Superior	1.865	1.925	60	0,99	0,98	0,95

3.2 Condiciones hidrológicas normales

Se definieron escenarios correspondientes a condiciones hidrológicas normales a caudal constante asociados a distintas permanencias, entendidas estas como el porcentaje de tiempo durante el cual ese caudal es superado. Para ello se efectuaron estadísticas de caudal para las estaciones R11, Itaipú y Salto Cataratas sobre el período 1983-2014. Para las dos últimas estaciones se utilizaron los registros, mientras que para R11 se emplearon los resultados que surgen de aplicar el modelo sin la presencia de la presa, de modo de generar bases de datos consistentes. En la Tabla 3.3 se muestran los caudales correspondientes a permanencias de 90%, 50% y 10%, que fueron las seleccionadas para establecer escenarios.

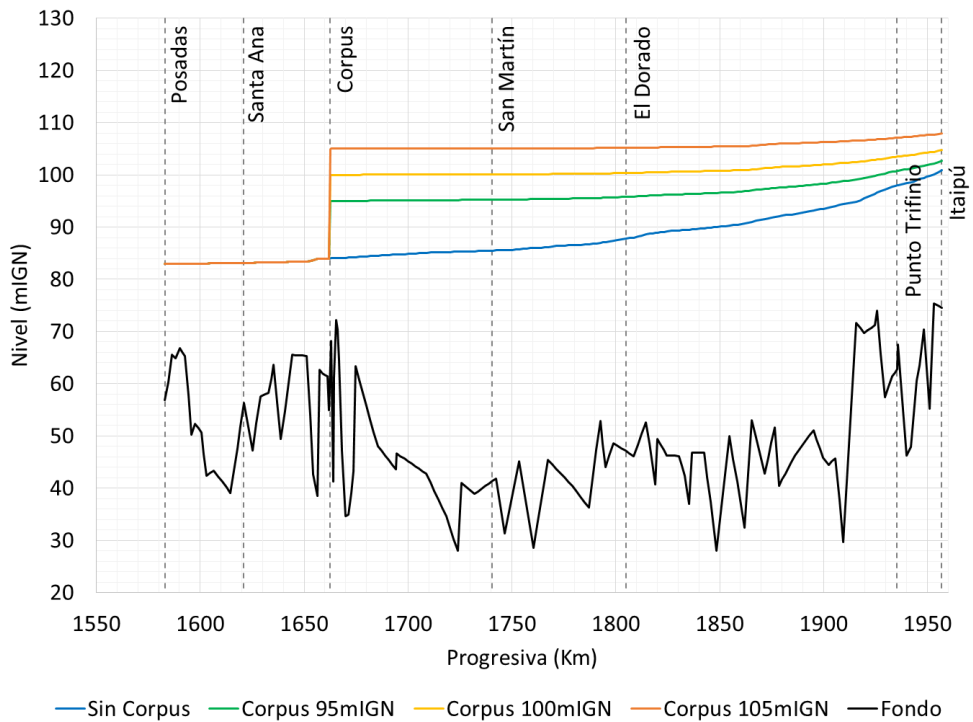
Para cada escenario de permanencia, en el borde de aguas arriba de la rama Paraná Superior del modelo se impuso el caudal correspondiente a la estación Itaipú. Por su parte, en el borde de aguas arriba de la rama Iguazú del modelo se utilizó la diferencia entre los caudales asociados a las estaciones Itaipú y R11 para esa permanencia, las cuales también se muestran en la Tabla 3.3. Nótese que, de esta manera, los caudales utilizados para el río Iguazú resultan diferentes a los correspondientes a su propia estadística de permanencia (algo más del doble), pero así se conforman escenarios consistentes.

Tabla 3.3. Caudales asociados a los escenarios de condiciones hidrológicas normales.

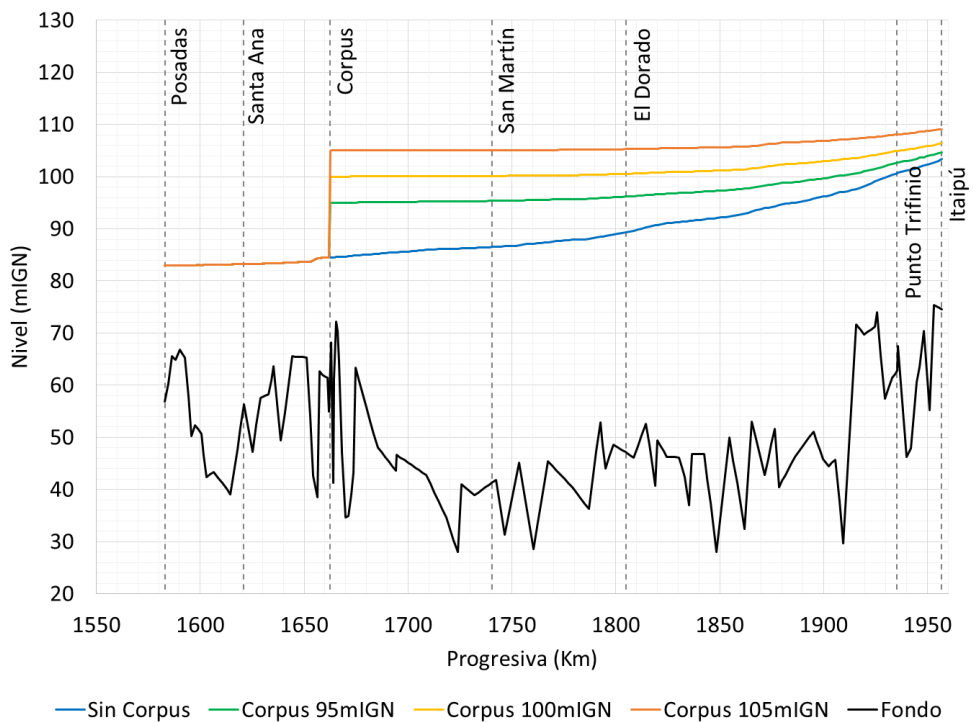
Permanencia	Caudal (m3/s)			
	R11	Itaipú	Cataratas	
			Estadística	Diferencia
90%	9.772	8.643	687	1.129
50%	12.070	10.547	892	1.524
10%	19.019	16.030	1.057	2.989

3.2.1 Río Paraná

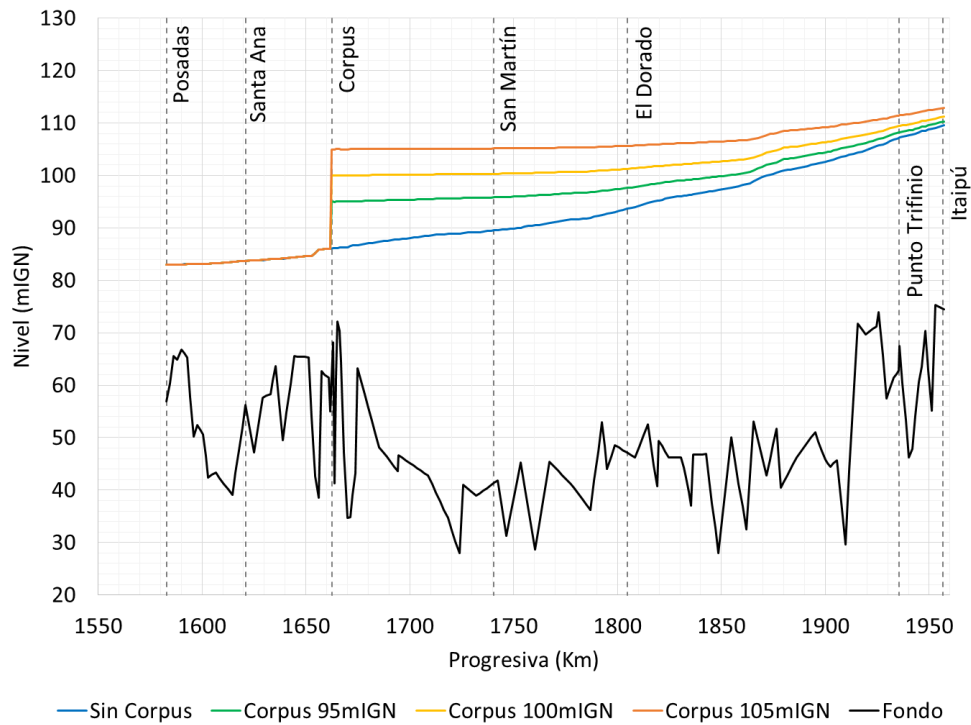
La Figura 3.1 muestra los perfiles longitudinales del río Paraná entre Posadas e Itaipú para los tres escenarios, incluyendo el efecto de suavizado. En la Tabla 3.4 se presentan los niveles correspondientes a distintas estaciones del río Paraná para esos escenarios, con y sin suavizado.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia



c) 10% de permanencia

Figura 3.1. Perfiles longitudinales del río Paraná para escenarios hidrológicos normales, con suavizado.

Tabla 3.4. Niveles en estaciones del río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus, sin y con suavizado.

Permanencia	Estación	Niveles (mIGN)						
		Sin Presa	Sin Suavizado			Con Suavizado		
			105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
90%	Corpus	84,0	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	85,6	105,1	100,2	95,4	105,0	100,1	95,3
	R11	97,7	107,5	103,8	100,9	107,1	103,4	100,6
	Pte. Amistad	99,0	107,8	104,4	101,7	107,4	104,0	101,4
	Itaipú	100,9	108,3	105,1	102,9	107,9	104,8	102,7
50%	Corpus	84,5	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	86,7	105,2	100,3	95,5	105,1	100,2	95,4
	R11	100,4	108,6	105,3	102,8	108,0	104,8	102,5
	Pte. Amistad	101,7	109,1	106,0	103,7	108,5	105,5	103,4
	Itaipú	103,4	109,6	106,9	105,0	109,1	106,4	104,7
10%	Corpus	86,1	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	89,7	105,5	100,8	96,3	105,2	100,4	95,9
	R11	106,9	112,3	110,0	108,4	111,3	109,2	107,9
	Pte. Amistad	108,2	113,1	111,0	109,5	112,1	110,2	109,1
	Itaipú	109,6	113,8	112,0	110,8	113,0	111,3	110,3

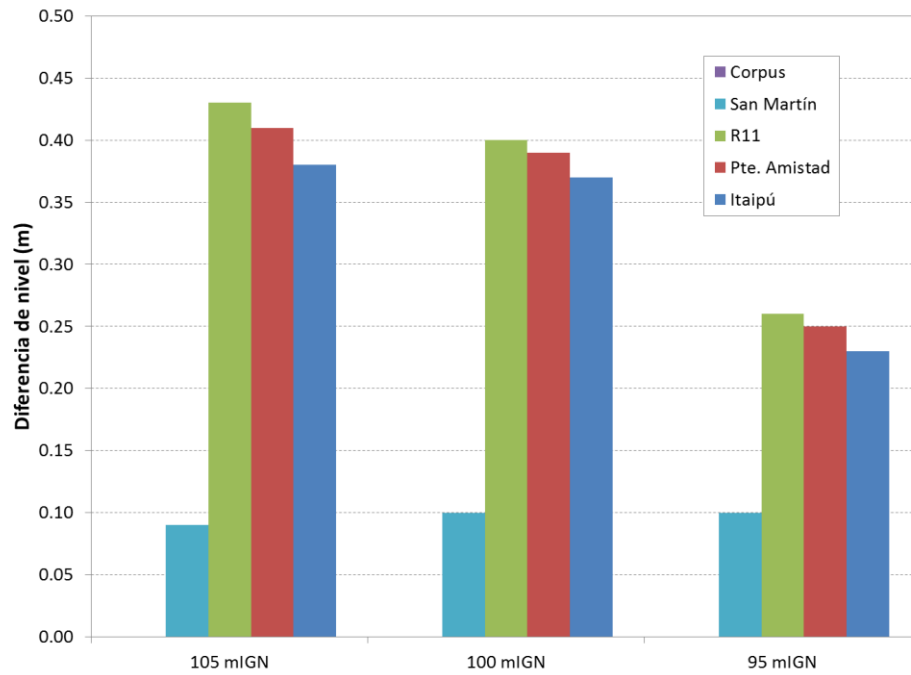
La Tabla 3.5 muestra la reducción del nivel de agua por efecto del suavizado, y las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) considerando el suavizado. Estas se grafican en las Figuras 3.2 y 3.3.

Tabla 3.5. Diferencias de nivel sin y con suavizado, y sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.

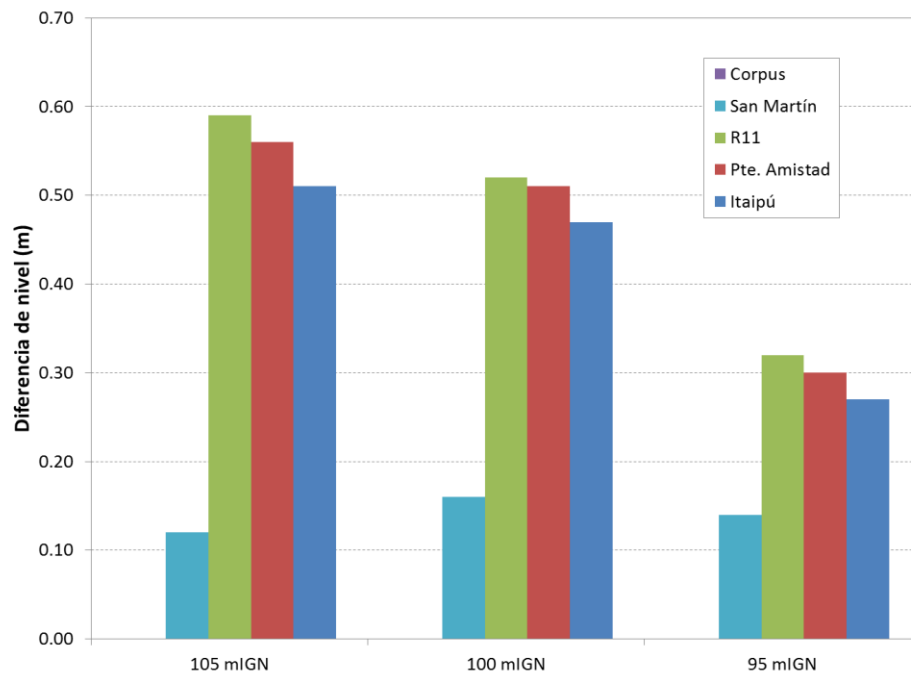
Permanencia	Estación	Diferencia sin/con suavizado (m)			Sobrelevaciones con suavizado (m)		
		105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
90%	Corpus	0,00	0,00	0,00	21,0	16,0	11,0
	San Martín	0,09	0,10	0,10	19,4	14,5	9,6
	R11	0,43	0,40	0,26	9,3	5,7	2,9
	Pte. Amistad	0,41	0,39	0,25	8,5	5,0	2,5
	Itaipú	0,38	0,37	0,23	7,1	3,9	1,8
50%	Corpus	0,00	0,00	0,00	20,5	15,5	10,5
	San Martín	0,12	0,16	0,14	18,4	13,5	8,7
	R11	0,59	0,52	0,32	7,6	4,4	2,1
	Pte. Amistad	0,56	0,51	0,30	6,8	3,8	1,8
	Itaipú	0,51	0,47	0,27	5,8	3,1	1,3
10%	Corpus	0,00	0,00	0,00	18,9	13,9	8,9
	San Martín	0,31	0,39	0,34	15,4	10,6	6,2
	R11	1,05	0,86	0,51	4,4	2,3	1,1
	Pte. Amistad	0,99	0,81	0,46	3,9	2,0	0,9
	Itaipú	0,89	0,74	0,42	3,3	1,6	0,7

Respecto de la reducción de nivel por efecto del suavizado (Figura 3.2) se observa que:

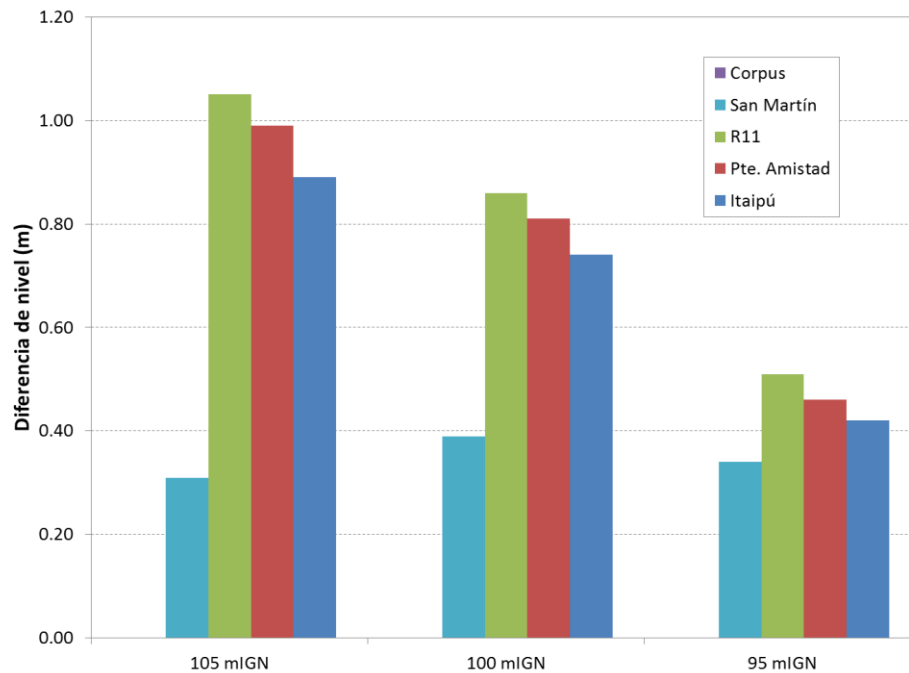
- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 0,4 m en Itaipú y de algo más de 0,4 m en el Punto Trifinio (R11); con Corpus a 95 mIGN es de algo más de 0,2 m en Itaipú y de alrededor de 0,25 m en el Punto Trifinio.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,5 m en Itaipú y de 0,6 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 0,3 m en Itaipú y de algo más de 0,3 m en el Punto Trifinio.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,9 m en Itaipú y de 1 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo más de 0,4 m en Itaipú y de alrededor de 0,5 m en el Punto Trifinio.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia

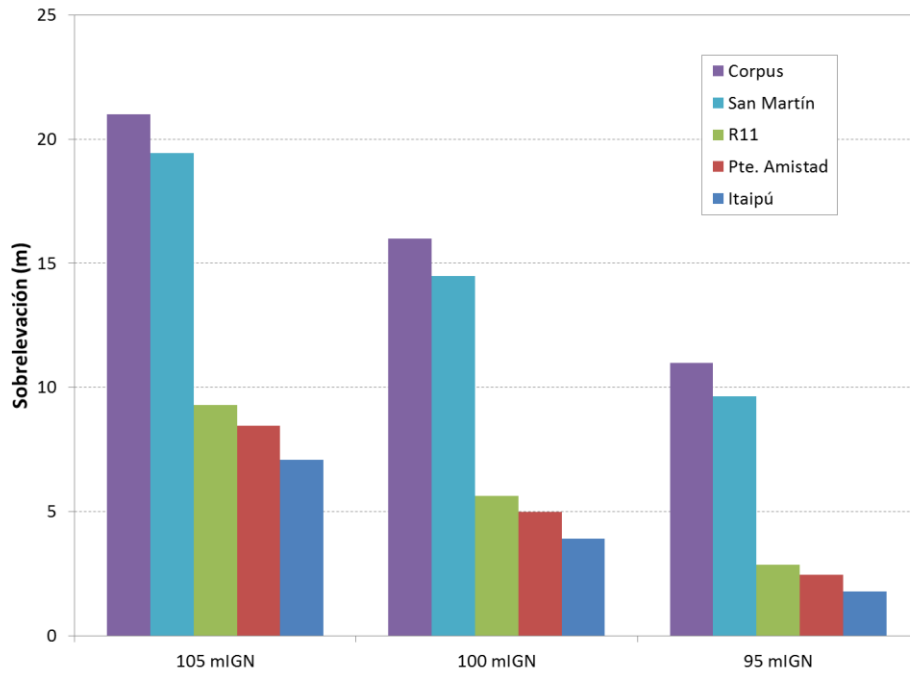


c) 10% de permanencia

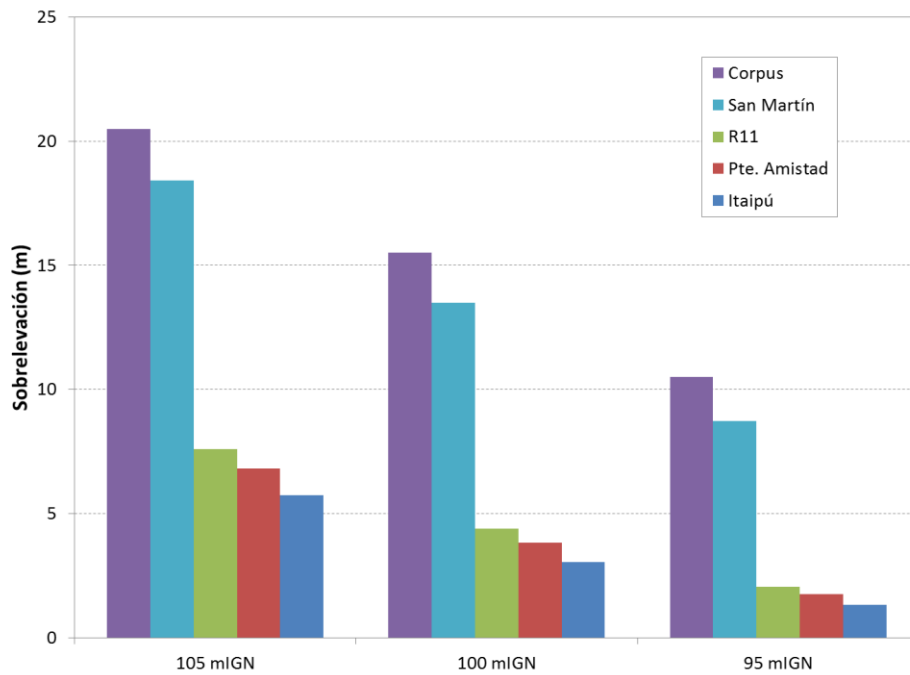
Figura 3.2. Diferencias de nivel sin y con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.

En relación a la sobrelevación (Figura 3.3) se observa que:

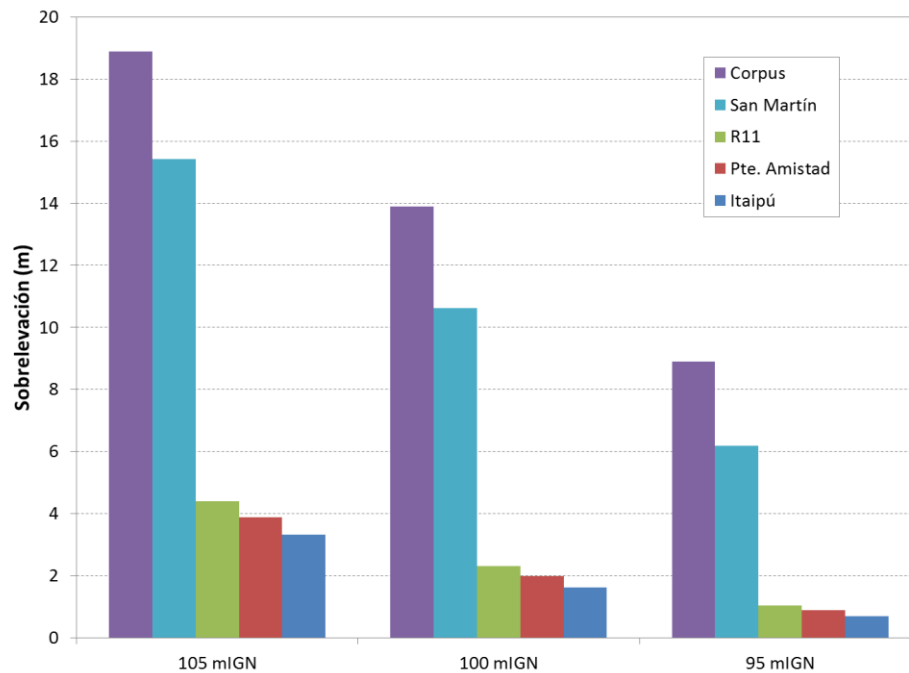
- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 7 m en Itaipú y de algo más de 9 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 2 m en Itaipú y de algo menos de 3 m en el Punto Trifinio.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 6 m en Itaipú y de alrededor de 7,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo más de 1 m en Itaipú y de alrededor de 2 m en el Punto Trifinio.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo más de 3 m en Itaipú y de alrededor de 4,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m en Itaipú y de algo más de 1 m en el Punto Trifinio.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia

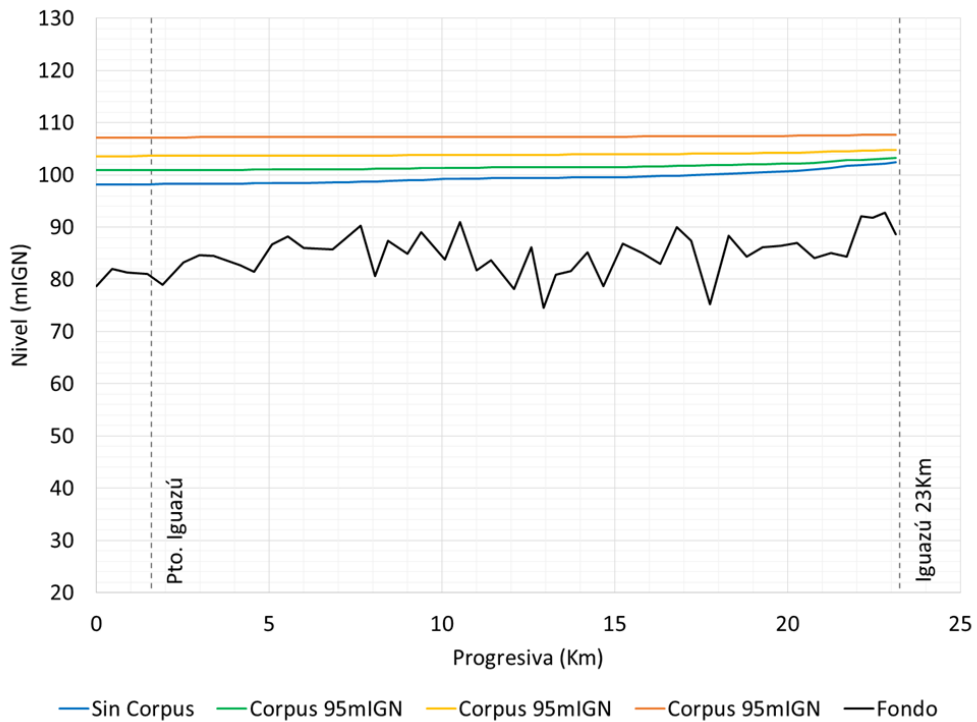


c) 10% de permanencia

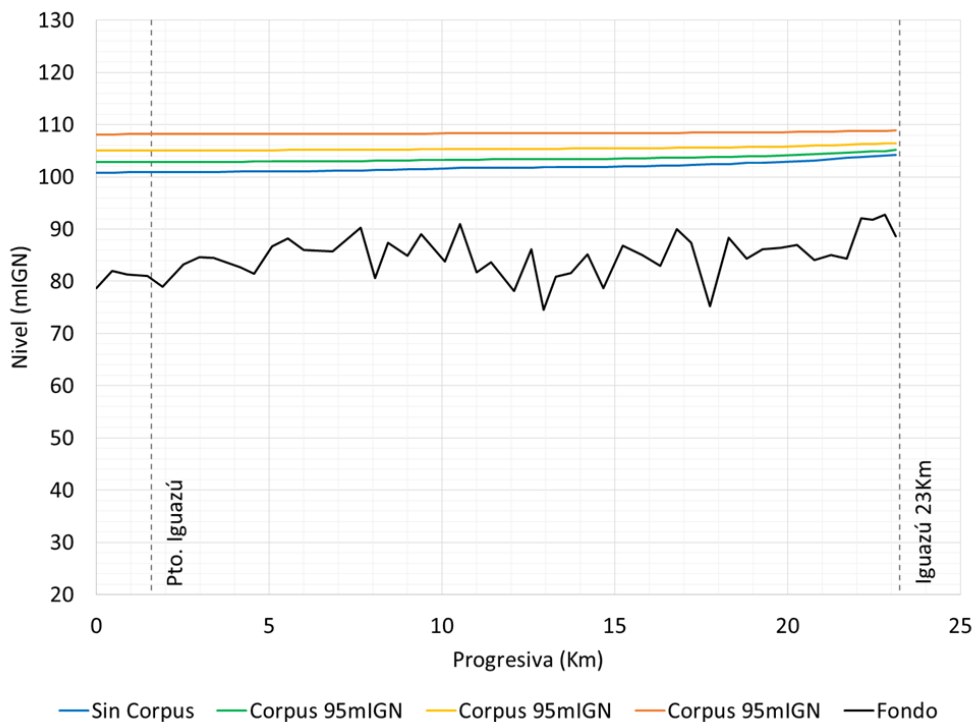
Figura 3.2. Sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.

3.2.2 Río Iguazú

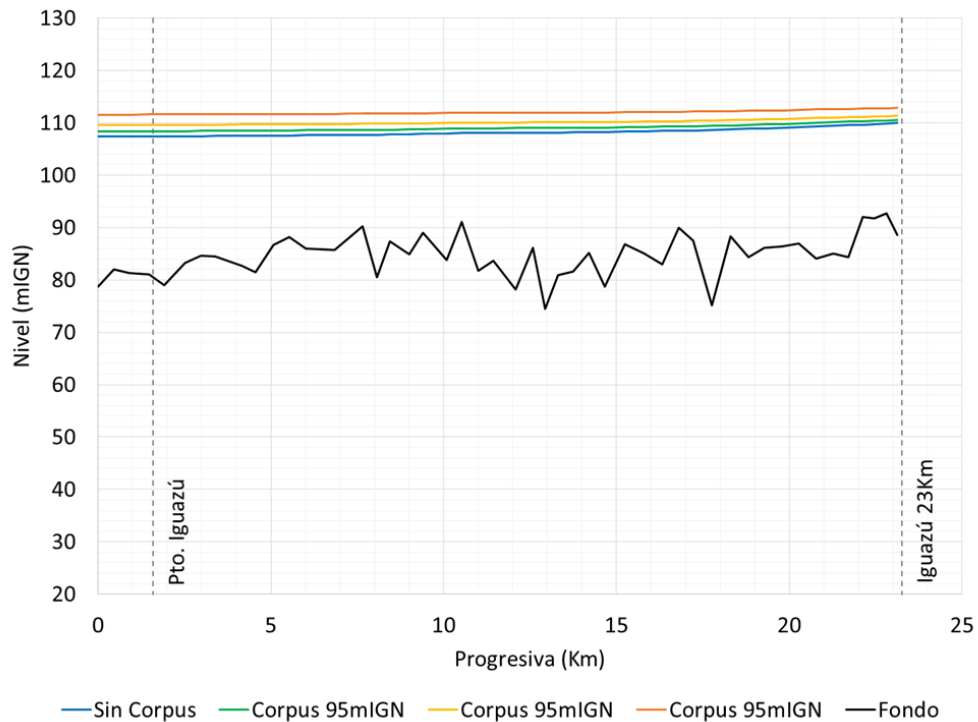
La Figura 3.4 presenta los perfiles longitudinales del río Iguazú entre el Punto Trifinio y las Cataratas para los tres escenarios, incluyendo el efecto de suavizado. En la Tabla 3.6 se presentan los niveles del río Iguazú para esos escenarios, con y sin suavizado, correspondientes a distintas estaciones de cálculo ubicadas: aguas abajo de la Garganta del Diablo, al pie del Salto San Martín, en la progresiva 23 km del río Iguazú, y en Puerto Iguazú.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia



c) 10% de permanencia

Figura 3.4. Perfiles longitudinales del río Iguazú para escenarios hidrológicos normales, con suavizado.

Tabla 3.6. Niveles en estaciones del río Iguazú para escenarios de distinta permanencia y cotas de Corpus, sin y con suavizado.

Permanencia	Estación	Niveles (mIGN)						
		Sin Presa	Sin Suavizado			Con Suavizado		
			105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
90%	Pto. Iguazú	98,2	107,6	104,0	101,2	107,2	103,6	100,9
	Iguazú 23Km	102,4	108,1	105,1	103,3	107,7	104,8	103,2
	S. San Martín	102,4	108,1	105,1	103,3	107,7	104,8	103,2
	G. del Diablo	102,6	108,1	105,2	103,5	107,8	104,9	103,4
50%	Pto. Iguazú	100,9	108,8	105,6	103,1	108,2	105,1	102,8
	Iguazú 23Km	104,3	109,4	106,8	105,3	108,9	106,5	105,1
	S. San Martín	104,3	109,4	106,8	105,3	108,9	106,5	105,1
	G. del Diablo	104,5	109,5	107,0	105,5	109,0	106,6	105,3
10%	Pto. Iguazú	107,4	112,6	110,4	108,9	111,6	109,6	108,4
	Iguazú 23Km	110,0	113,8	112,0	110,9	112,9	111,4	110,6
	S. San Martín	110,0	113,8	112,0	110,9	112,9	111,4	110,6
	G. del Diablo	110,3	113,9	112,2	111,2	113,1	111,6	110,9

La Tabla 3.7 muestra la reducción del nivel de agua por efecto del suavizado, y las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) considerando el suavizado. Estas se grafican en las Figuras 3.5 y 3.6.

Tabla 3.7. Diferencias de nivel sin y con suavizado, y sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Iguazú para escenarios de distinta permanencia y cotas de Corpus.

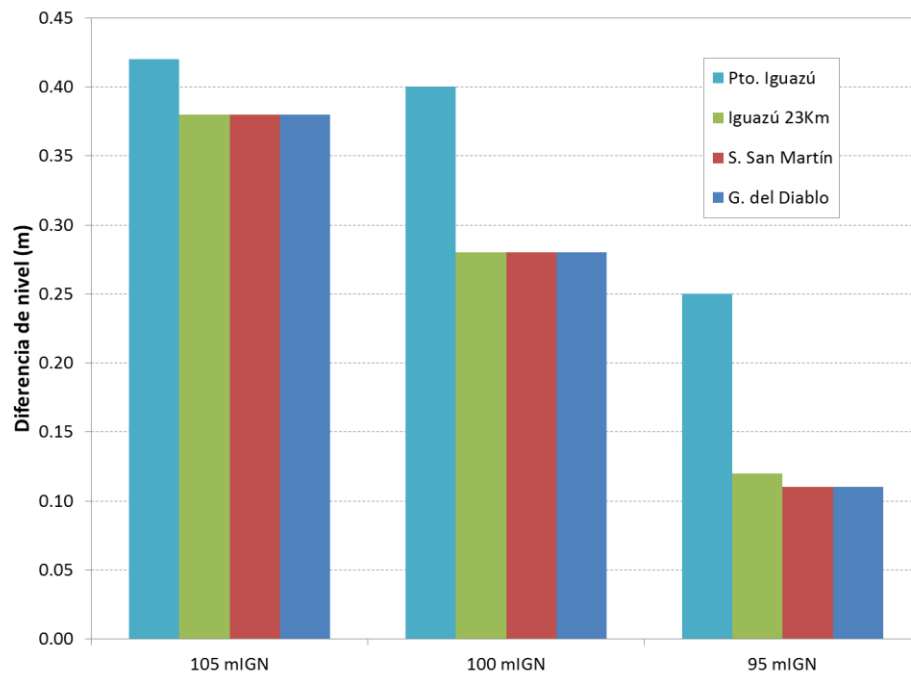
Permanencia	Estación	Diferencia sin/con suavizado (m)			Sobrelevaciones con suavizado (m)		
		105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
90%	Pto. Iguazú	0,42	0,40	0,25	9,0	5,4	2,7
	Iguazú 23Km	0,38	0,28	0,12	5,3	2,5	0,8
	S. San Martín	0,38	0,28	0,11	5,3	2,4	0,8
	G. del Diablo	0,38	0,28	0,11	5,2	2,3	0,8
50%	Pto. Iguazú	0,58	0,51	0,31	7,3	4,2	2,0
	Iguazú 23Km	0,50	0,36	0,16	4,6	2,2	0,8
	S. San Martín	0,50	0,36	0,16	4,6	2,2	0,8
	G. del Diablo	0,50	0,35	0,16	4,5	2,1	0,8
10%	Pto. Iguazú	1,04	0,84	0,49	4,2	2,2	1,0
	Iguazú 23Km	0,84	0,60	0,31	2,9	1,4	0,6
	S. San Martín	0,84	0,60	0,31	2,9	1,4	0,6
	G. del Diablo	0,82	0,58	0,30	2,8	1,3	0,6

Respecto de la reducción de nivel por efecto del suavizado (Figura 3.5) se observa que en Cataratas:

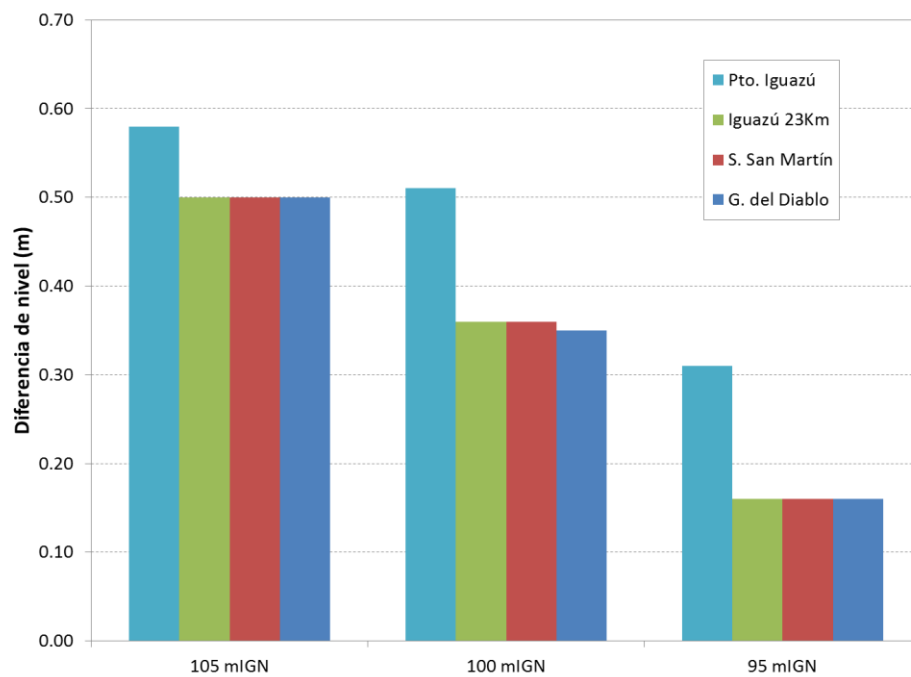
- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 0,4 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,1 m.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,15 m.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,85 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,3 m.

