



**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**

### **Segundo Informe Parcial**



*Proyecto LHA 357  
Informe LHA 02-357-15  
Ezeiza, Agosto de 2015*

**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

## Segundo Informe Parcial

### RESUMEN

Se presentan los datos disponibles en cada estación hidrométrica, incluyéndose información sobre estaciones no consideradas en la modelación preliminar. Se describe la información topobatómetrica adicional no considerada en la modelación preliminar, la cual es incorporada en la nueva versión del modelo. Se describe el nuevo criterio de representación de la resistencia hidráulica, el procedimiento automático implementado para la calibración de la nueva versión del modelo hidrodinámico, y los resultados para los escenarios previos al llenado y a cota definitiva.

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

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

## ÍNDICE

|            |  |          |
|------------|--|----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b>                                  | <b>3</b> |
| <b>2</b>   | <b>INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA</b>                      | <b>5</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Estaciones hidrométricas</b>                      | <b>5</b> |
| 2.1.1      | Estación Capanema                                    | 1        |
| 2.1.2      | Estación Puerto Andresito                            | 1        |
| 2.1.3      | Estación Perfil Tipo                                 | 3        |
| 2.1.4      | Estación Salto Cataratas                             | 3        |
| 2.1.5      | Estación Hotel Cataratas                             | 5        |
| 2.1.6      | Estación Puerto Macuco                               | 6        |
| 2.1.7      | Estación Puerto Iguazú                               | 6        |
| 2.1.8      | Estación CH Itaipú                                   | 6        |
| 2.1.9      | Estación R4  | 7        |
| 2.1.10     | Estación Puente de la Amistad                        | 8        |
| 2.1.11     | Estación R8  | 8        |
| 2.1.12     | Estación Ita Cajón                                   | 9        |
| 2.1.13     | Estación R11   | 10       |
| 2.1.14     | Estación Libertad                                    | 11       |
| 2.1.15     | Estación El Dorado                                   | 11       |
| 2.1.16     | Estación Libertador General San Martín (Puerto Rico) | 12       |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.1.17     | Estación Puerto Maní                   | 13        |
| 2.1.18     | Estación Santa Ana                     | 14        |
| 2.1.19     | Estación Ita Cua (Posadas)             | 14        |
| 2.1.20     | Estación Posadas                       | 16        |
| 2.1.21     | Estación CH Yacyretá                   | 17        |
| <b>2.2</b> | <b>Aportes Laterales</b>               | <b>18</b> |
| <b>3</b>   | <b>INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA</b>     | <b>25</b> |
| 3.1        | Secciones transversales                | 25        |
| 3.2        | Modelo <i>MOAGAR-3</i>                 | 27        |
| <b>4</b>   | <b>MODELO HIDRODINÁMICO</b>            | <b>30</b> |
| 4.1        | Secciones trasversales                 | 30        |
| 4.2        | Cálculo de la conductividad hidráulica | 30        |
| 4.3        | Calibración                            | 33        |
| 4.4        | Verificación                           | 39        |
| 4.5        | Escenario a cota definitiva            | 44        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSIONES</b>                    | <b>51</b> |
|            | <b>REFERENCIAS</b>                     | <b>53</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 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 este Segundo Informe Parcial se amplían las informaciones hidrométrica y topobatimétrica, y se presenta una versión actualizada del modelo hidrodinámico hasta la localidad de Posadas. La organización del informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se presenta el detalle de los datos disponibles en cada estación hidrométrica, incluyéndose información sobre estaciones no consideradas en la modelación preliminar.
- En el capítulo 3 se describe la información topobatimétrica adicional no considerada en la modelación preliminar, la cual es incorporada en la nueva versión del modelo.
- En el capítulo 4 se describe el nuevo criterio de representación de la resistencia hidráulica, el procedimiento automático implementado para la calibración de la nueva versión del modelo hidrodinámico, y los resultados para los escenarios previos al llenado y a cota definitiva.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones de esta etapa del estudio.

## 2 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

### 2.1 Estaciones hidrométricas

En el Primer Informe Parcial se indicó la información hidrométrica (series de aforos y series temporales de niveles de agua y caudales medios diarios) disponible en 18 estaciones de medición de Argentina, Brasil y Paraguay ubicadas dentro de la zona de estudio.

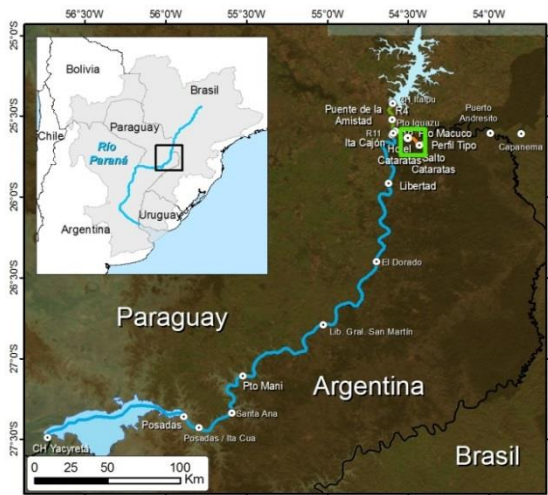
En esta fase del estudio se procedió a recabar mayor información, de modo de precisar la existente y eventualmente complementarla. La Figura 2.1 muestra la ubicación general de las estaciones, mientras que la Figura 2.2 las localiza con mayor grado de detalle. Las Tablas 2.1 y 2.2 presentan la información actualizada sobre ubicación, fuente de datos y ventanas temporales disponibles para cada estación.