En relación a la sobrelevación (Figura 3.6) se observa que:

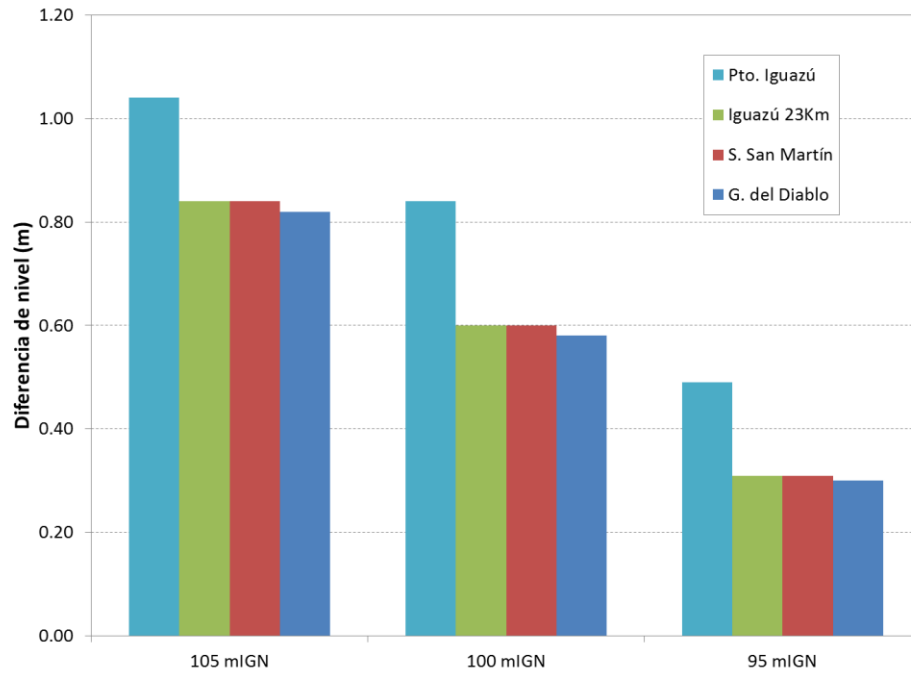
- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo más de 5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 4,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 3 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,6 m.



a) 90% de permanencia

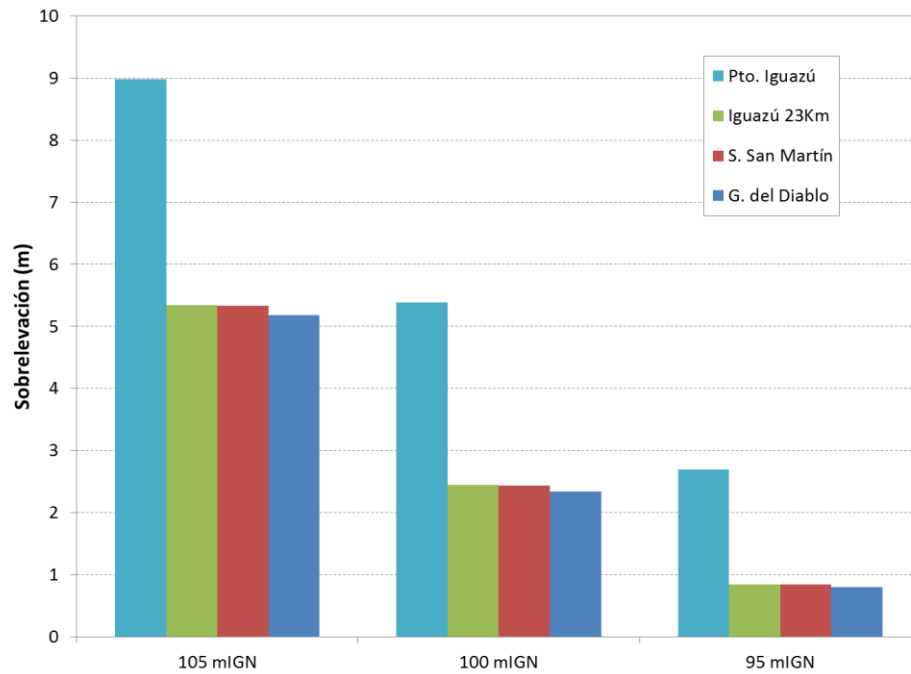


b) 50% de permanencia

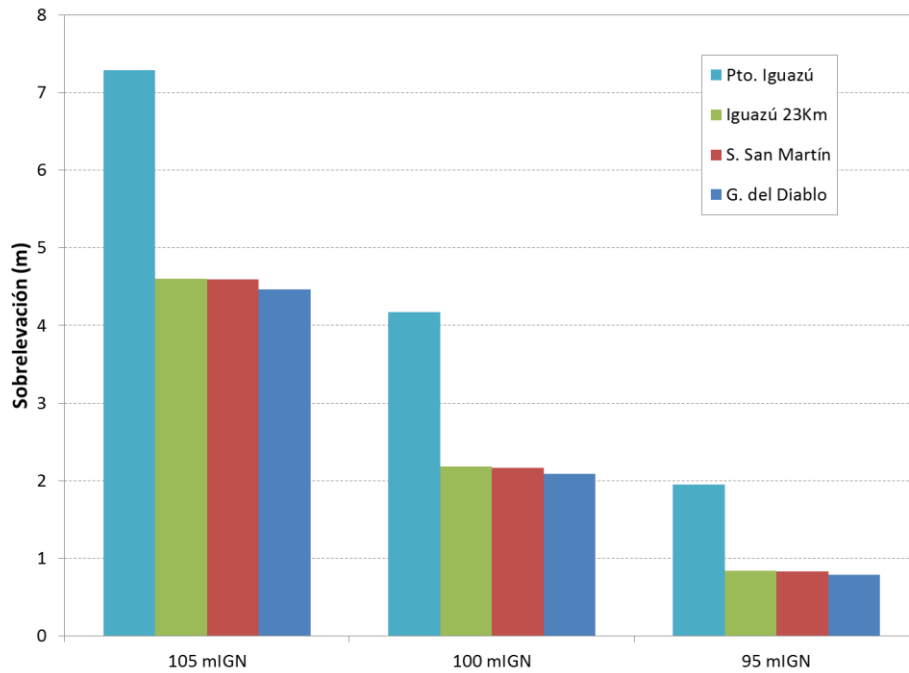


c) 10% de permanencia

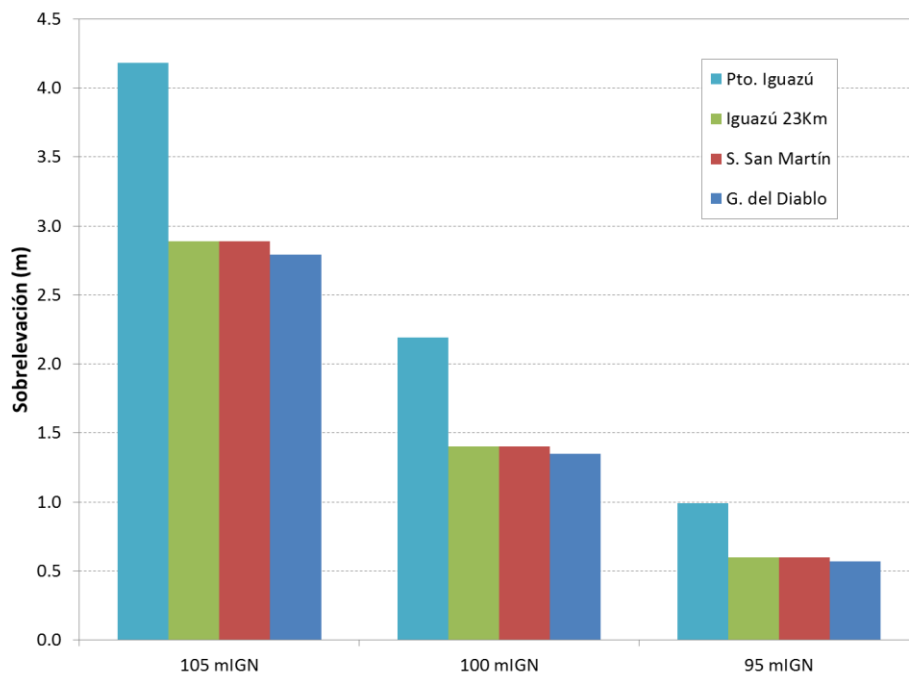
Figura 3.5. Diferencias de nivel sin y con suavizado en estaciones del río Iguazú para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia



c) 10% de permanencia

Figura 3.6. Sobrelevaciones con suavizado en estaciones del Río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.

3.3 Sensibilidad a la rugosidad de las márgenes

Tal como se describió en el Tercer Informe Parcial, la rugosidad de las márgenes se calibró a partir de los registros de niveles durante las crecidas. No obstante, los resultados se mostraron relativamente poco sensibles a estos valores de rugosidad, por lo que para la mayoría de los tramos se adoptó el mismo valor del coeficiente de Manning, de 0,10.

Ahora bien, para los escenarios en los cuales se incluye la presencia de la presa de Corpus sería esperable a priori que el valor de esta rugosidad de margen tenga un efecto más significativo sobre los resultados debido al aumento general de los niveles. Además, es también esperable una disminución de esa rugosidad por efecto del embalsamiento, que tiende a eliminar la vegetación sobre la zona inundada de manera permanente por efecto de la descomposición.

Para evaluar la influencia de la rugosidad de las márgenes se llevó a cabo un ensayo de sensibilidad, reduciendo el coeficiente de Manning de margen a la mitad en todas las secciones aguas arriba de Corpus. En la Figura 3.7 se muestra la sensibilidad de esta modificación sobre la permanencia de niveles en la estación R11. Se observa que, a pesar del cambio drástico en la rugosidad de las márgenes, el efecto es prácticamente despreciable. Esto tiene su explicación en el hecho de que las secciones del río Paraná en este tramo son relativamente estrechas, y por lo tanto el escurrimiento sobre las actuales márgenes no resulta significativo respecto del flujo sobre el cauce principal, de gran profundidad.

En síntesis, la incertidumbre sobre la rugosidad de las márgenes no representa una limitación para la evaluación de las sobreelevaciones de Corpus mediante el modelo.

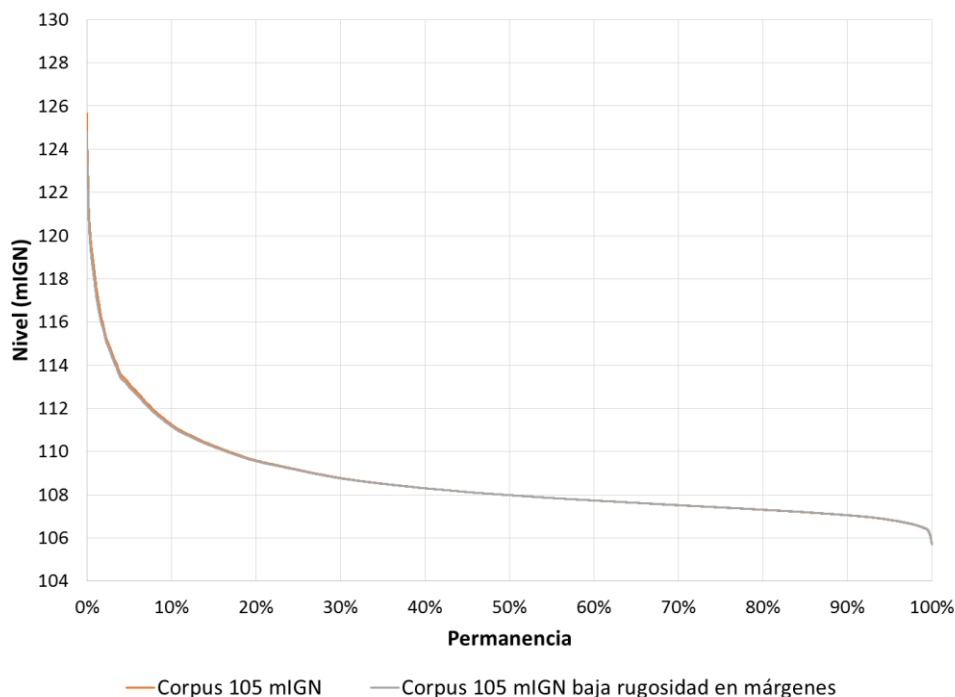


Figura 3.7. Efecto de la rugosidad de las márgenes sobre la estadística de permanencia en R11.

3.4 Crecidas extremas

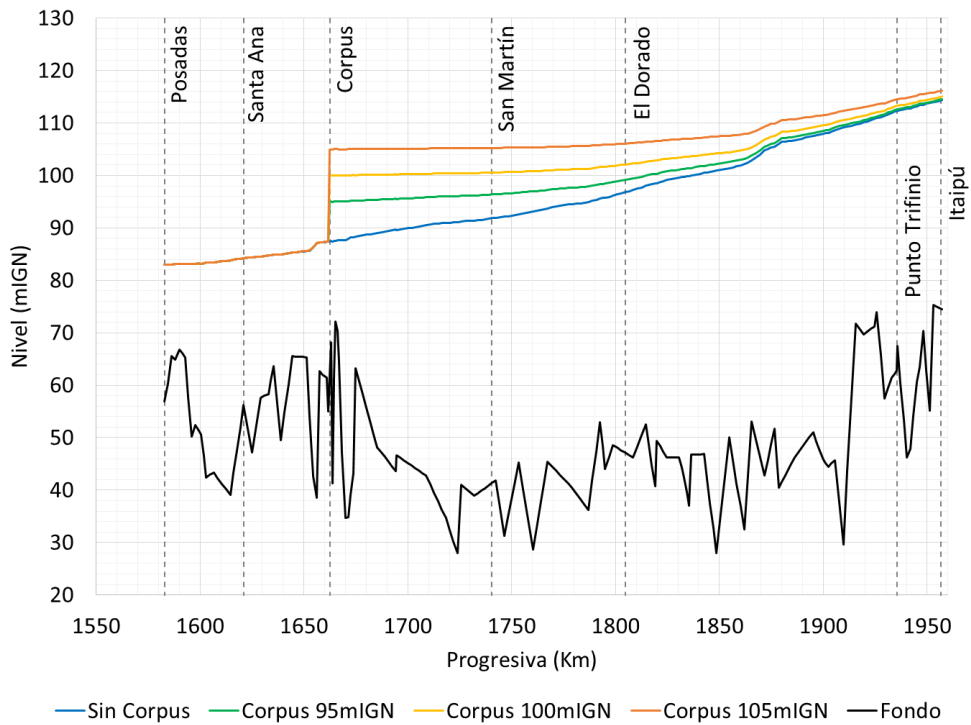
Análogamente a lo efectuado para condiciones hidrológicas normales (sección 3.2), se definieron escenarios correspondientes a crecidas extremas a caudal constante, asociados a distintas recurrencias. Se tomaron como base las estadísticas de caudal para las estaciones R11 e Itaipú, construidas sobre el período 1994-2011 y presentadas en la Tabla 2.1. Para cada recurrencia, en el borde de aguas arriba de la rama Paraná Superior del modelo se impuso el caudal correspondiente a la estación Itaipú. Por su parte, en el borde de aguas arriba de la rama Iguazú del modelo se utilizó la diferencia entre los caudales asociados a las estaciones Itaipú y R11 para esa recurrencia. Como en el caso anterior, de esta manera los caudales del Iguazú resultan diferentes a los correspondientes a crecidas de igual recurrencia de ese río, pero conforman escenarios consistentes. Estos valores se muestran en la Tabla 3.8. Comparando con la Tabla 2.1 se observa que los caudales del Iguazú para cada escenario son aproximadamente iguales a la mitad de los correspondientes a la misma recurrencia para ese río.

Tabla 3.8. Caudales asociados a los escenarios de crecidas extremas.

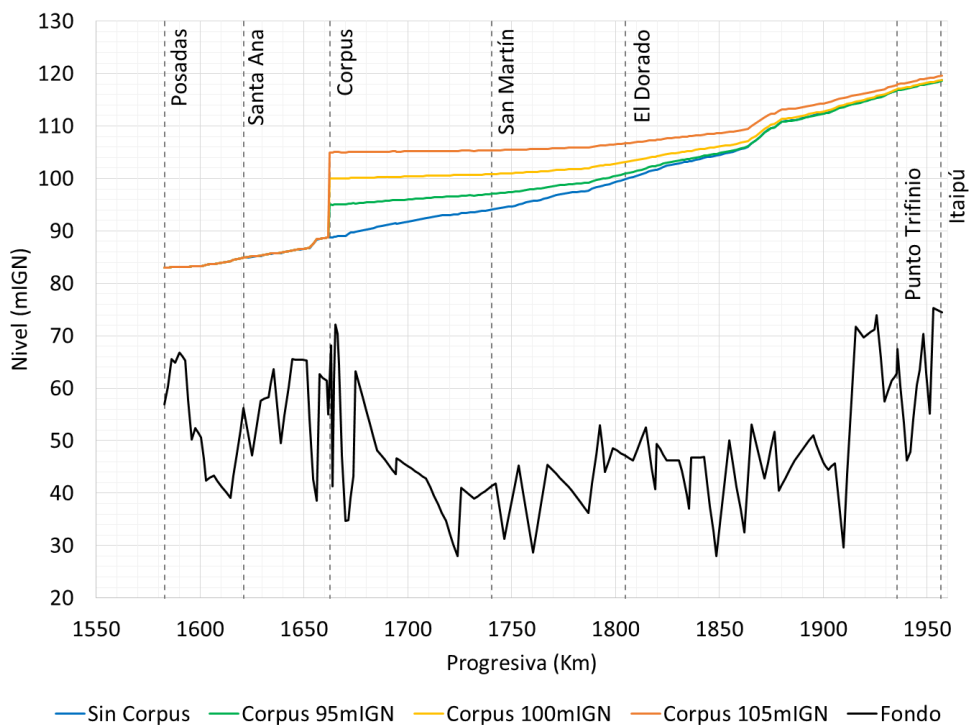
Escenario	Caudal (m ³ /s)		
	R11	Itaipú	Iguazú
2 años	24.583	20.032	4.551
5 años	30.879	23.982	6.897
10 años	35.048	26.598	8.450
20 años	39.046	29.106	9.940
50 años	44.222	32.354	11.868
100 años	48.100	34.787	13.313

3.4.1 Río Paraná

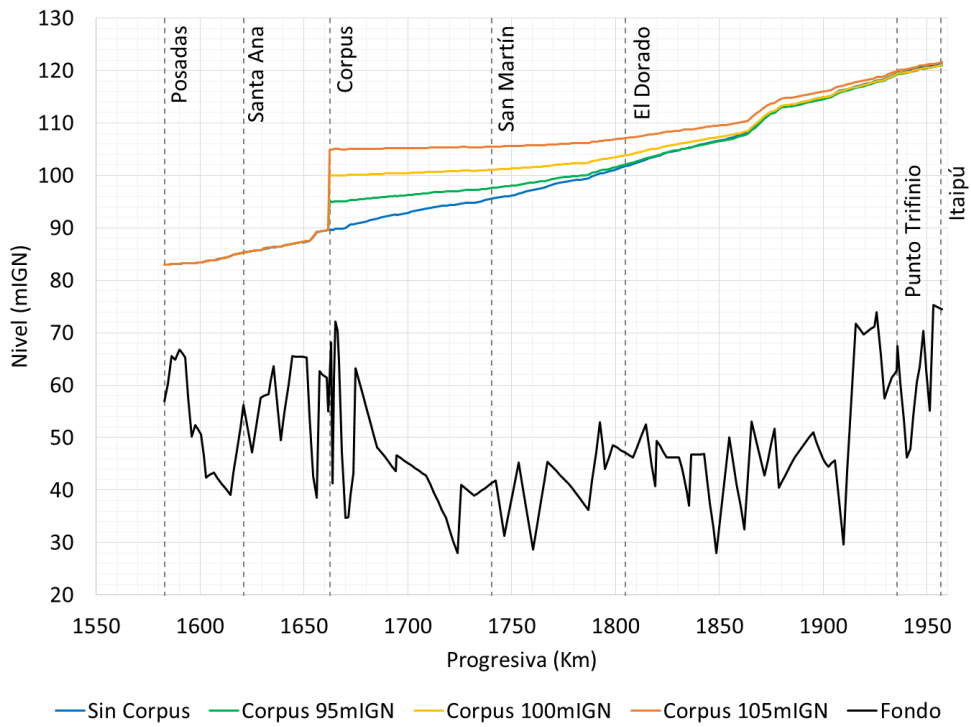
En la Figura 3.8 se presentan los perfiles longitudinales del río Paraná entre Posadas e Itaipú para los distintos escenarios, incluyendo el efecto de suavizado. Se observa que para altas recurrencias los niveles con presa son inferiores a los naturales en el tramo superior de la zona modelada. Esto es por causa del suavizado, que genera tirantes normales inferiores, los cuales sólo tienden a alcanzarse para grandes caudales, ya que para los inferiores predomina el efecto de remanso. Pero hay que tener en cuenta que esto se verificaría solo en la medida en que las crecidas no presentaran una duración extraordinaria, ya que en este último caso las formas de fondo evolucionarían hacia dimensiones mayores y generarían entonces una mayor resistencia, con el consecuente incremento del nivel de agua.



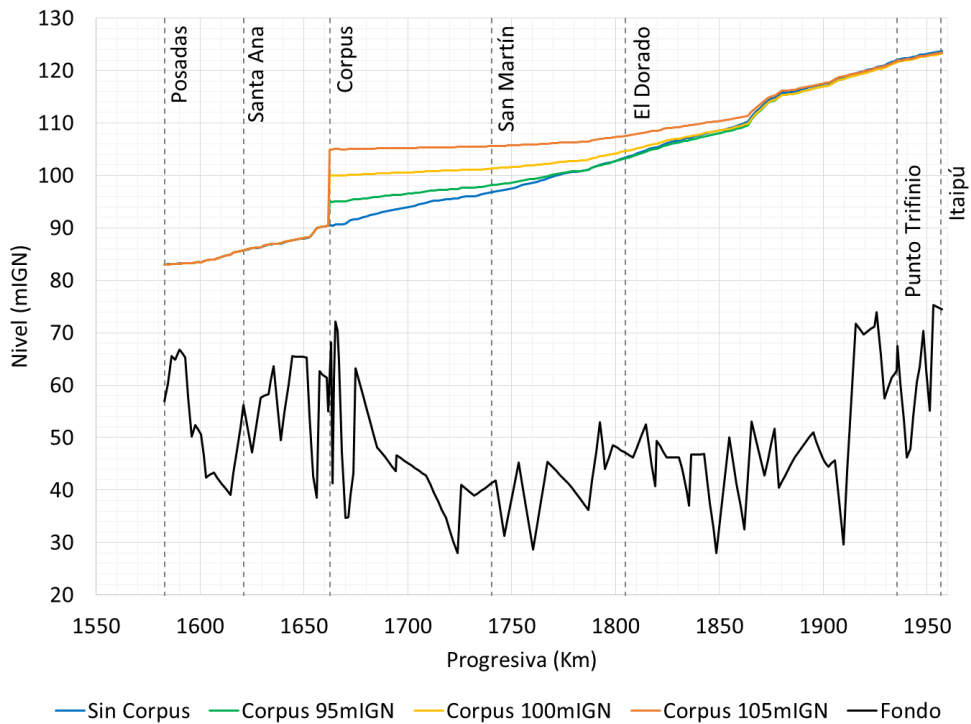
a) 2 años



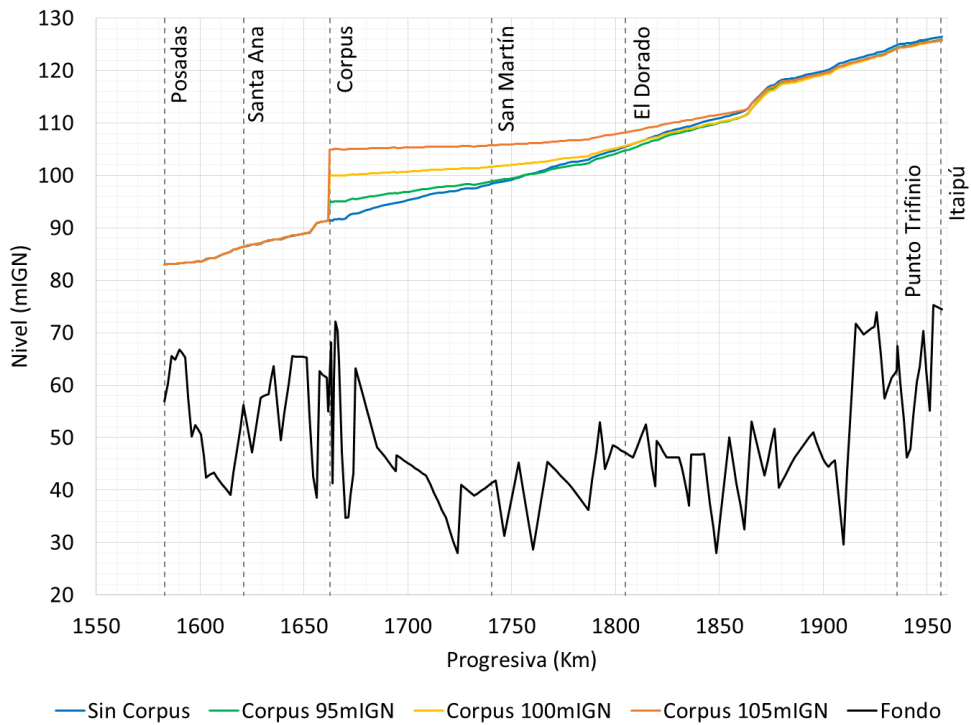
b) 5 años



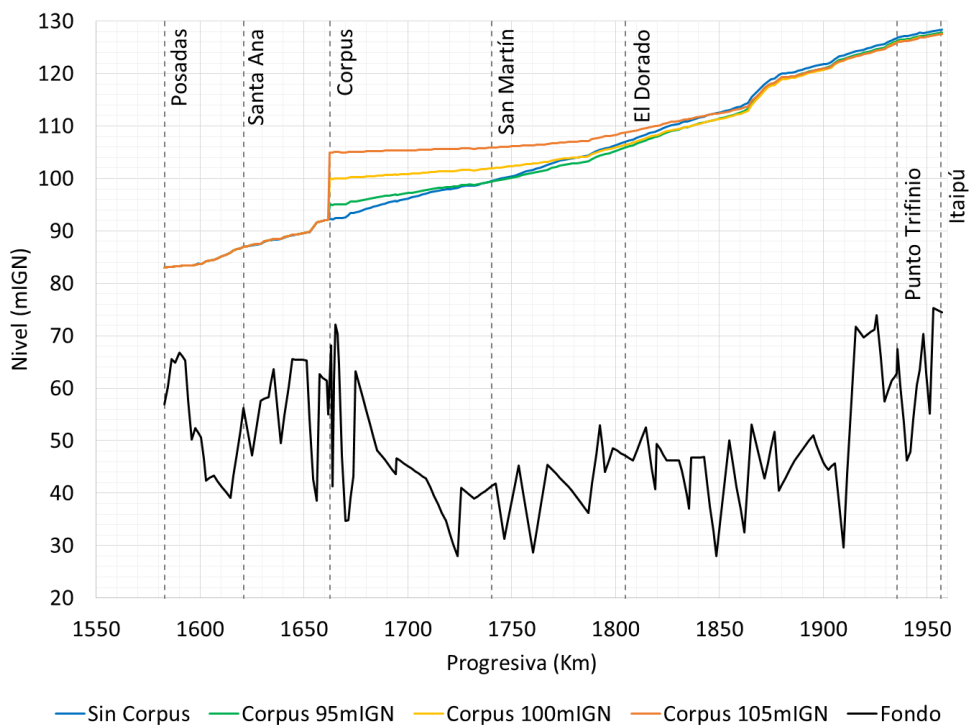
c) 10 años



d) 20 años



e) 50 años



f) 100 años

Figura 3.8. Perfiles longitudinales del río Paraná para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus, con suavizado.

La Tabla 3.9 presenta los niveles en las estaciones del río Paraná para las distintas recurrencias y cotas de embalse de Corpus, y sin y con suavizado. En la Tabla 3.10 se muestran la reducción del nivel de agua por efecto del suavizado, y las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) considerando el suavizado para las distintas recurrencias. Estas se grafican en las Figuras 3.9 y 3.10 para 2, 10 y 100 años de recurrencia.

Tabla 3.9. Niveles en estaciones del río Paraná para escenarios de distinta recurrencia y cotas de Corpus, sin y con suavizado.

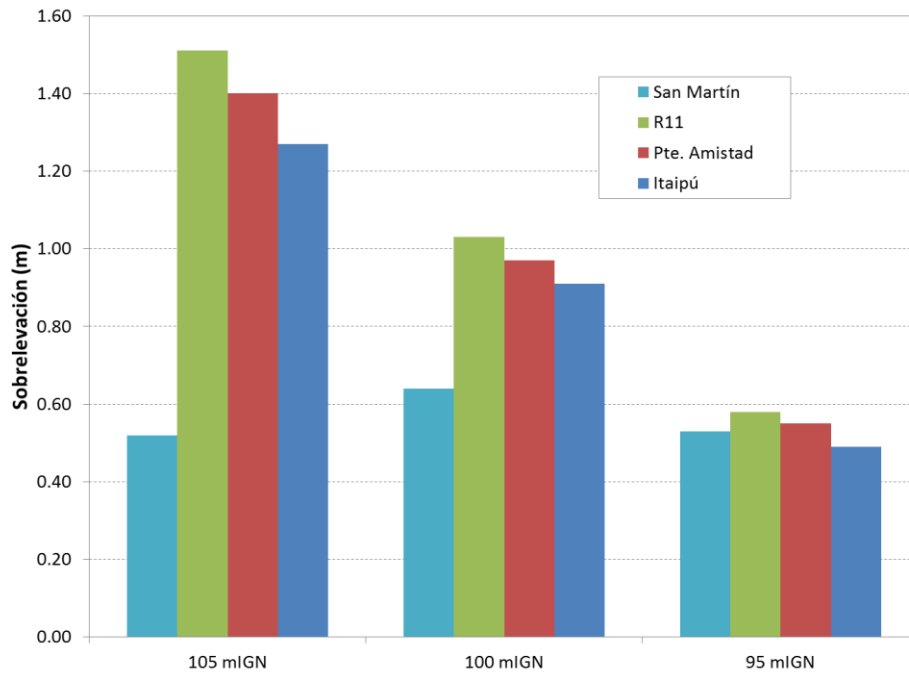
Escenario	Estación	Niveles (mIGN)						
		Sin Presa	Sin Suavizado			Con Suavizado		
			105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
2 años	Corpus	87,5	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	92,2	105,8	101,3	97,1	105,3	100,6	96,5
	R11	112,0	115,8	114,0	112,8	114,3	112,9	112,3
	Pte. Amistad	113,2	116,6	115,0	114,0	115,2	114,0	113,4
	Itaipú	114,4	117,4	116,0	115,1	116,2	115,1	114,6
5 años	Corpus	88,8	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	94,5	106,2	101,9	98,1	105,4	101,0	97,3
	R11	116,5	119,2	118,0	117,0	117,6	116,7	116,4
	Pte. Amistad	117,7	120,1	119,0	118,2	118,7	117,8	117,6
	Itaipú	118,7	120,9	119,9	119,1	119,6	118,8	118,6
10 años	Corpus	89,7	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	96,0	106,6	102,4	98,8	105,6	101,2	97,9
	R11	119,1	121,3	120,3	119,7	119,6	119,0	118,8
	Pte. Amistad	120,3	122,3	121,4	120,8	120,7	120,1	120,0
	Itaipú	121,2	123,1	122,2	121,7	121,6	121,1	121,0
20 años	Corpus	90,5	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	97,3	106,9	102,9	99,5	105,7	101,5	98,5
	R11	121,7	123,3	122,4	121,9	121,4	121,2	121,3
	Pte. Amistad	122,8	124,3	123,5	123,0	122,6	122,4	122,4
	Itaipú	123,7	125,1	124,3	123,9	123,5	123,3	123,3
50 años	Corpus	91,5	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	98,9	107,4	103,6	100,5	105,9	101,9	99,3
	R11	124,4	125,8	125,0	124,6	123,8	123,7	123,9
	Pte. Amistad	125,6	126,8	126,1	125,7	124,9	124,9	125,1
	Itaipú	126,4	127,6	127,0	126,6	125,8	125,8	126,0
100 años	Corpus	92,3	105,0	100,0	95,0	105,0	100,0	95,0
	San Martín	100,1	107,8	104,2	101,3	106,0	102,2	99,9
	R11	126,4	127,5	126,9	126,5	125,4	125,5	125,8
	Pte. Amistad	127,5	128,6	128,0	127,7	126,6	126,7	127,0
	Itaipú	128,4	129,4	128,8	128,5	127,5	127,6	127,8

Tabla 3.10. Sobreelevaciones en estaciones del río Paraná para escenarios de distinta recurrencia y cotas de Corpus, sin y con suavizado.

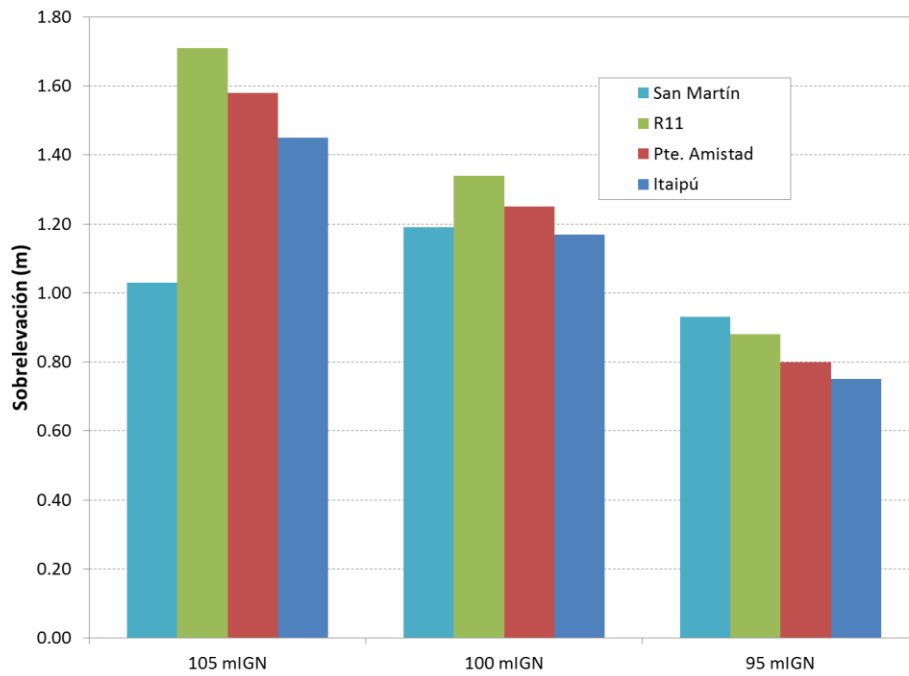
Escenario	Estación	Diferencia sin/con suavizado (m)			Sobreelevaciones con suavizado (m)		
		105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
2 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	17,55	12,55	7,55
	San Martín	0,52	0,64	0,53	13,13	8,47	4,38
	R11	1,51	1,03	0,58	2,28	0,97	0,29
	Pte. Amistad	1,40	0,97	0,55	2,04	0,83	0,24
	Itaipú	1,27	0,91	0,49	1,8	0,68	0,19
5 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	16,19	11,19	6,19
	San Martín	0,81	0,96	0,76	10,93	6,46	2,81
	R11	1,57	1,32	0,62	1,07	0,14	-0,12
	Pte. Amistad	1,44	1,21	0,57	0,94	0,09	-0,12
	Itaipú	1,31	1,14	0,53	0,85	0,04	-0,13
10 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	15,32	10,32	5,32
	San Martín	1,03	1,19	0,93	9,6	5,27	1,93
	R11	1,71	1,34	0,88	0,48	-0,14	-0,28
	Pte. Amistad	1,58	1,25	0,80	0,41	-0,16	-0,26
	Itaipú	1,45	1,17	0,75	0,37	-0,18	-0,26
20 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	14,51	9,51	4,51
	San Martín	1,25	1,44	1,08	8,39	4,2	1,17
	R11	1,86	1,22	0,64	-0,21	-0,44	-0,38
	Pte. Amistad	1,73	1,15	0,59	-0,22	-0,44	-0,36
	Itaipú	1,59	1,09	0,56	-0,2	-0,44	-0,35
50 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	13,49	8,49	3,49
	San Martín	1,55	1,76	1,27	6,94	2,95	0,34
	R11	2,02	1,33	0,69	-0,66	-0,71	-0,51
	Pte. Amistad	1,87	1,25	0,65	-0,62	-0,68	-0,48
	Itaipú	1,75	1,19	0,62	-0,58	-0,66	-0,46
100 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	12,75	7,75	2,75
	San Martín	1,80	2,00	1,41	5,92	2,1	-0,21
	R11	2,11	1,38	0,73	-0,95	-0,87	-0,6
	Pte. Amistad	1,96	1,31	0,68	-0,89	-0,84	-0,56
	Itaipú	1,83	1,25	0,65	-0,83	-0,81	-0,54

Respecto de la reducción de nivel por efecto del suavizado (Figura 3.9) se observa que:

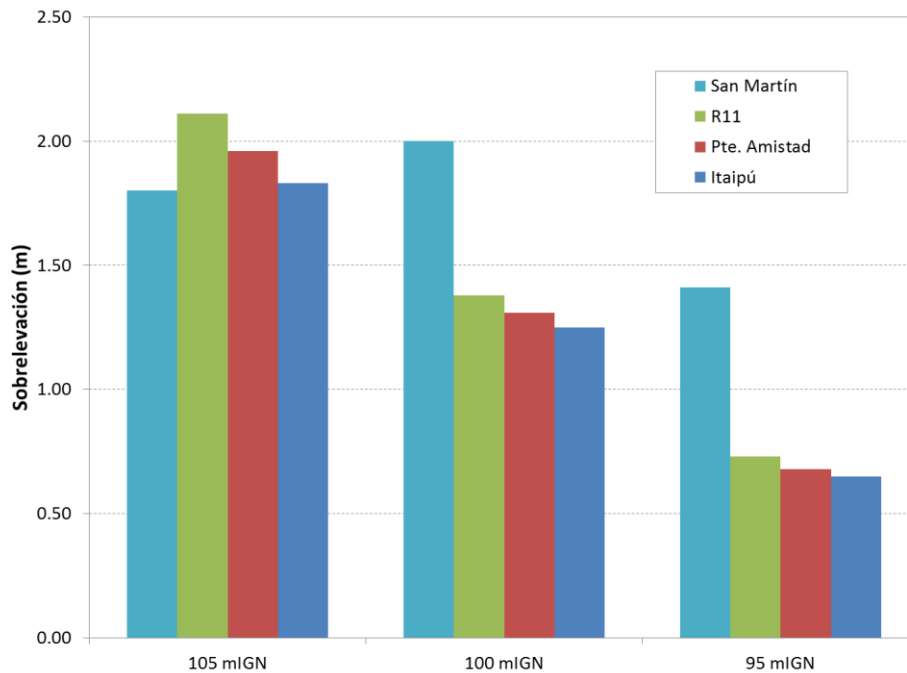
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,3 m en Itaipú y 1,5 m en el Punto Trifinio (R11); con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,5 m en Itaipú y 0,6 m en el Punto Trifinio.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,5 m en Itaipú y 1,7 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,75 m en Itaipú y 0,9 m en el Punto Trifinio.
- Para 100 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,8 m en Itaipú y de 2,1 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,65 m en Itaipú y 0,75 m en el Punto Trifinio.



a) 2 años



b) 10 años

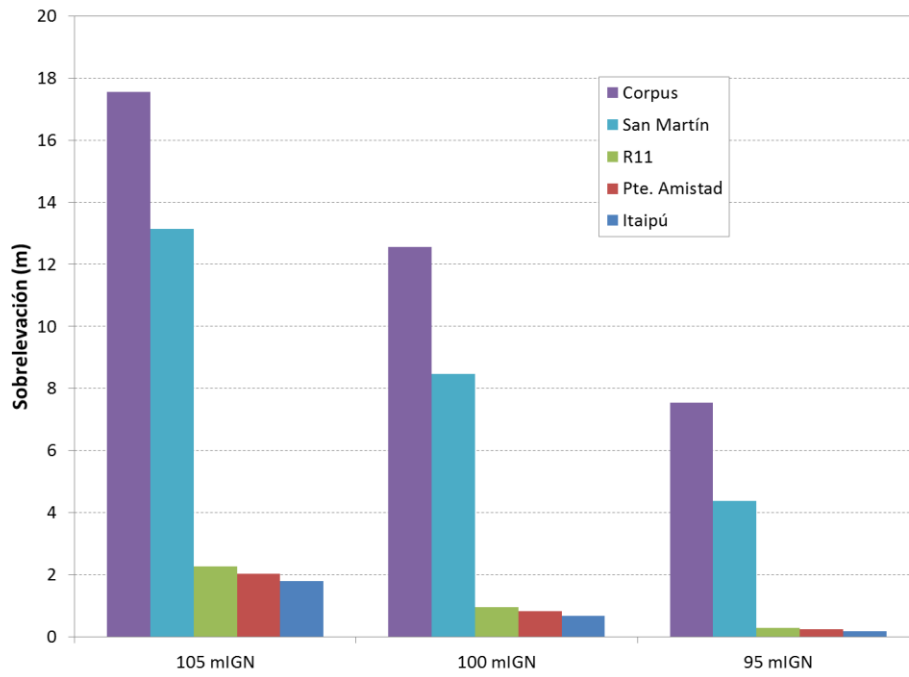


c) 100 años

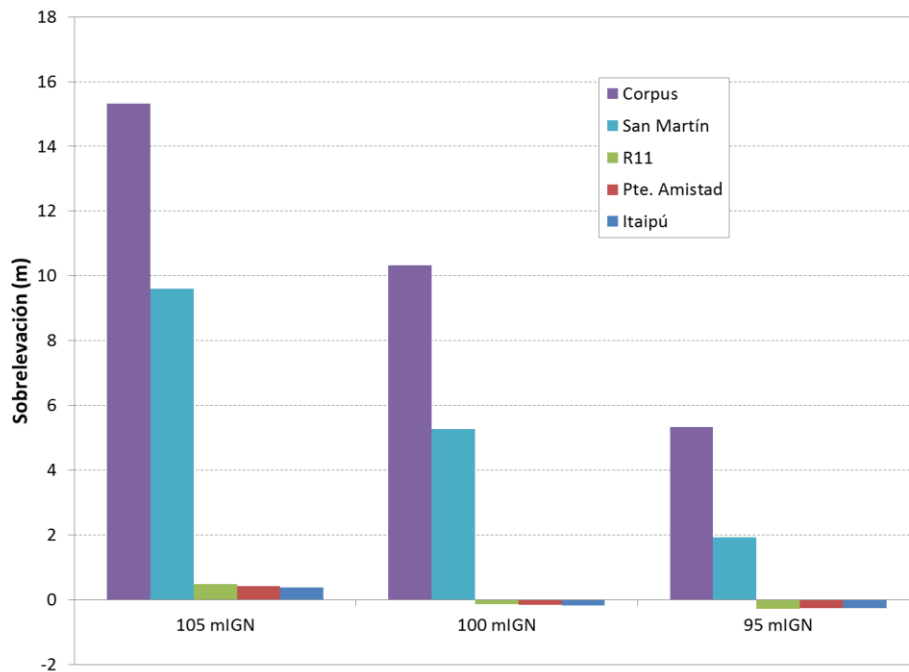
Figura 3.9. Diferencias de nivel sin y con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

En relación a la sobrelevación (Figura 3.10) se observa que:

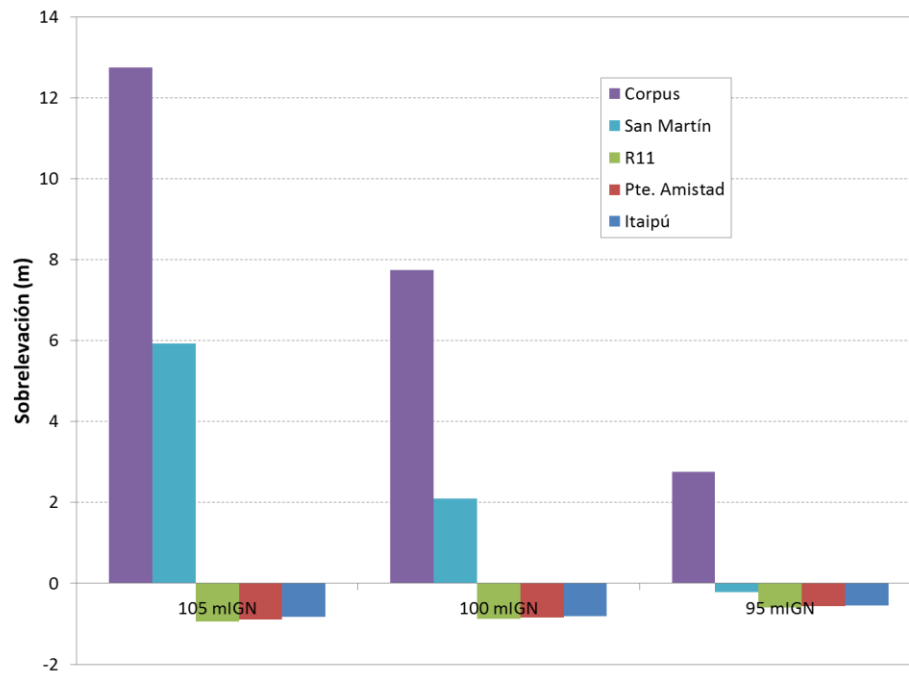
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,8 m en Itaipú y 2,3 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,2 m en Itaipú y 0,3 m en el Punto Trifinio.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,4 m en Itaipú y 0,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN se producen depresiones en el Paraná Superior, de alrededor de 0,2 m en Itaipú y 0,15 m en el Punto Trifinio.
- Para 100 años de recurrencia se producen depresiones en el Paraná Superior; con Corpus a 105 mIGN estas son de alrededor de 0,8 m en Itaipú y de 0,95 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN son de alrededor de 0,55 m en Itaipú y 0,6 m en el Punto Trifinio.



a) 2 años



b) 10 años



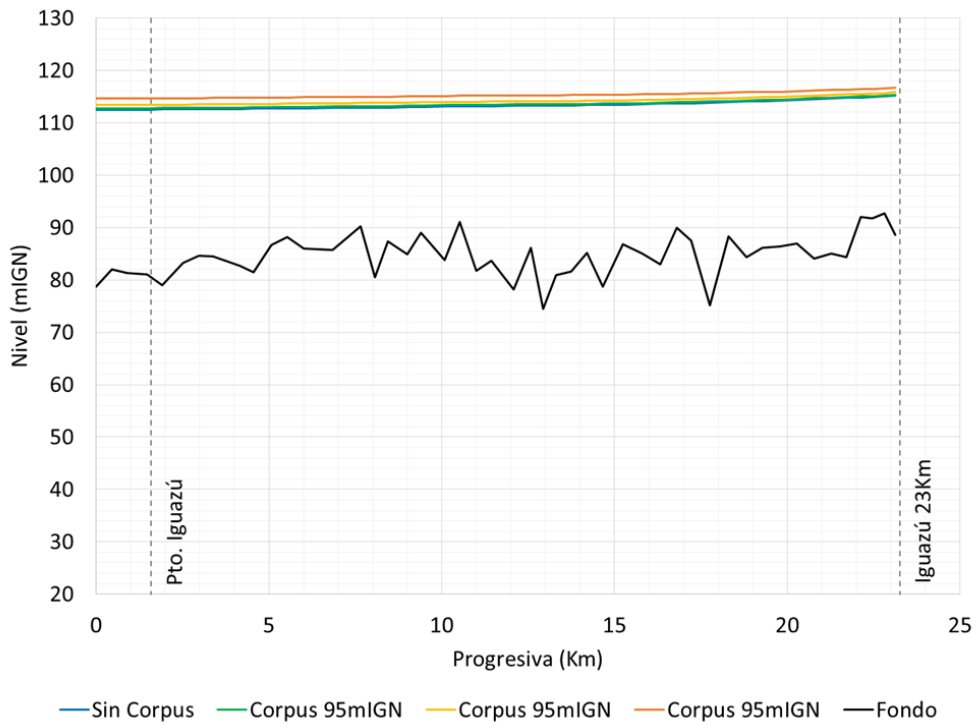
c) 100 años

Figura 3.10. Sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

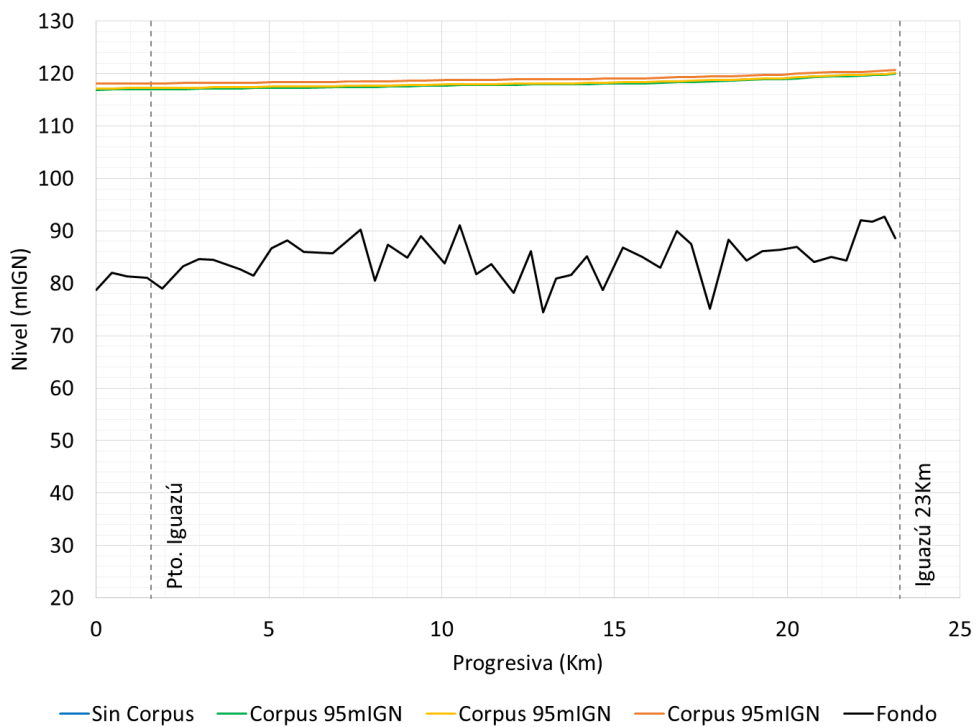
3.4.2 Río Iguazú

En la Figura 3.11 se muestran los perfiles longitudinales del río Iguazú entre el Punto Trifinio y las Cataratas para los distintos escenarios, incluyendo el efecto de suavizado. Se observa que, como en el caso del río Paraná, para altas recurrencias los niveles con presa son inferiores a los naturales por efecto del suavizado.

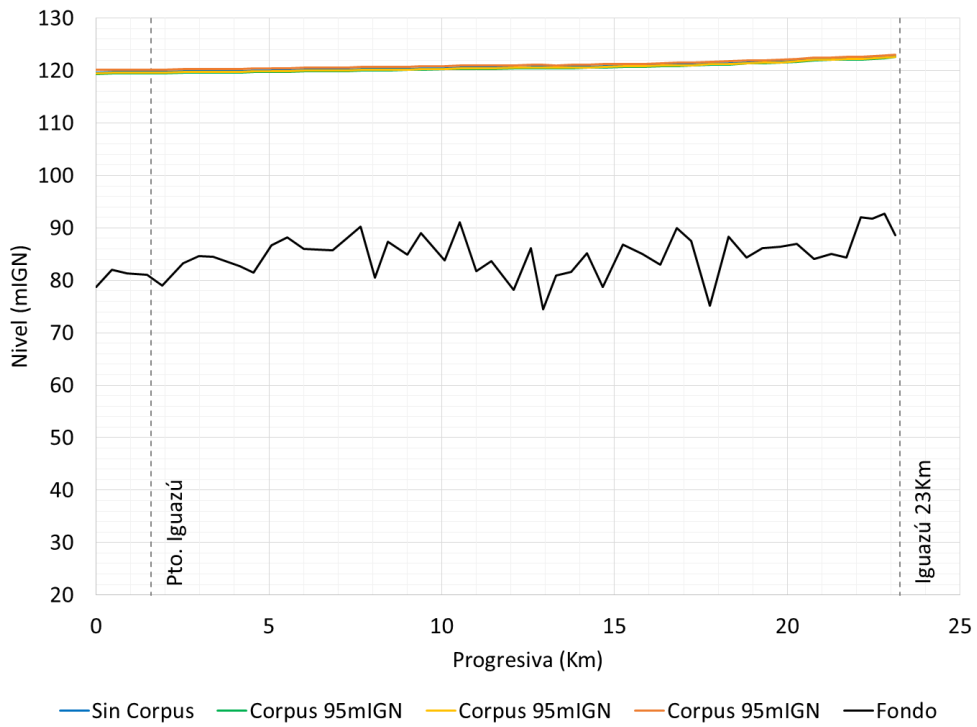
La Tabla 3.11 presenta los niveles en las estaciones del río Iguazú para las distintas recurrencias y cotas de embalse de Corpus, y sin y con suavizado.



a) 2 años



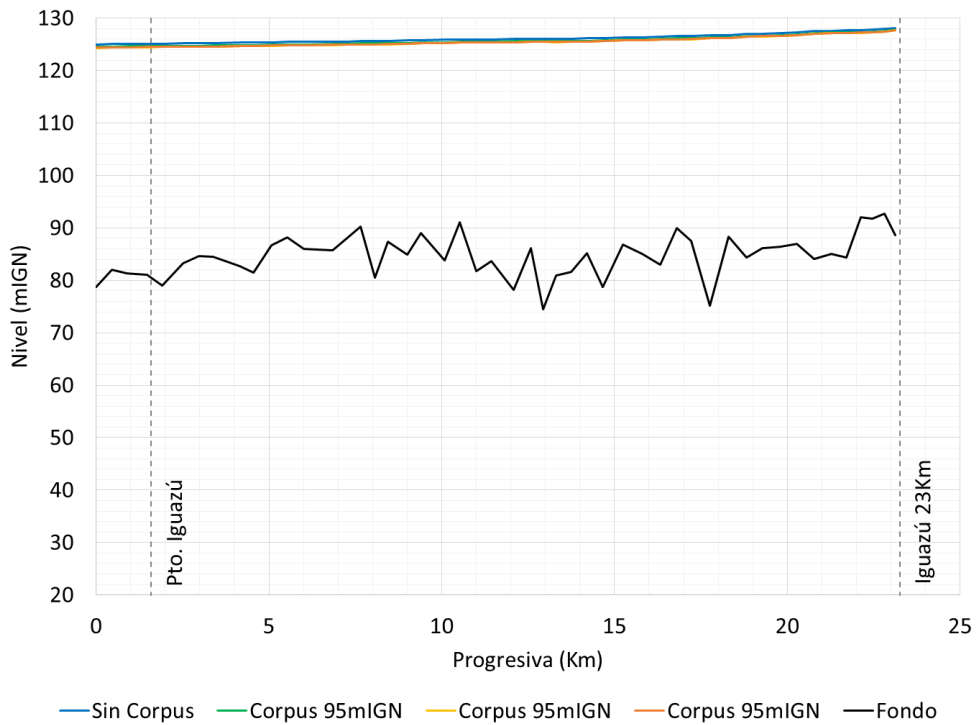
b) 5 años



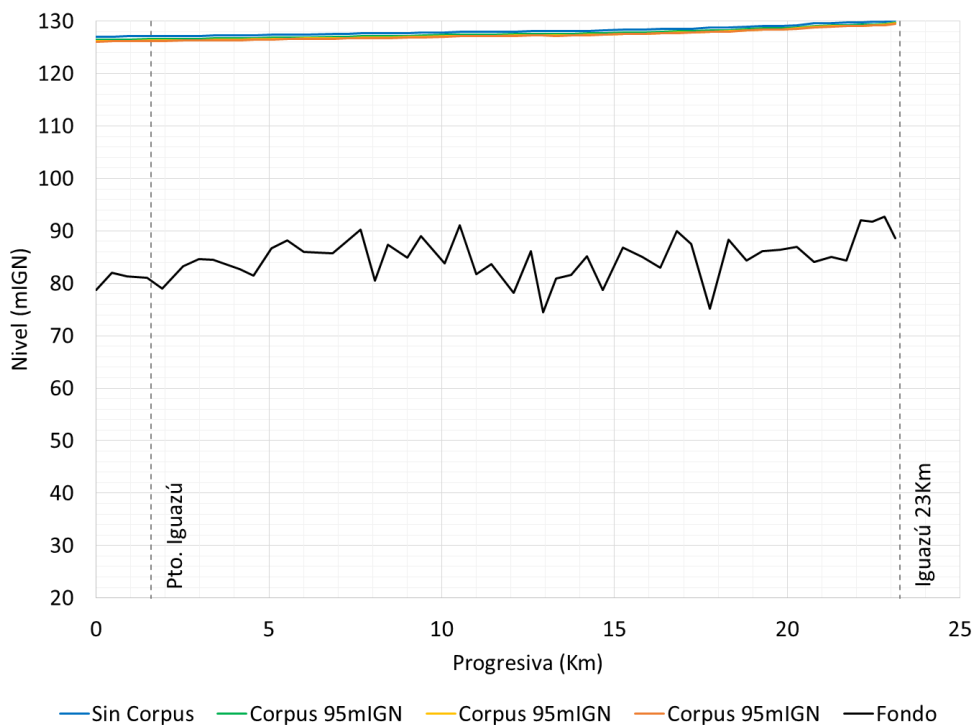
c) 10 años



d) 20 años



e) 50 años



f) 100 años

Figura 3.11. Perfiles longitudinales del río Iguazú para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus, con suavizado.