**Figura 2.1.** Ubicación general de las estaciones con información hidrométrica.



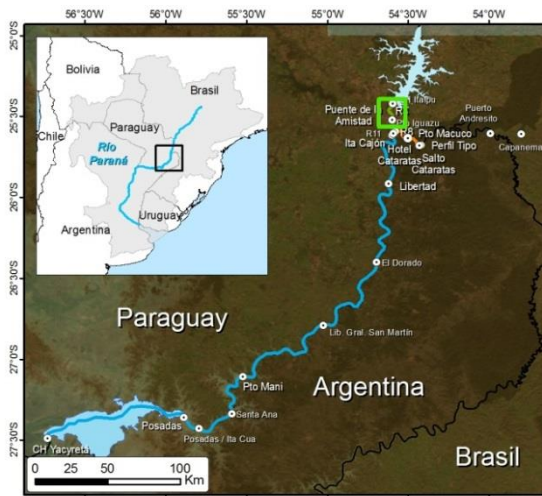
**a) Estaciones Andresito y Capanema**



**b) Estaciones Perfil Tipo, Salto Cataratas, Hotel Cataratas y Puerto Macuco**



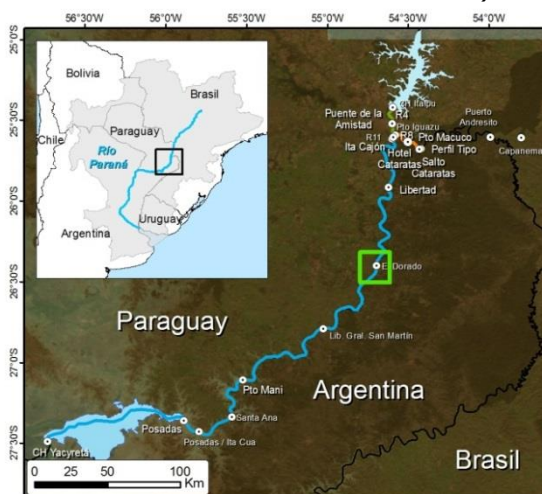
**c) Estaciones Puerto Iguazú, R8, Ita Cajón y R11**



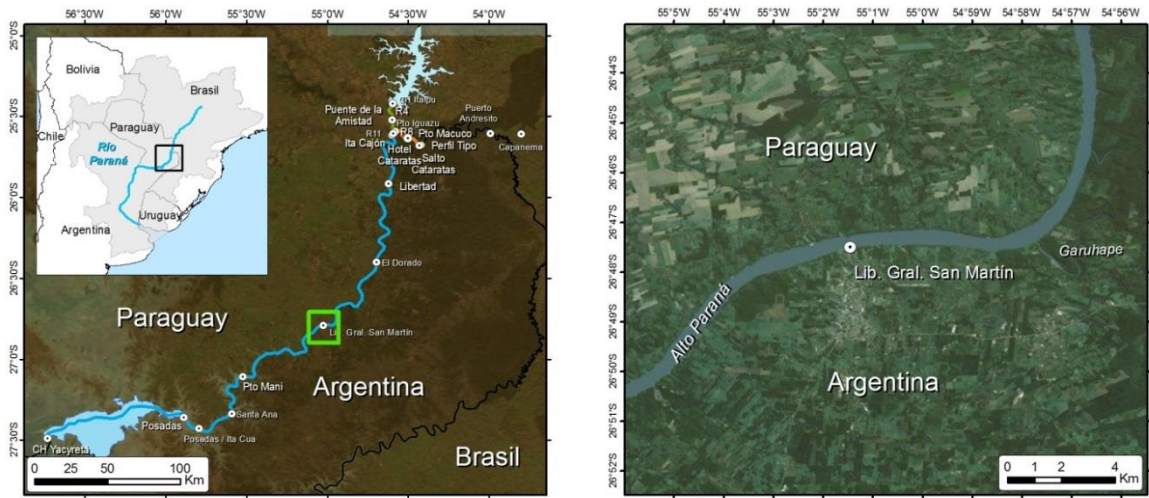
**d) Estaciones CH Itaipú, R4 y Puente de la Amistad**