Tabla 3.11. Niveles en estaciones del río Iguazú para escenarios de distinta recurrencia y cotas de Corpus, sin y con suavizado.

Escenario	Estación	Niveles (mIGN)						
		Sin Presa	Sin Suavizado			Con Suavizado		
			105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
2 años	Pto. Iguazú	112,5	116,2	114,5	113,4	114,7	113,5	112,8
	Iguazú 23Km	115,2	117,9	116,6	115,8	116,7	115,9	115,4
	S. San Martín	115,2	117,9	116,6	115,8	116,7	115,9	115,4
	G. del Diablo	115,6	118,1	116,8	116,1	117,0	116,2	115,7
5 años	Pto. Iguazú	117,1	119,7	118,5	117,6	118,1	117,3	117,0
	Iguazú 23Km	120,1	121,8	121,0	120,4	120,7	120,2	120,0
	S. San Martín	120,1	121,8	121,0	120,4	120,7	120,2	120,0
	G. del Diablo	120,4	122,1	121,3	120,7	121,1	120,5	120,4
10 años	Pto. Iguazú	119,8	121,9	120,9	120,3	120,2	119,6	119,5
	Iguazú 23Km	122,8	124,3	123,6	123,2	123,1	122,7	122,6
	S. San Martín	122,8	124,3	123,6	123,2	123,1	122,7	122,6
	G. del Diablo	123,1	124,5	123,9	123,5	123,4	123,0	122,9
20 años	Pto. Iguazú	122,3	123,9	123,1	122,6	122,1	121,9	122,0
	Iguazú 23Km	125,3	126,4	125,8	125,5	125,2	125,0	125,1
	S. San Martín	125,3	126,4	125,8	125,5	125,2	125,0	125,1
	G. del Diablo	125,6	126,7	126,1	125,8	125,5	125,4	125,4
50 años	Pto. Iguazú	125,1	126,4	125,7	125,3	124,5	124,5	124,7
	Iguazú 23Km	128,2	129,1	128,6	128,3	127,7	127,7	127,8
	S. San Martín	128,2	129,1	128,6	128,3	127,7	127,7	127,8
	G. del Diablo	128,5	129,4	128,9	128,6	128,1	128,1	128,2
100 años	Pto. Iguazú	127,1	128,2	127,6	127,3	126,2	126,3	126,6
	Iguazú 23Km	130,2	131,0	130,6	130,3	129,5	129,6	129,8
	S. San Martín	130,2	131,0	130,6	130,3	129,5	129,6	129,8
	G. del Diablo	130,5	131,3	130,9	130,6	129,9	130,0	130,2

En la Tabla 3.12 se muestran la reducción del nivel de agua por efecto del suavizado, y las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) considerando el suavizado para las distintas recurrencias. Estas se grafican en las Figuras 3.9 y 3.10 para 2, 10 y 100 años de recurrencia.

Respecto de la reducción de nivel en Cataratas por efecto del suavizado (Figura 3.12) se observa que:

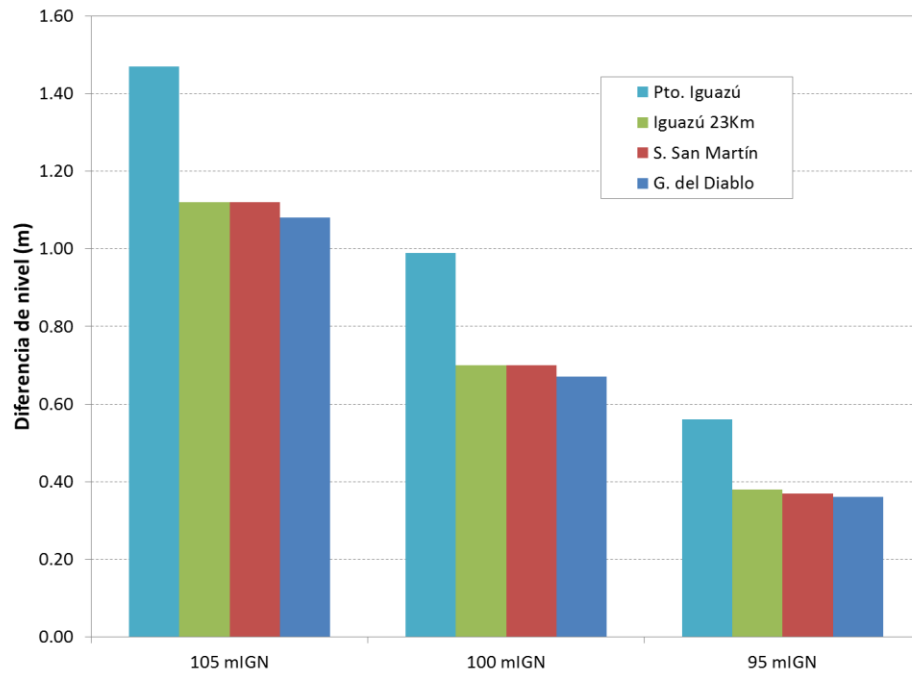
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,1 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 0,4 m.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,2 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,55 m.
- Para 100 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,5 m.

Tabla 3.12. Sobreelevaciones en estaciones del río Iguazú para escenarios de distinta recurrencia y cotas de Corpus, sin y con suavizado.

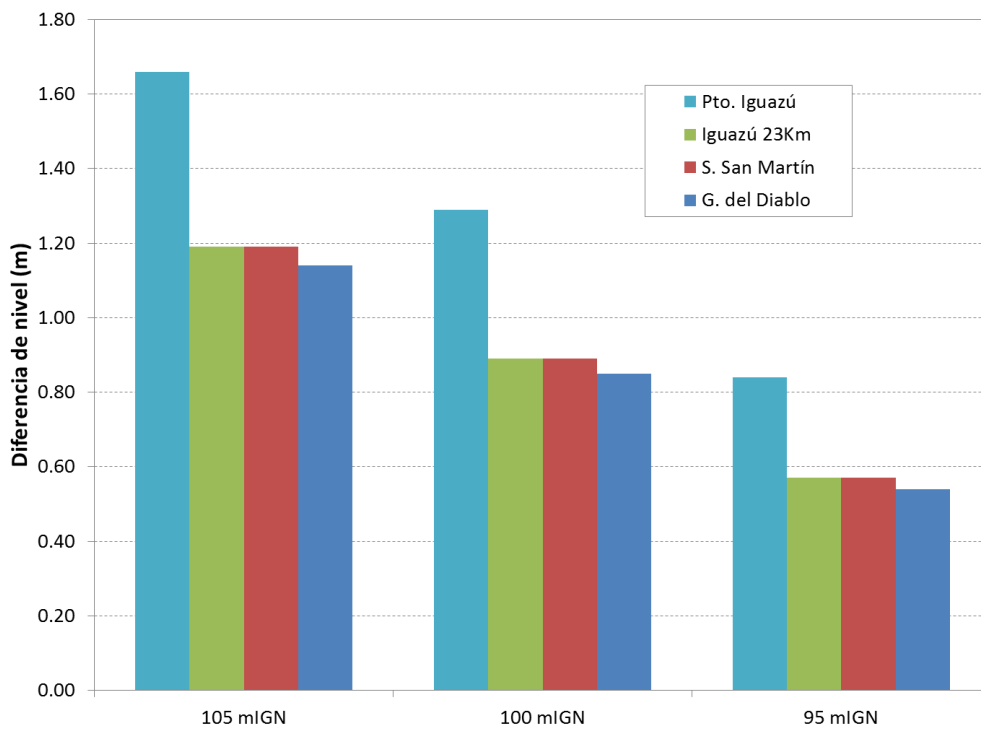
Escenario	Estación	Diferencia sin/con suavizado (m)			Sobreelevaciones con suavizado (m)		
		105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN	105 mIGN	100 mIGN	95 mIGN
2 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	17,55	12,55	7,55
	San Martín	0,52	0,64	0,53	13,13	8,47	4,38
	R11	1,51	1,03	0,58	2,28	0,97	0,29
	Pte. Amistad	1,40	0,97	0,55	2,04	0,83	0,24
	Itaipú	1,27	0,91	0,49	1,8	0,68	0,19
5 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	16,19	11,19	6,19
	San Martín	0,81	0,96	0,76	10,93	6,46	2,81
	R11	1,57	1,32	0,62	1,07	0,14	-0,12
	Pte. Amistad	1,44	1,21	0,57	0,94	0,09	-0,12
	Itaipú	1,31	1,14	0,53	0,85	0,04	-0,13
10 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	15,32	10,32	5,32
	San Martín	1,03	1,19	0,93	9,6	5,27	1,93
	R11	1,71	1,34	0,88	0,48	-0,14	-0,28
	Pte. Amistad	1,58	1,25	0,80	0,41	-0,16	-0,26
	Itaipú	1,45	1,17	0,75	0,37	-0,18	-0,26
20 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	14,51	9,51	4,51
	San Martín	1,25	1,44	1,08	8,39	4,2	1,17
	R11	1,86	1,22	0,64	-0,21	-0,44	-0,38
	Pte. Amistad	1,73	1,15	0,59	-0,22	-0,44	-0,36
	Itaipú	1,59	1,09	0,56	-0,2	-0,44	-0,35
50 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	13,49	8,49	3,49
	San Martín	1,55	1,76	1,27	6,94	2,95	0,34
	R11	2,02	1,33	0,69	-0,66	-0,71	-0,51
	Pte. Amistad	1,87	1,25	0,65	-0,62	-0,68	-0,48
	Itaipú	1,75	1,19	0,62	-0,58	-0,66	-0,46
100 años	Corpus	0,00	0,00	0,00	12,75	7,75	2,75
	San Martín	1,80	2,00	1,41	5,92	2,1	-0,21
	R11	2,11	1,38	0,73	-0,95	-0,87	-0,6
	Pte. Amistad	1,96	1,31	0,68	-0,89	-0,84	-0,56
	Itaipú	1,83	1,25	0,65	-0,83	-0,81	-0,54

En relación a la sobrelevación en Cataratas (Figura 3.13) se observa que:

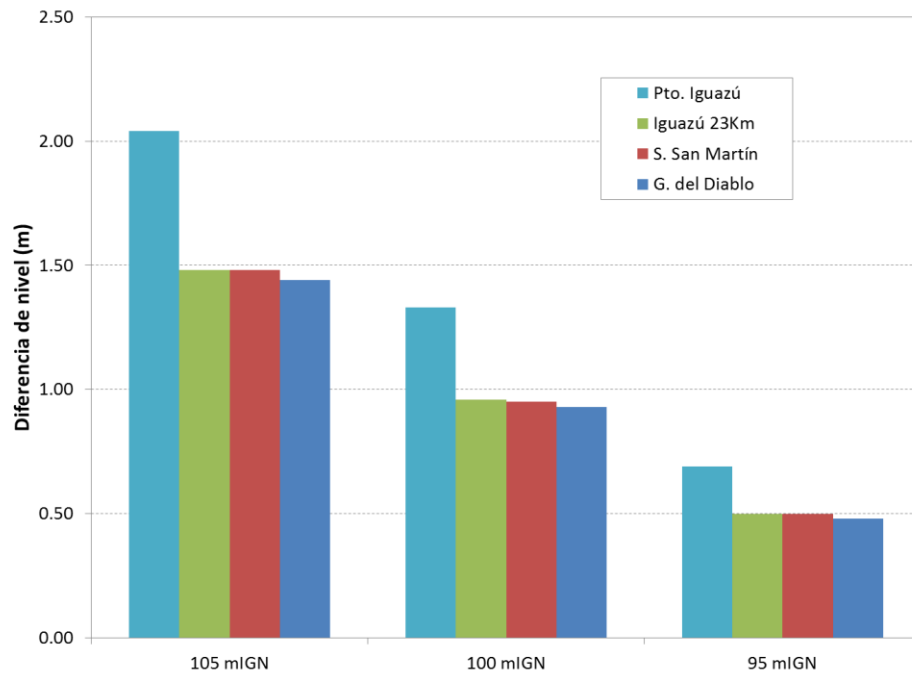
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 0,2 m.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,3 m, y con Corpus a 95 mIGN se producen depresiones de alrededor de 0,2 m.
- Para 100 años de recurrencia se producen depresiones; con Corpus a 105 mIGN estas son de alrededor de 0,65 m, y con Corpus a 95 mIGN de alrededor de 0,4 m.



a) 2 años

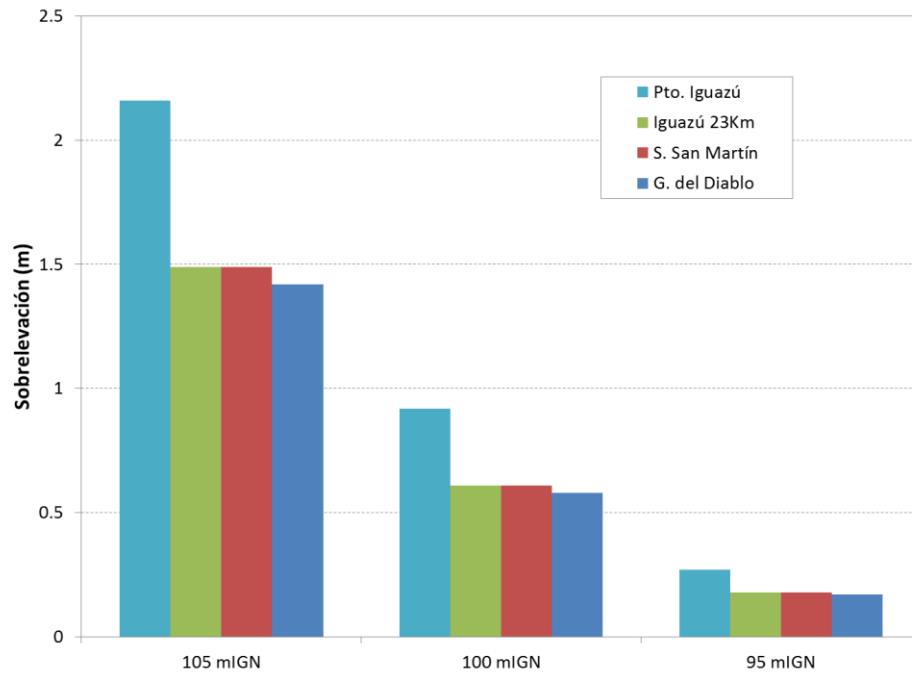


b) 10 años

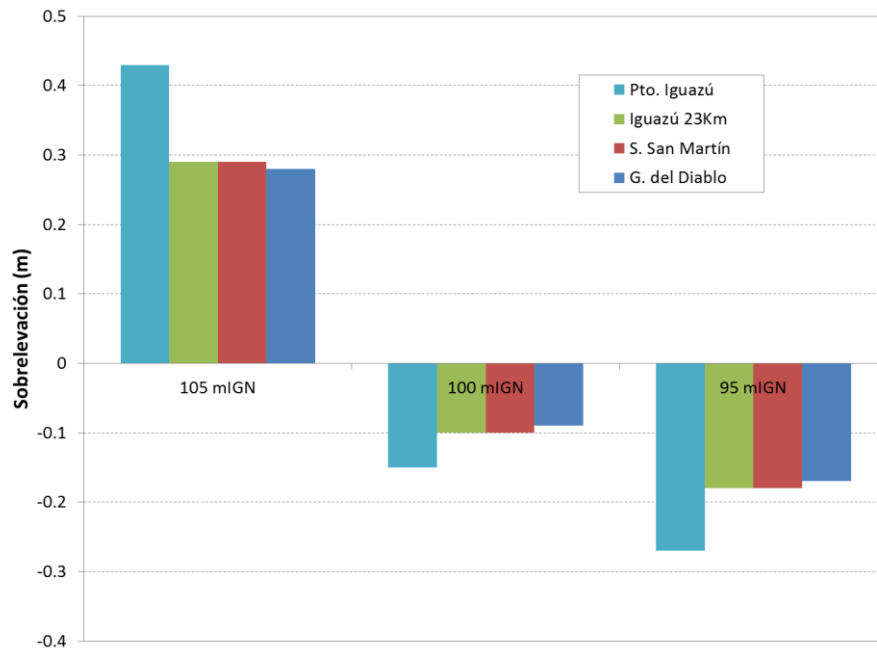


c) 100 años

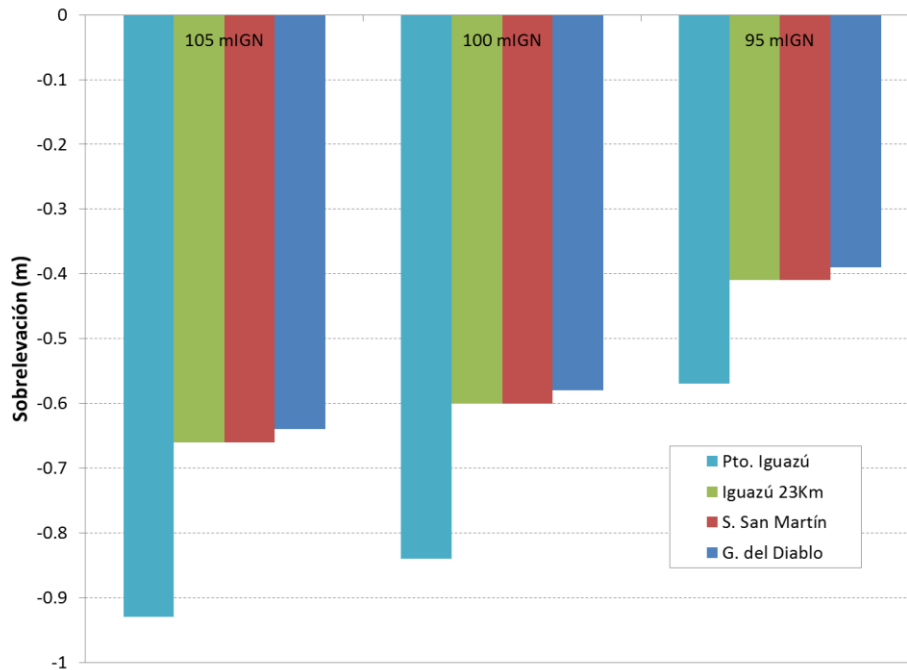
Figura 3.12. Diferencias de nivel sin y con suavizado en estaciones del río Iguazú para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.