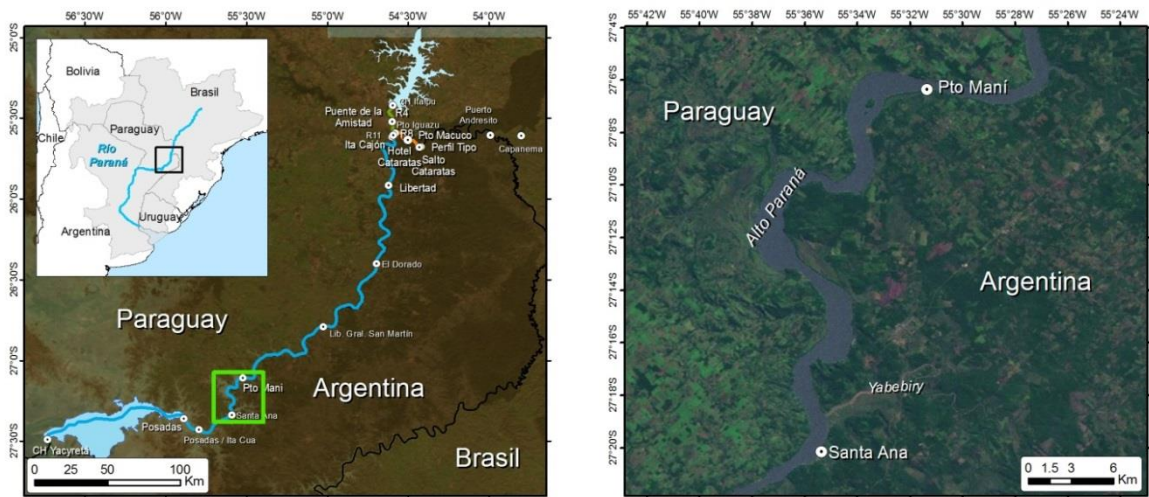
**e) Estación Libertad**



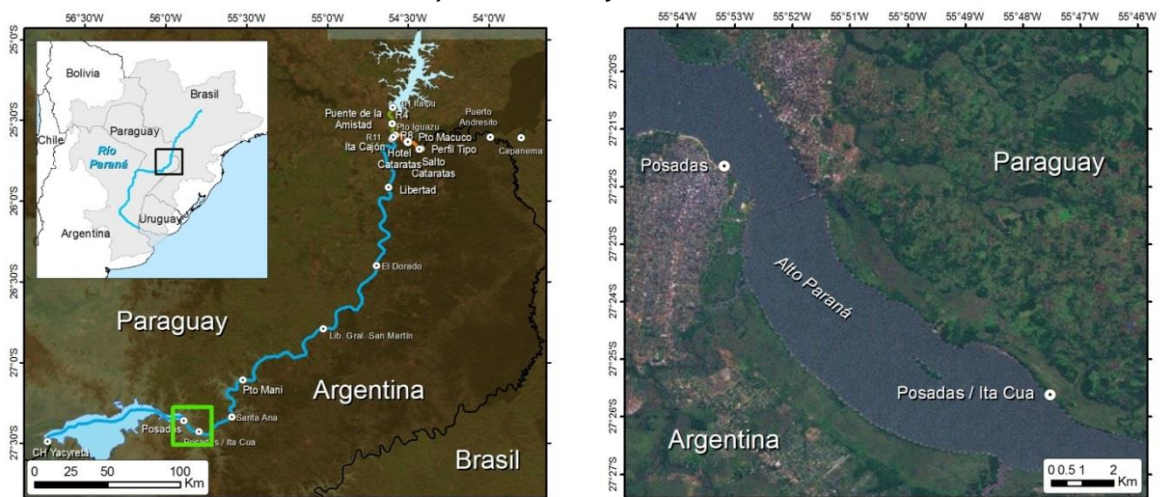
**f) Estación El Dorado**



**g) Estación Libertador General San Martín**



**h) Puerto Maní y Santa Ana**



**i) Estaciones Posadas Ita Cua y Posadas**

**Figura 2.2. Ubicación detallada de las estaciones con información hidrométrica.**

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

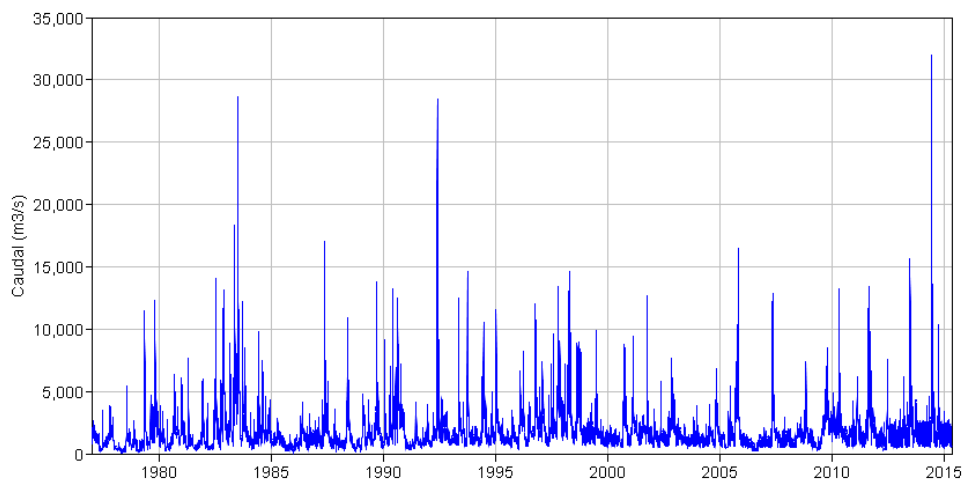
| #  | Río    | Estación             | Fuente              | Latitud       | Longitud      | Cero IGN | Aforos             | Niveles            | Caudales           |
|----|--------|----------------------|---------------------|---------------|---------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1  | Iguazú | Capanema             | Red ITAIPU – Brasil | 25° 36' 25" S | 53° 47' 59" W | NO       | NO                 | Ene/1977- Dic/1996 | Ene/1977- Jun/2015 |
| 2  | Iguazú | Puerto Andresito     | SSRH – Argentina    | 25° 35' 26" S | 53° 59' 42" W | 211,18   | May/1984- jun/2015 | Sep/1983- Jun/2015 | Sep/1983- Jun/2015 |
| 3  | Iguazú | Perfil Tipo          | SSRH – Argentina    | 25° 40' 36" S | 54° 25' 17" W | NO       | NO                 | Ene/1924- Jun/2015 | NO                 |
| 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 |
| 5  | Iguazú | Hotel Cataratas      | ANA – Brasil        | 25° 40' 59" S | 54° 26' 26" W | 180,16   | NO                 | Ene/1996- Dic/2014 | NO                 |
| 6  | Iguazú | Pto. Macuco          | COMIP               | 25° 38' 35" S | 54° 27' 57" W | 87,68    | NO                 | NO                 | 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 | NO       | NO                 | NO                 | Oct/1982- Jun/2015 |
| 9  | Paraná | R4                   | Red ITAIPU – Brasil | 25° 26' 43" S | 54° 36' 10" W | 94,48    | NO                 | Ene/1982- Dic/1983 | NO                 |
| 10 | Paraná | Puente de la Amistad | Red ITAIPU – Brasil | 25° 31' 16" S | 54° 35' 51" W | NO       | NO                 | Ene/1982- Dic/1993 | NO                 |
| 11 | Paraná | R8                   | Red ITAIPU – Brasil | 25° 36' 08" S | 54° 35' 52" W | 91,06    | NO                 | Ene/1977- Dic/2014 | NO                 |
| 12 | Paraná | Ita Cajón            | SSRH – Argentina    | 25° 36' 15" S | 54° 35' 34" W | NO       | NO                 | Nov/1987- Jun/2015 | NO                 |

| #  | Río    | Estación              | Fuente              | Latitud       | Longitud      | Cero IGN | Aforos                | Niveles               | Caudales              |
|----|--------|-----------------------|---------------------|---------------|---------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 13 | Paraná | R11                   | Red ITAIPU – Brasil | 25° 36' 53" S | 54° 35' 54" W | NO       | NO                    | Ago/1982-<br>Dic/2014 | Ago/1982-<br>Dic/2014 |
| 14 | Paraná | Libertad              | PNA – Argentina     | 25° 55' 0" S  | 54° 37' 15" W | 83,10    | NO                    | Ene/1931-<br>Jun/2015 | NO                    |
| 15 | Paraná | El Dorado             | PNA – Argentina     | 26° 24' 2" S  | 54° 41' 40" W | 79,66    | NO                    | Ene/1931-<br>May/2015 | NO                    |
| 16 | Paraná | Lib. Gral. San Martin | SSRH – Argentina    | 26° 47' 30" S | 55° 1' 27" W  | 78,13    | Abr/2008-<br>Jun/2015 | Sep/1939-<br>Jun/2015 | NO                    |
| 17 | Paraná | Puerto Maní           | PNA – Argentina     | 27° 6' 22" S  | 55° 31' 21" W | 79,51    | NO                    | Abr/1997-<br>Jun/2015 | NO                    |
| 18 | Paraná | Santa Ana             | PNA – Argentina     | 27° 20' 9" S  | 55° 35' 21" W | 75,04    | NO                    | Ene/1980-<br>Jun/2015 | NO                    |
| 19 | Paraná | Ita Cua (Posadas)     | SSRH – Argentina    | 27° 25' 37" S | 55° 47' 31" W | 74,04    | Dic/1955-<br>Feb/2008 | Ene/1901-<br>Oct/2002 | Ene/1901-<br>Oct/2000 |
| 20 | Paraná | Posadas               | PNA – Argentina     | 27° 21' 39" S | 55° 53' 11" W | 73,09    | NO                    | Ene/1901-<br>Jun/2015 | NO                    |
| 21 | Paraná | CHY                   | EBY                 | 27° 28' 58" S | 56° 44' 11" W | NO       | NO                    | NO                    | Ago/1994-<br>Jun/2015 |

A continuación se presenta una descripción complementaria de las estaciones y los datos asociados.

### **2.1.1 Estación Capanema**

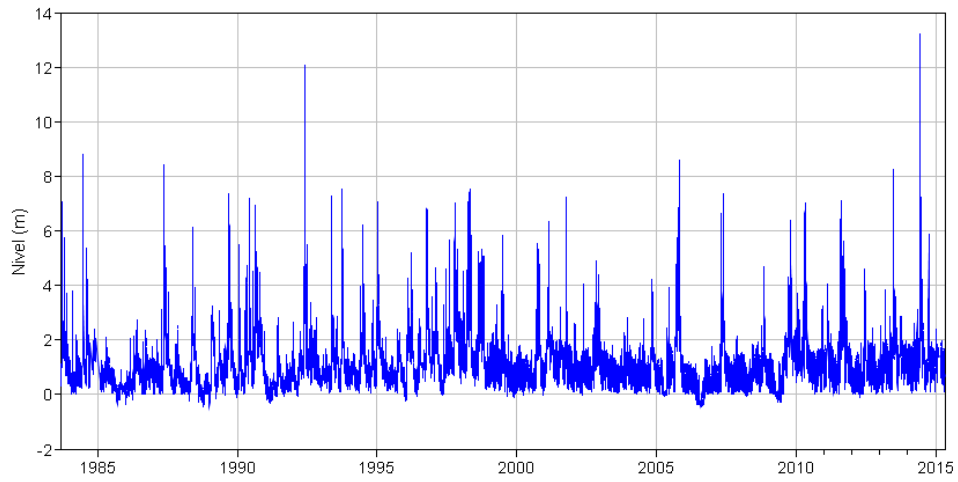
La estación Capanema pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 36' 25" S - 53° 47' 59" W, sobre la margen brasileña del río Iguazú, a 59,2 km aguas abajo de la presa de Salto Caixas (Figura 2.2a). En la Figura 2.3 se grafica la serie temporal de caudales disponible.



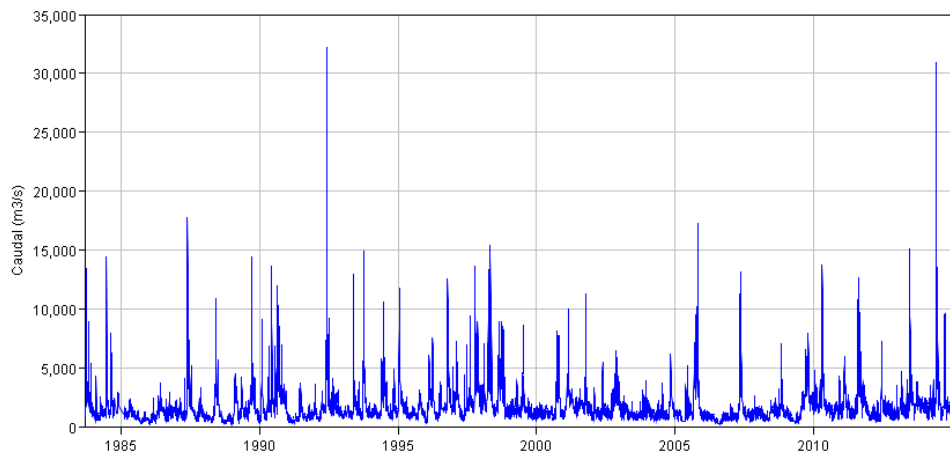
**Figura 2.3.** Serie de caudales en la estación Capanema.

### **2.1.2 Estación Puerto Andresito**

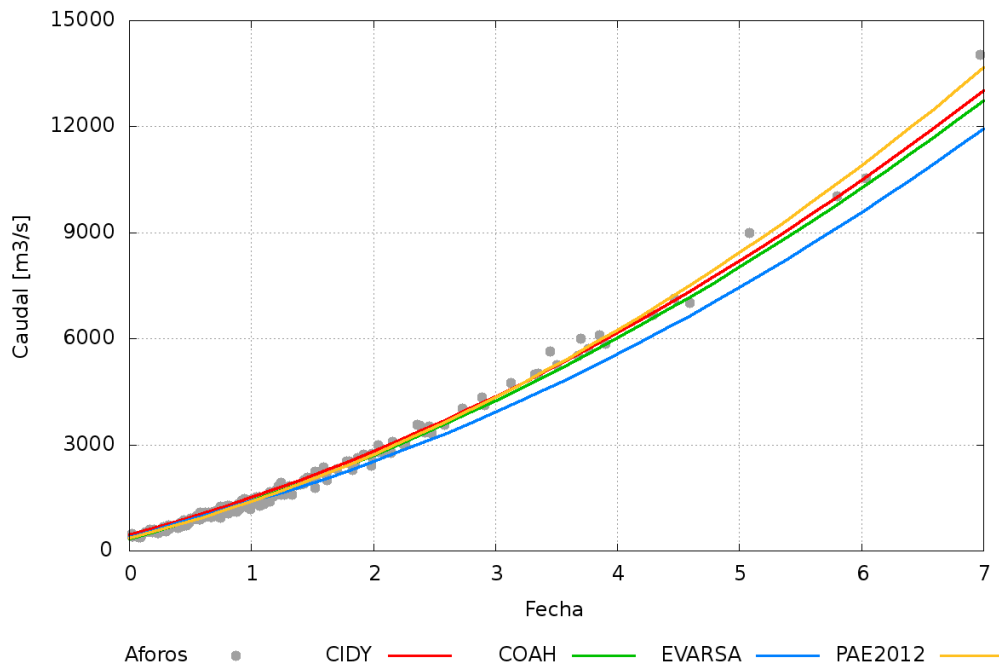
La estación Andresito pertenece a la red de la SSRH de Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 35' 26" S - 53° 59' 42" W, sobre la margen argentina del río Iguazú, a 91,6 km aguas abajo de la presa de Salto Caixas, y a 32,4 km de la estación Capanema (Figura 2.2a). El cero de la estación está a 211,18 mIGN. Las Figuras 2.4 y 2.5 presentan las series temporales de niveles y caudales disponibles en esta estación. Es interesante observar que el pico de nivel del año 92 es menor al del 2014, y sin embargo la relación es inversa para los caudales, lo cual indica que se utilizaron distintas relaciones altura-caudal en distintos períodos. La Figura 2.6 muestra los aforos disponibles y las curvas altura-caudal propuestas.