a) 2 años



b) 10 años

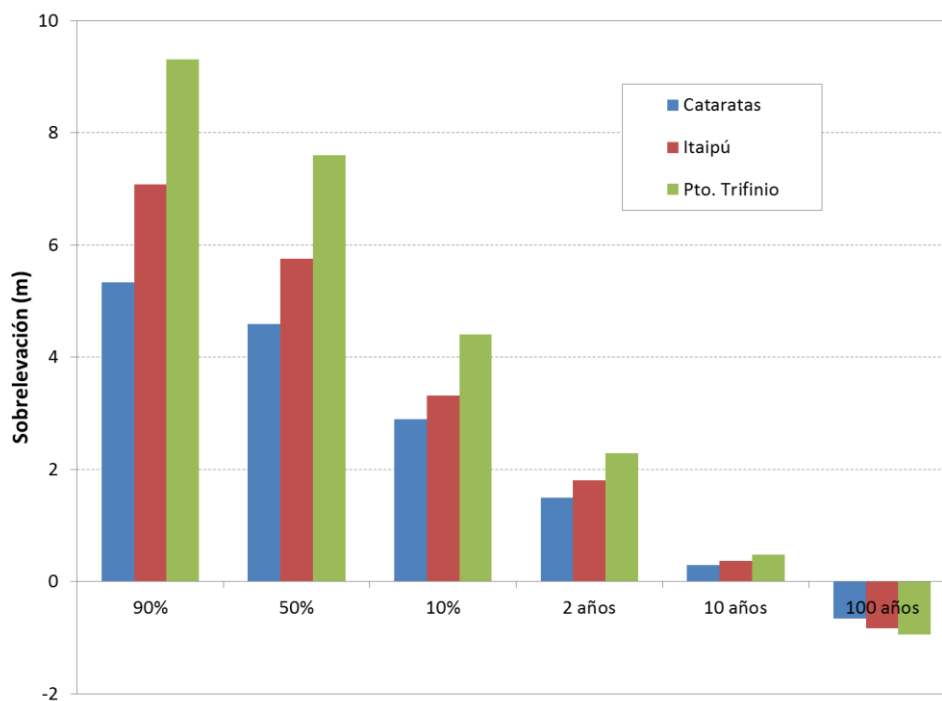


c) 100 años

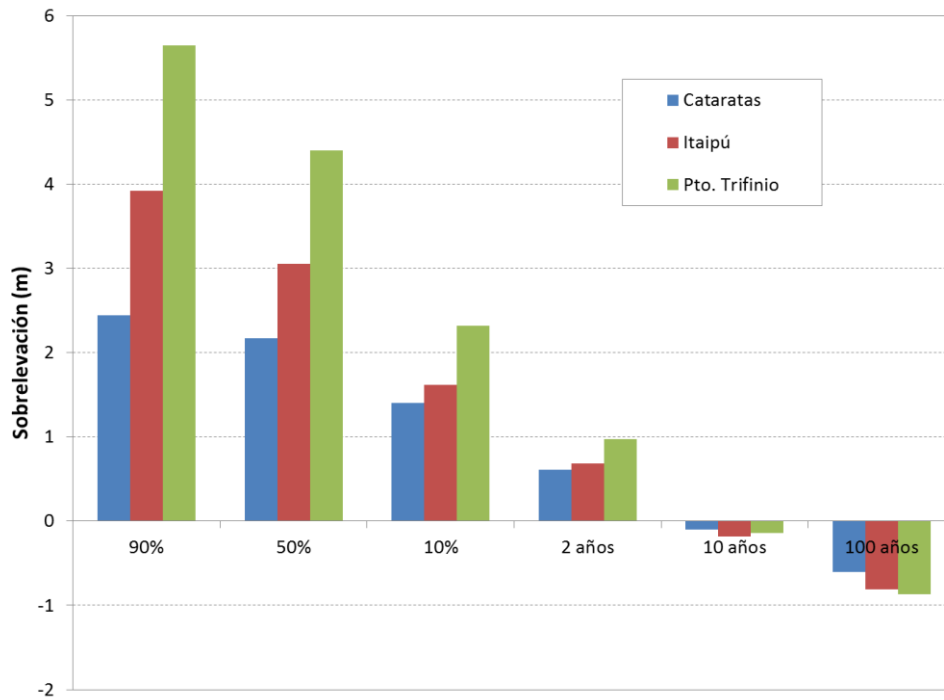
Figura 3.13. Sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Iguazú para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

3.5 Síntesis de sobrelevaciones

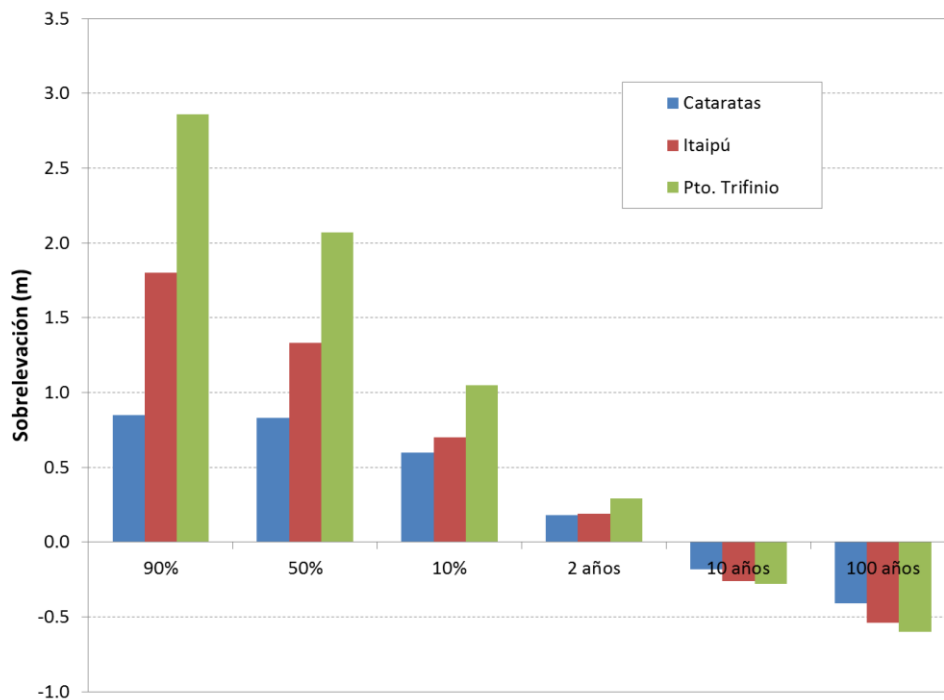
A modo de síntesis, en la Figura 3.14 se representan las sobrelevaciones (con suavizado) en tres zonas críticas (Cataratas, Itaipú y Punto Trifinio) para escenarios hidrológicos de estiaje (90% de permanencia), medio (50% de permanencia), crecido (10% de permanencia), y de crecidas ordinarias (2 años de recurrencia) y extraordinarias (10 y 100 años de recurrencia), correspondientes a distintas cotas de embalse de Corpus. Obviamente, las sobrelevaciones disminuyen a medida que se intensifican las condiciones de escurrimiento, hasta convertirse en depresiones para crecidas extraordinarias (debido al efecto de suavizado del fondo).



a) 105 mIGN



b) 100 mIGN

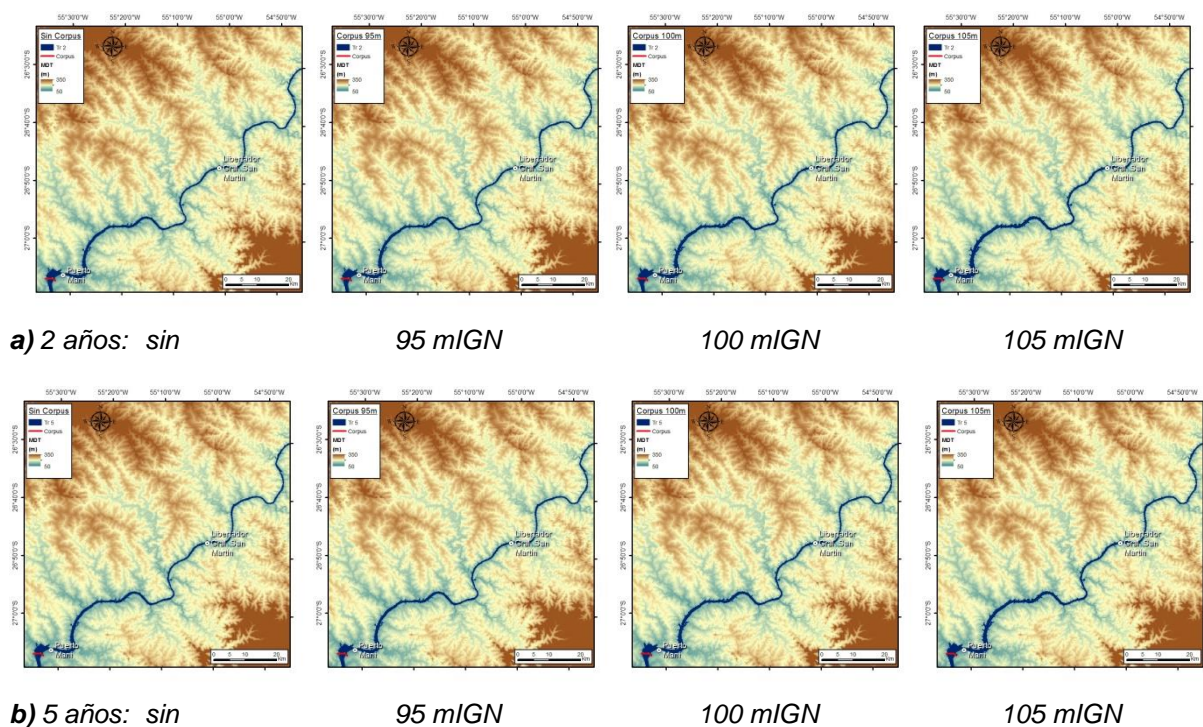


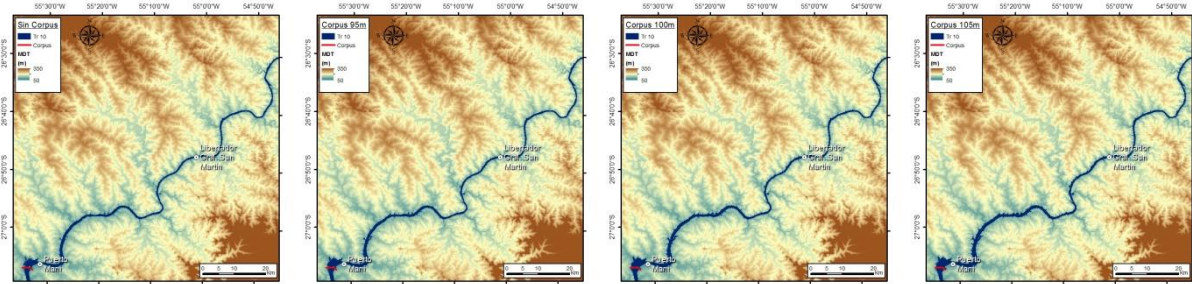
c) 95 mIGN

Figura 3.14. Sobrelevaciones con suavizado para distintos escenarios hidrológicos y cotas de Corpus.

3.6 Mapas de inundación

Se construyeron los mapas de inundación del río Iguazú asociados a los escenarios de crecidas extremas descriptos en la sección anterior. Se utilizó como Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno el SRTM 4.1 de 30 m de paso de resolución, que fue recientemente liberada al público (anteriormente se disponía de una versión de 90 m de paso). Estos se muestran en la Figura 3.15. A la escala del dominio de modelación no se observan diferencias significativas en las zonas inundadas ni al variar las crecidas extremas para la misma condición de embalse de Corpus, ni al variar las condiciones de embalse de Corpus para la misma crecida extrema. En la Figura 3.16 se muestran los mapas correspondientes a sólo 4 casos en una escala ampliada, donde llegan a distinguirse algunas diferencias inmediatamente aguas arriba del cierre de Corpus. Esta relativa insensibilidad de la zona inundada a la variación de las condiciones hidrológicas y de embalse de Corpus se debe al carácter incisivo del cauce del río Iguazú.



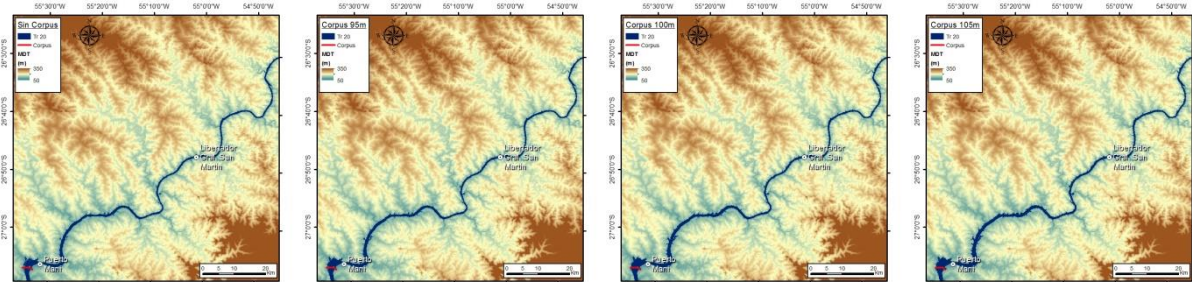


c) 10 años: sin

95 mIGN

100 mIGN

105 mIGN

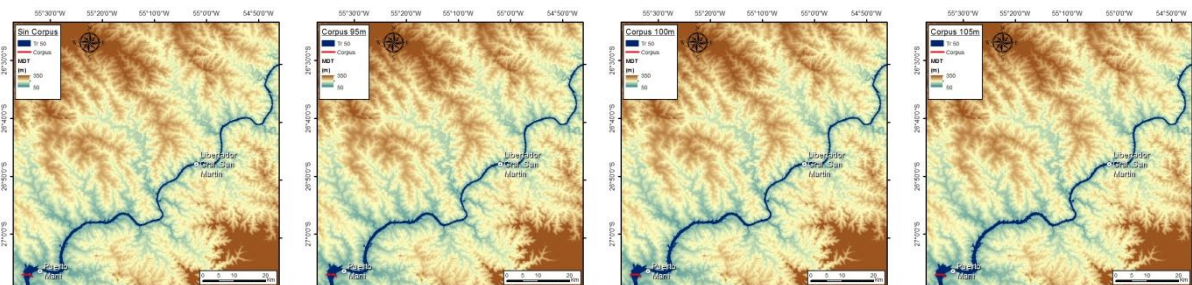


d) 20 años: sin

95 mIGN

100 mIGN

105 mIGN

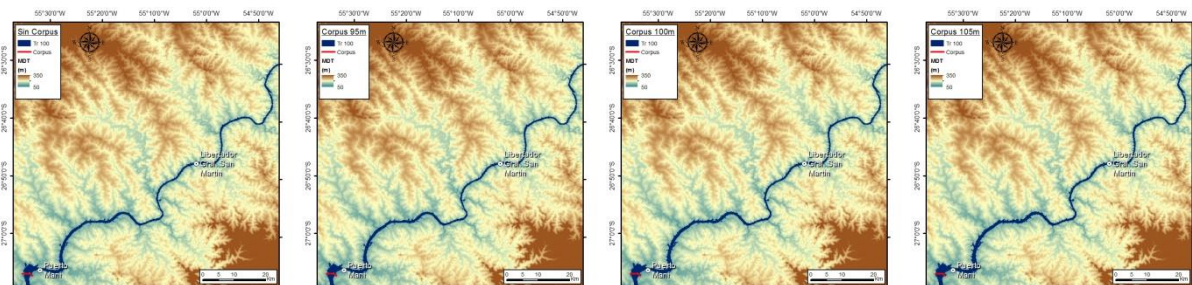


e) 50 años: sin

95 mIGN

100 mIGN

105 mIGN



f) 100 años: sin

95 mIGN

100 mIGN

105 mIGN

Figura 3.15. Mapas de inundación para escenarios de crecidas extremas sin Corpus y distintas condiciones de embalse de Corpus.

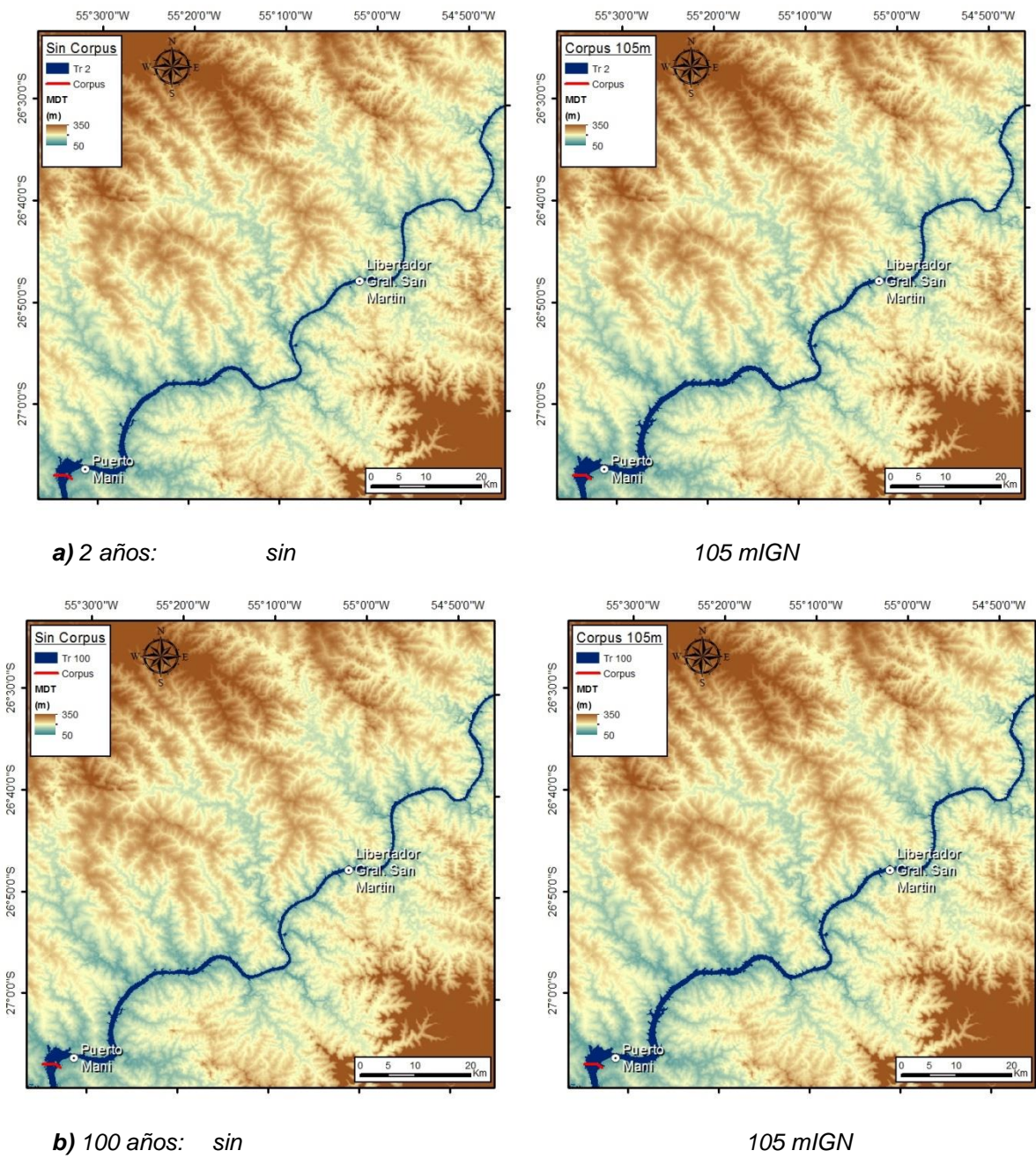


Figura 3.16. Mapas de inundación seleccionados para escenarios de crecidas extremas y distintas condiciones de embalse de Corpus.