**Figura 2.4.** Serie de niveles en estación Andresito.



**Figura 2.5.** Serie de caudales en estación Andresito.



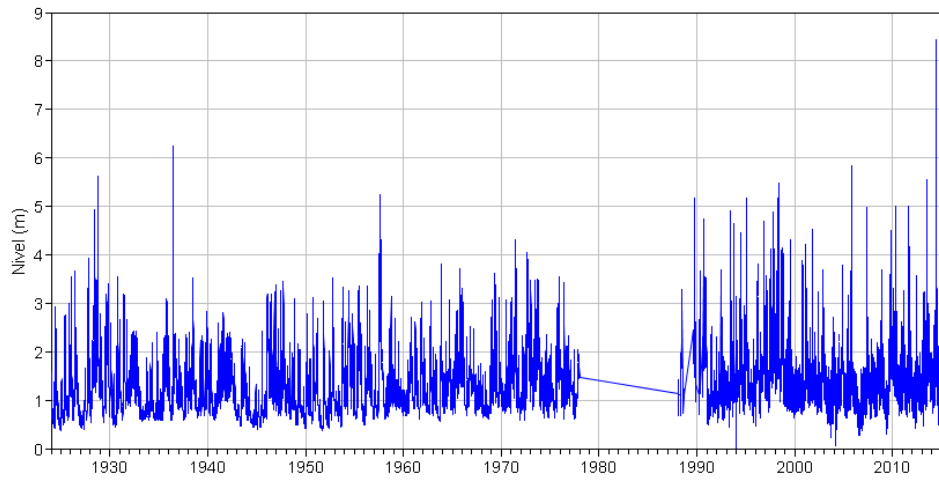
**Figura 2.6.** Aforos y curvas altura-caudal en estación Andresito.

### 2.1.3 Estación Perfil Tipo

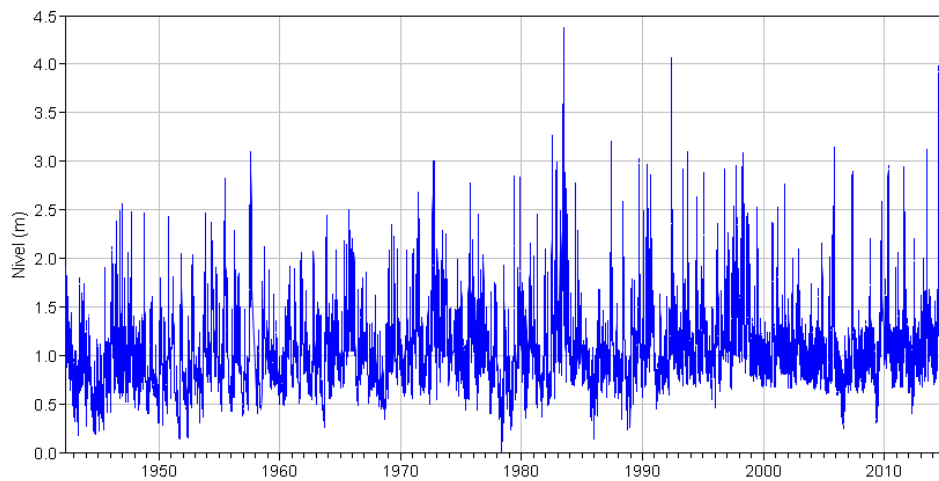
La estación Perfil Tipo pertenece a la red de la SSRH de Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 40' 36" S - 54° 25' 17" W, sobre la margen argentina del río Iguazú, frente a la estación Salto Cataratas, a 98,0 km de la estación Puerto Andresito, y a 4 km del Salto Garganta del Diablo de las Cataratas del Iguazú (Figura 2.2b). En la Figura 2.7 se grafica la serie temporal de niveles disponible.

### 2.1.4 Estación Salto Cataratas

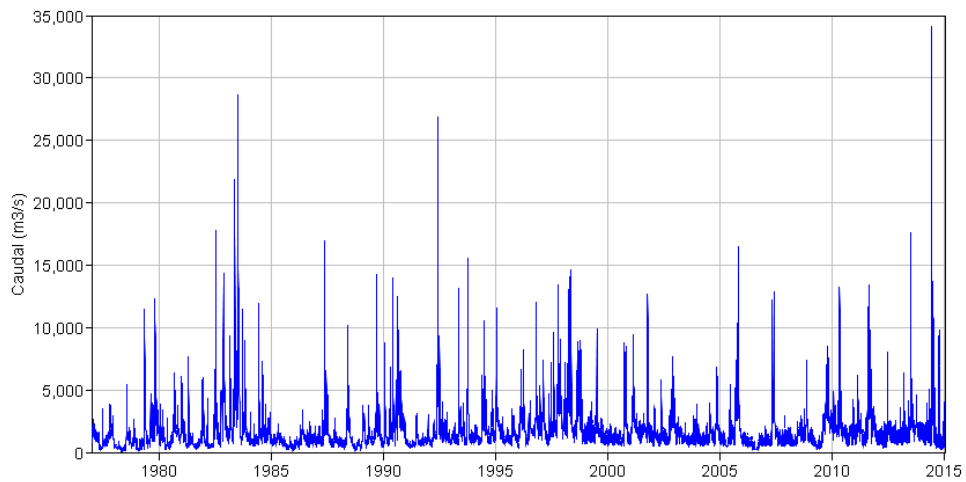
La estación Salto Cataratas pertenece a la red de la ANA de Brasil. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 40' 48" S - 54° 25' 48" W, sobre la margen brasileña del río Iguazú, frente a la estación Perfil Tipo, a 98,0 km de la estación Puerto Andresito, y a 4 km del Salto Garganta del Diablo de las Cataratas del Iguazú (Figura 2.2b). El cero de la estación está a 152,06 mIGN. Las Figuras 2.8 y 2.9 presentan las series temporales de niveles y caudales disponibles en esta estación.



**Figura 2.7.** Serie de niveles en estación Perfil Tipo.



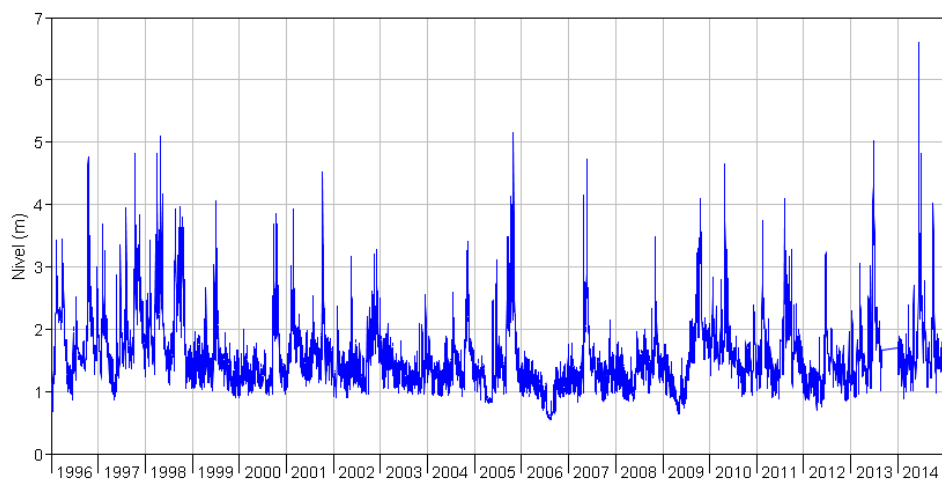
**Figura 2.8.** Serie de niveles en la estación Salto Cataratas.



**Figura 2.9.** Serie de caudales en la estación Salto Cataratas.

### 2.1.5 Estación Hotel Cataratas

La estación Hotel Cataratas pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 40' 59" S - 54° 26' 26" W, sobre la margen brasileña del río Iguazú, inmediatamente aguas abajo de las Cataratas (a metros de los saltos Dos Hermanas y Lanusse), y a metros del Belmond Hotel de las Cataratas (Figura 2.2b). El cero de la estación está a 180,16 mIGN. La Figura 2.10 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



**Figura 2.10.** Serie de niveles en la estación Hotel Cataratas.

### 2.1.6 Estación Puerto Macuco

La estación Puerto Macuco pertenece a la red de la COMIP de Argentina y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 38' 35''$  S -  $54^{\circ} 27' 57''$  W, sobre la margen argentina del río Iguazú, a 5,2 km aguas abajo de la estación Hotel Cataratas, a 17,2 km aguas arriba de la estación Puerto Iguazú, y a 18,2 km de la confluencia con el río Paraná (Figura 2.2b). El cero de la estación está a 125,00 mIGN. Esta estación se encuentra aún en etapa de prueba, no habiendo provisto resultados útiles.

### 2.1.7 Estación Puerto Iguazú

La estación Puerto Iguazú pertenece a la red de la COMIP de Argentina y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 35' 36''$  S -  $54^{\circ} 34' 47''$  W, sobre la margen argentina del río Iguazú, frente a la ciudad de Puerto Iguazú, a 17,2 km aguas abajo de la estación Puerto Macuco, y a 1,0 km de la confluencia con el río Paraná (Figura 2.2c). El cero de la estación está a 87,68 mIGN. La Figura 2.11 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.

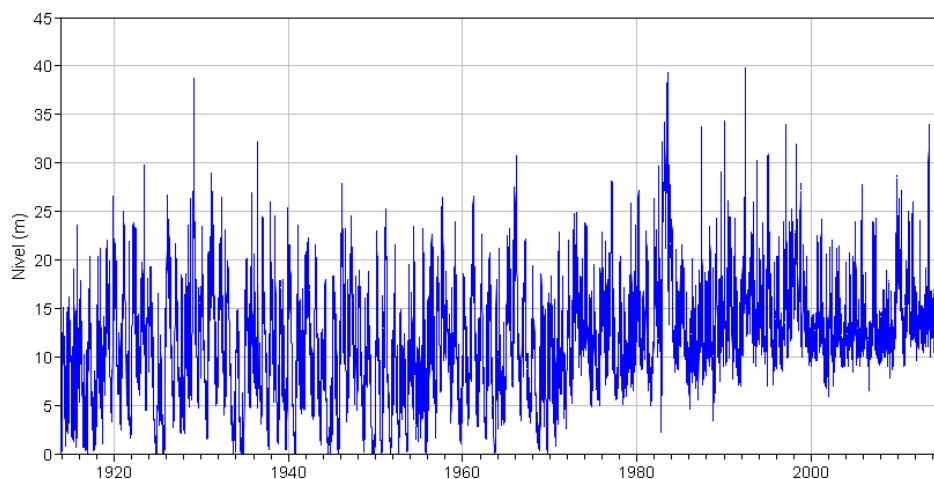
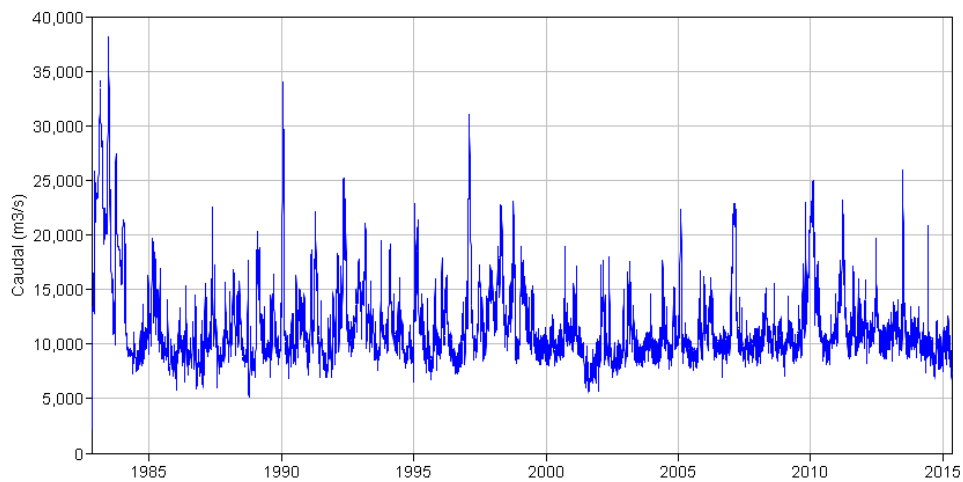