4 MODELO EXTENDIDO

4.1 Implementación

El modelo utilizado en el presente estudio se extiende hasta la localidad de Posadas, donde se dispone de registros para fijar condiciones de borde.

Se procedió a generar una versión extendida hasta el cierre de la presa de Yacyretá. Las secciones transversales del tramo adicional del modelo, sobre el embalse de Yacyretá, fueron generadas a partir del MDE disponible (Menéndez & Kazimierski 2012), que fue construido utilizando distintas fuentes de información topobatimétrica. Esta extensión, que consta de una sola rama, sigue como trayectoria la dirección principal del flujo hasta la sección coincidente con la presa Principal (Figura 4.1).

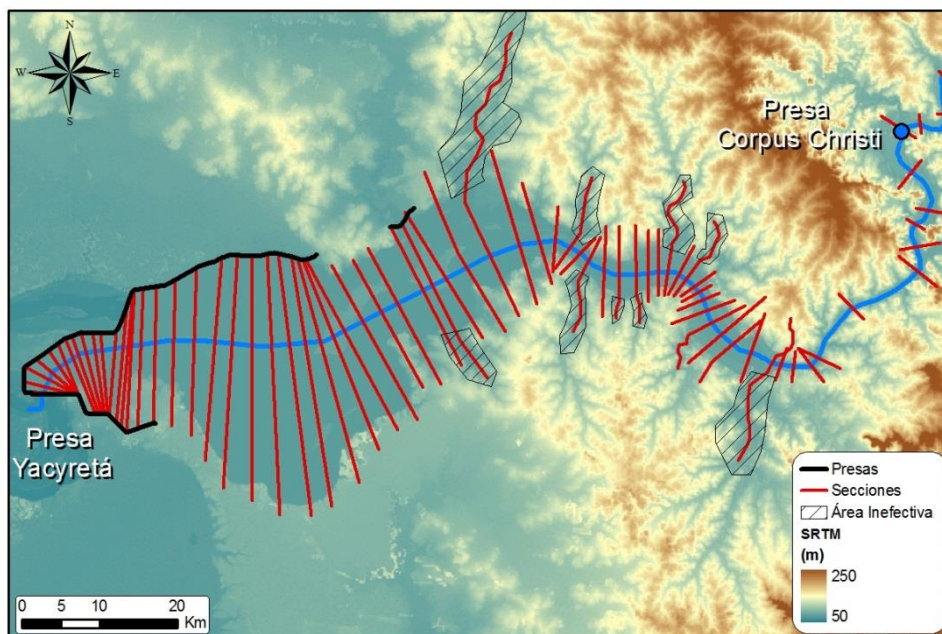
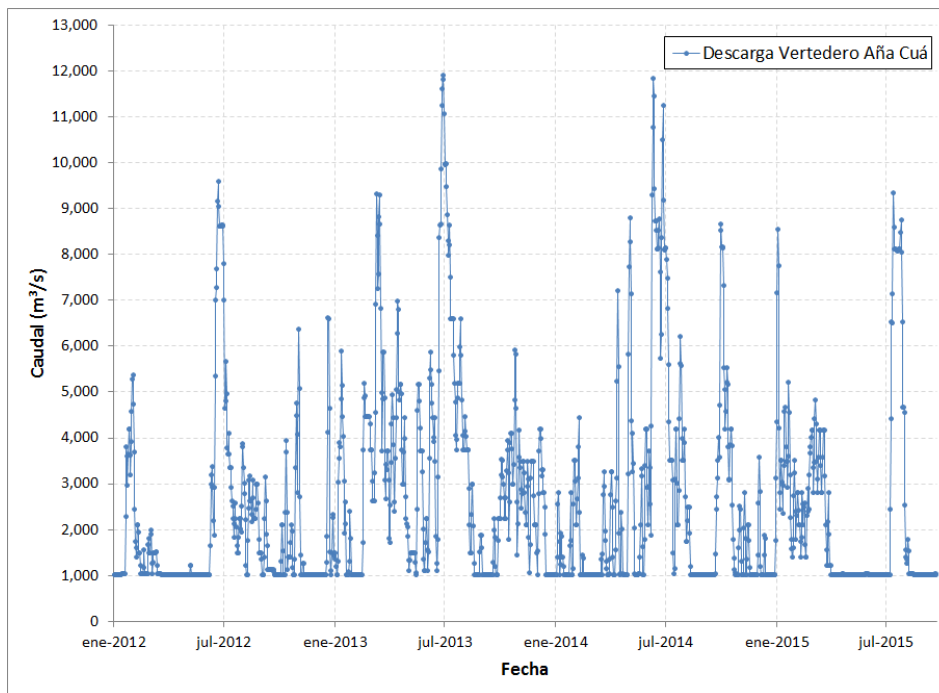


Figura 4.1. Secciones transversales del modelo hidrodinámico aguas abajo de Corpus.

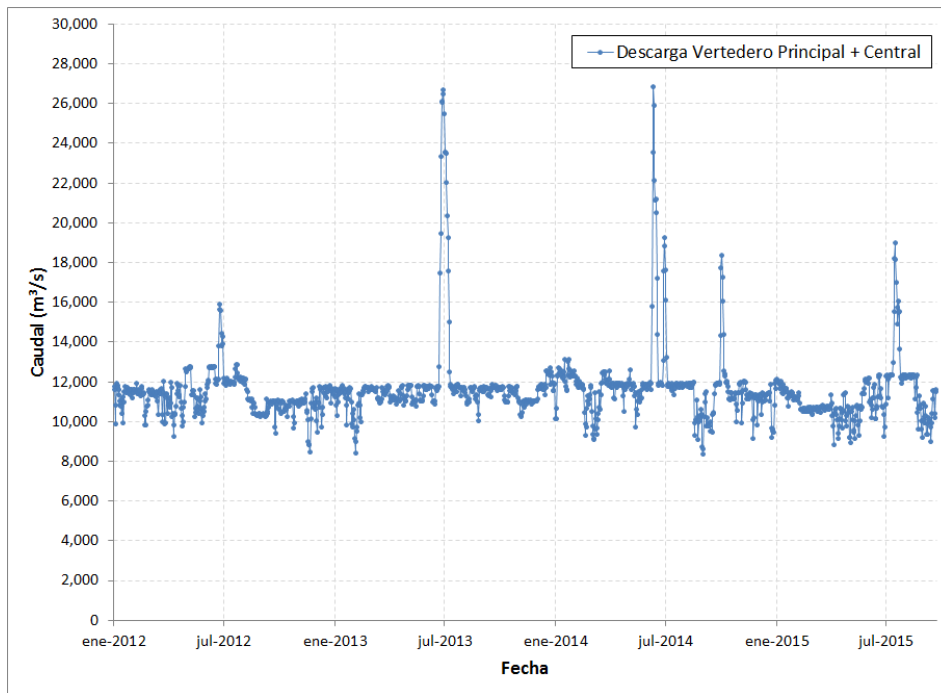
Las condiciones de borde se implementaron para tener en cuenta tanto el nivel del embalse como la erogación por sus distintas estructuras:

- En las secciones transversales lindantes con el vertedero Aña Cuá se impone, como vertedero lateral, el caudal saliente erogado por esa estructura.
- En la penúltima sección se aplica, como vertedero lateral, el caudal saliente calculado como suma de los erogados por el vertedero Principal y la Central.
- En la sección de aguas abajo se impone el nivel observado en la esclusa de navegación de la presa.

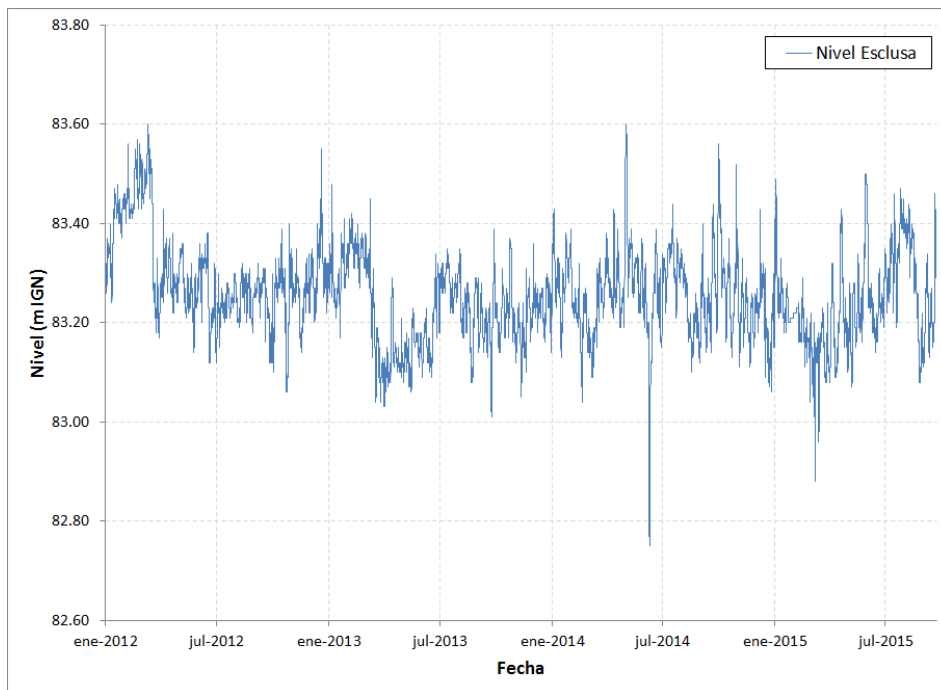
La Figura 4.2 presenta las series temporales que deberían aplicarse como condiciones de borde para la etapa histórica reciente.



a) Caudal erogado por Vertedero Aña Cua.



b) Caudal erogado por Vertedero Principal más Central.



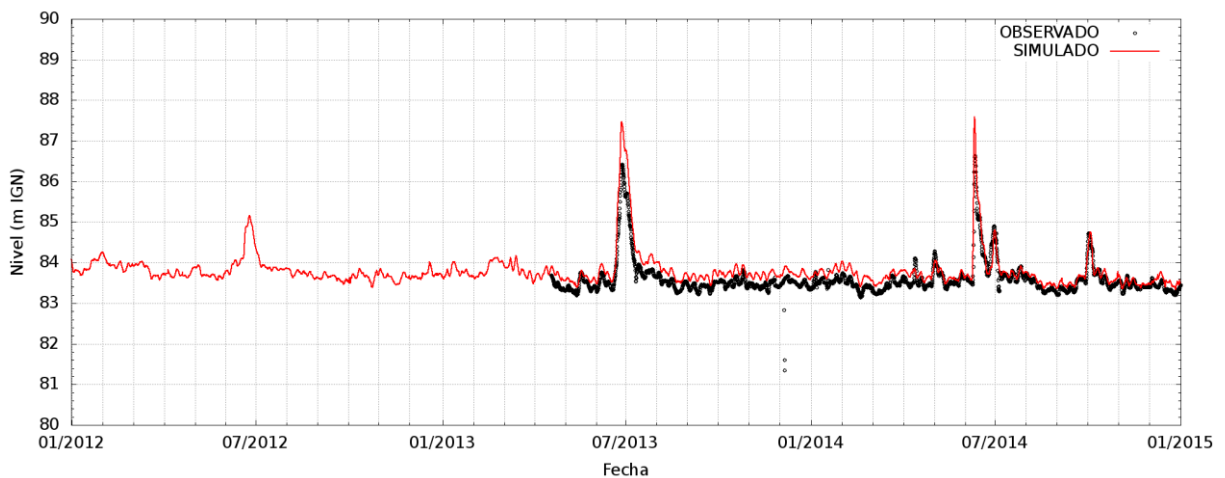
c) Nivel observado en Esclusa de Navegación del embalse de Yacyretá.

Figura 4.2. Condiciones de erogación y nivel en la presa de Yacyretá aplicado al modelo hidrodinámico.

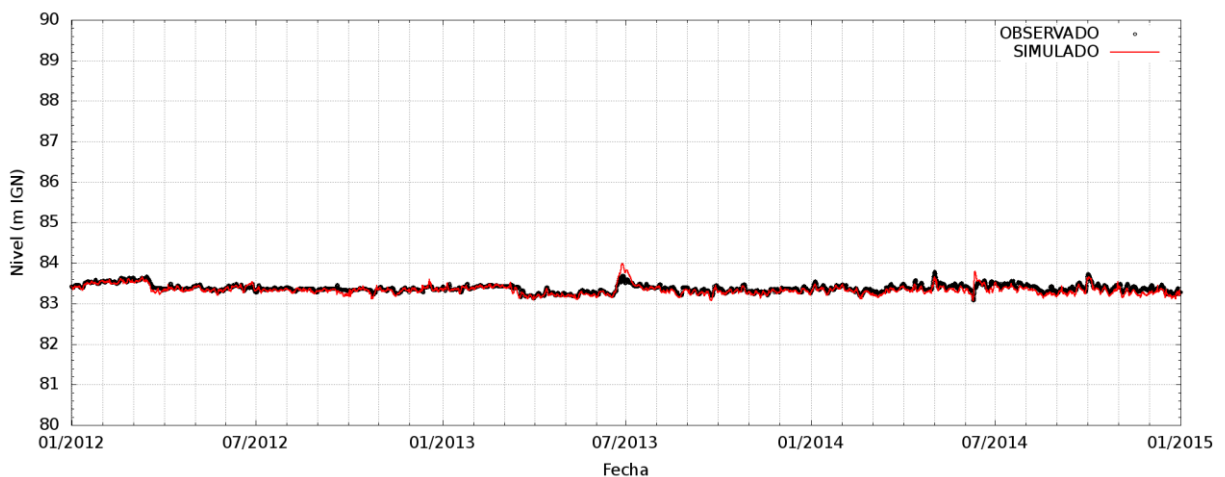
4.2 Calibración

El modelo generado se recalibró para las estaciones de Santa Ana y Posadas. La variable de ajuste fue la rugosidad caracterizada por el coeficiente de Manning de cauce y planicie de inundación. El período de calibración se extendió entre enero de 2012 y setiembre de 2015, durante el cual el embalse alcanzó su cota definitiva.

La Figura 4.3 muestra la comparación entre niveles registrados y calculados y la Tabla 4.1 los indicadores de bondad de ajuste. La calibración se considera satisfactoria.



a) Santa Ana



b) Posadas

Figura 4.3. Comparación entre niveles simulados y observados para etapa posterior al llenado.

Tabla 4.1. Indicadores de bondad de ajuste.

Estación	MED (m)	RMSE (m)	R ²	NSE
Santa Ana	-0,20	0,27	0,91	0,63
Posadas	0,05	0,07	0,74	0,36

5 CONCLUSIONES

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

- Se introdujo en el análisis de los escenarios con la presa de Corpus construida el efecto de suavizado producido por la existencia del embalse, a partir de la teoría desarrollada en el Tercer Informe Parcial en base a las observaciones del comportamiento del río Paraná luego de la construcción de la presa de Yacyretá.
- Las suavizaciones resultantes se manifiestan en reducciones significativas del coeficiente de rugosidad de Manning del cauce, alcanzando hasta el 40% para Corpus a cota 105 mGN. La suavización es más intensa para el tramo Inferior (que se extiende hasta el punto medio entre la estación San Martín y El Dorado), reduciéndose a una tercera parte para el tramo Medio (que se extiende hasta el punto medio entre las estaciones El Dorado y R11) y a una décima parte en el tramo Superior (que se extiende hasta el pie de Itaipú). Además, el efecto de suavización es más intenso cuanto mayor es la cota de embalse de Corpus.
- La incertidumbre sobre la rugosidad de las márgenes no representa una limitación para la precisión de los resultados del modelo, ya que la sensibilidad de los resultados a ese parámetro es muy baja.
- Por efecto del suavizado se producirán reducciones en las sobrelevaciones que generaría Corpus:

En la zona de Cataratas:

Con Corpus a 105 mIGN estas reducciones serían de algo menos de 0,4 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,85 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,1 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de 1,5 m para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN estas reducciones serían de alrededor de 0,1 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de algo menos de 0,4 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de 0,5 m para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Al pie de Itaipú:

Con Corpus a 105 mIGN estas reducciones serían de algo menos de 0,4 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,9 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,3 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de 1,8 m para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN estas reducciones serían de algo más de 0,2 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 0,5 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de 0,65 m para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

- Con el suavizado se producirán las siguientes sobrelevaciones por efecto de Corpus:

En la zona de Cataratas:

Con Corpus a 105 mIGN serían de algo más de 5 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo menos de 3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,8 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,8 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN serían de algo menos de 1 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,6 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 0,2 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,55 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Al pie de Itaipú:

Con Corpus a 105 mIGN serían de alrededor de 7 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo más de 3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,8 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,8 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN serían de algo menos de 2 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo menos de 1 m en Itaipú para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 0,2 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,55 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

- Dadas las incertidumbres debido a la ausencia de una base de datos limnimétricos en la zona de Cataratas, los resultados presentados para esa zona deberían considerarse como preliminares, sujetos a verificación. Además, dada la ausencia de datos batimétricos en el brazo del río Iguazú que se desarrolla entre Isla San Martín y Garganta del Diablo, los resultados correspondientes a esa zona deberían considerarse como estimaciones criteriosas que posiblemente constituyan sobrestimaciones en cuanto a las sobrelevaciones esperadas.
- Debido al carácter incisivo del cauce del río Iguazú, se observa una relativa insensibilidad de la zona inundada a la variación de las condiciones hidrológicas y de embalse de Corpus.
- Se generó una versión extendida del modelo hasta el cierre de la presa de Yacyretá, ya que hasta el momento aquel se extendía hasta Posadas.

REFERENCIAS

Menéndez A.N., Kazimierski, L.D., 2012, Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción Frente a Emergencias). Segundo Informe Parcial. Topografía y Batimetría – Modelo Digital de Elevación, Informe LHA 02-332-12. Comitente: Entidad Binacional Yacyretá.

Van Rijn L. C., 1984, Sediment Transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness, Journal of Hydraulic Engineering, 110-12, pp 1733-1754.