Figura 2.11. Serie de niveles en Puerto Iguazú.

### 2.1.8 Estación CH Itaipú

Se ha denominado estación Central Hidroeléctrica Itaipú (CH Itaipú) a la relacionada con los datos de caudal erogados por dicha presa. Se la ubica en las coordenadas  $25^{\circ} 24' 29''$  S -  $54^{\circ} 35' 21''$  W, sobre la propia presa en el río Paraná, a 22,0 km aguas arriba de la confluencia con el río Iguazú, y a 4,3 km de la estación R4 (Figura 2.2d). La Figura 2.12 presenta la serie temporal de caudales erogados disponibles en esta estación, que incluye lo descargado por el canal de fuga.



**Figura 2.12.** Serie de caudales erogado de la Central Hidroeléctrica Itaipú.

### 2.1.9 Estación R4

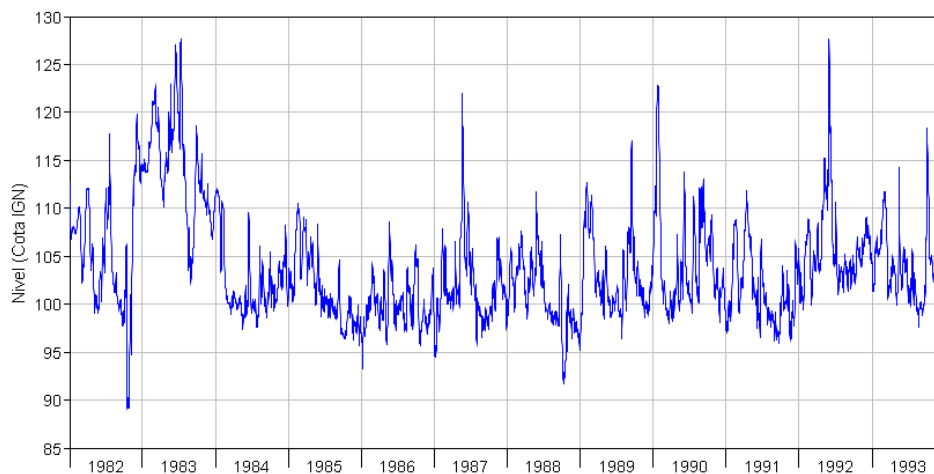
La estación R4 pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 26' 43" S - 54° 36' 10" W, sobre la margen brasileña del río Paraná, a 4,3 km de la presa de Itaipú, y 18,0 km aguas arriba de la confluencia con el río Iguazú (Figura 2.2d). El cero de la estación está a 94,48 mIGN. La Figura 2.13 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación, que es muy corta en extensión.



**Figura 2.13.** Serie de niveles en la estación R4.

### **2.1.10 Estación Puente de la Amistad**

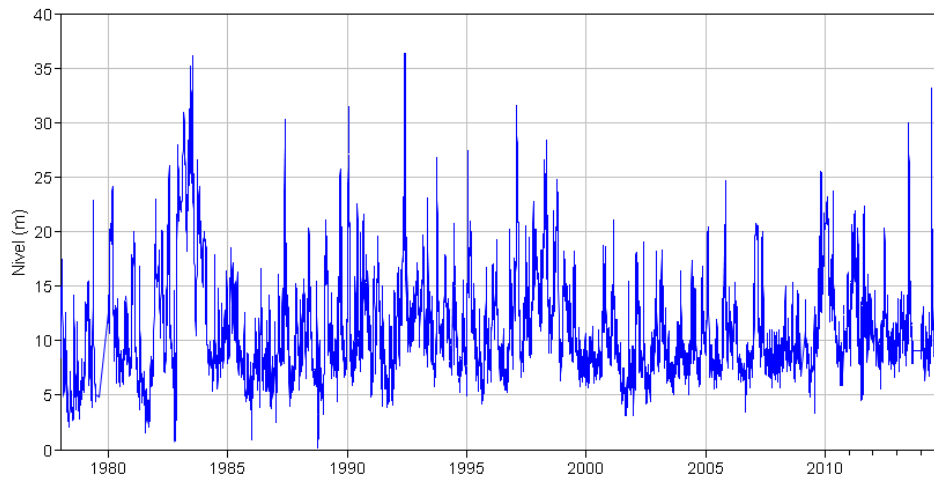
La estación Puente de la Amistad pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 31' 16''$  S -  $54^{\circ} 35' 51''$  W, sobre margen brasileña del río Paraná, a 14,0 km aguas abajo de la presa de Itaipú, y a 8,0 km aguas arriba de la confluencia con el río Iguazú (Figura 2.2d). La Figura 2.14 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



**Figura 2.14.** Serie de niveles en la estación Puente de la Amistad.

### **2.1.11 Estación R8**

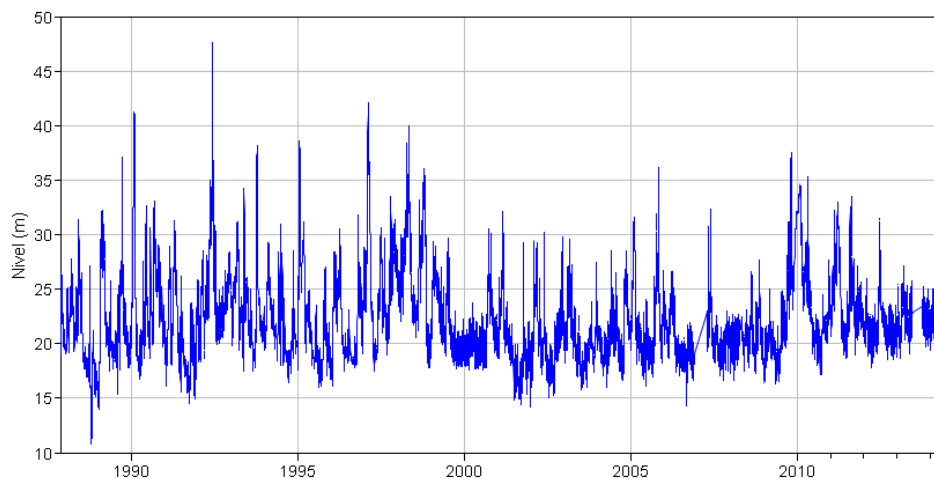
La estación R8 pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 36' 7.70''$  S -  $54^{\circ} 35' 51.71''$  W, sobre la margen paraguaya del río Paraná, a 1,0 km aguas abajo de la confluencia con el río Iguazú, y 1,4 km aguas arriba de la estación R11 (Figura 2.2c). El cero de la estación está a 91,06 mIGN. La Figura 2.15 presenta la serie temporal de niveles disponible en esta estación.



**Figura 2.15.** Serie de niveles en la estación R8.

### **2.1.12 Estación Ita Cajón**

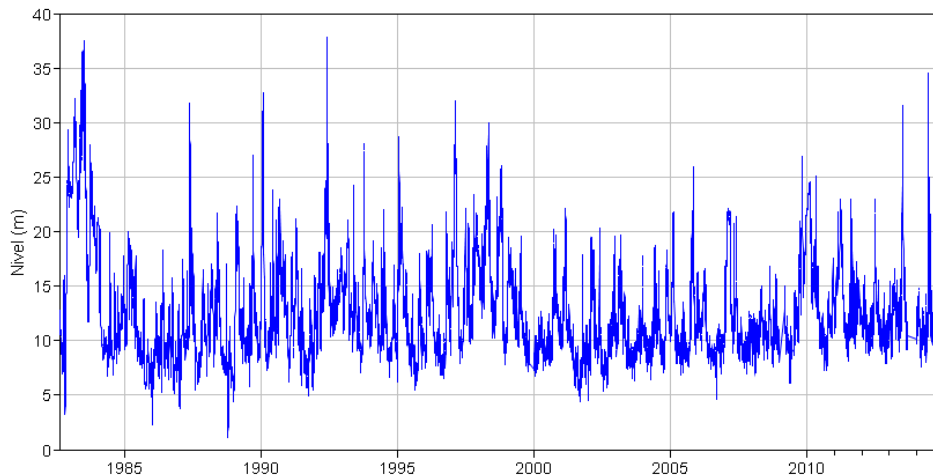
La estación Ita Cajón pertenece a la red de la SSRH de Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 36' 15" S - 54° 35' 34" W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 1,1 km aguas abajo de la confluencia con el río Iguazú, y 1,2 km aguas arriba de la estación R11 (Figura 2.2c). La Figura 2.16 presenta la serie temporal de niveles disponible en esta estación.



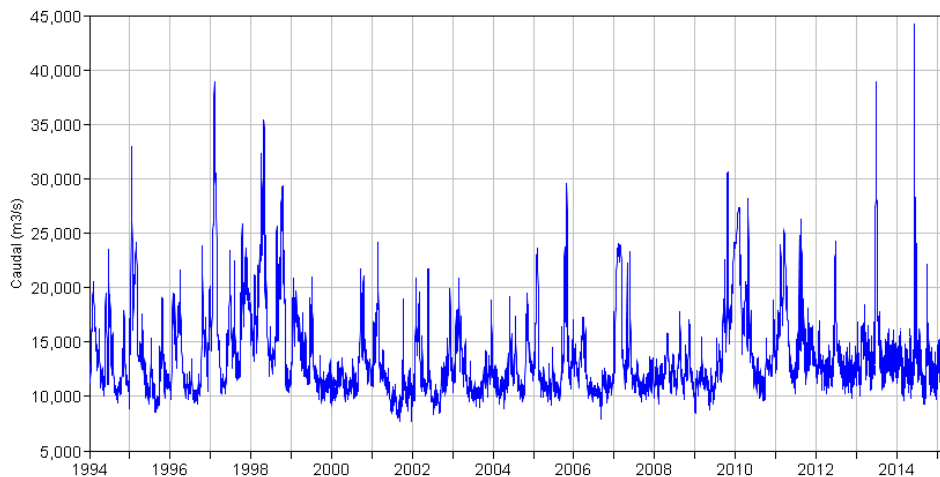
**Figura 2.16.** Serie de niveles en la estación Ita Cajón.

### 2.1.13 Estación R11

La estación R11 pertenece a la red Itaipú de Brasil y Paraguay. Se encuentra ubicada en las coordenadas 25° 36' 53" S - 54° 35' 54" W, sobre la margen paraguaya del río Paraná, a 2,3 km aguas abajo de la confluencia con el río Iguazú, y a 44,0 km aguas arriba de la estación Libertad (Figura 2.2c). Las Figuras 2.17 y 2.18 presentan las series temporales de niveles y caudales disponibles en esta estación.



**Figura 2.17.** Serie de niveles en la estación R11.



**Figura 2.18.** Serie de caudales en la estación R11.

### 2.1.14 Estación Libertad

La estación Libertad pertenece a la red de Prefectura Naval Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $25^{\circ} 55' 00''$  S -  $54^{\circ} 37' 15''$  W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 44,0 km aguas abajo de la estación R11, y 70,6 km aguas arriba de la estación El Dorado (Figura 2.2e). El cero de la estación está a 83,10 mIGN. La Figura 2.19 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.

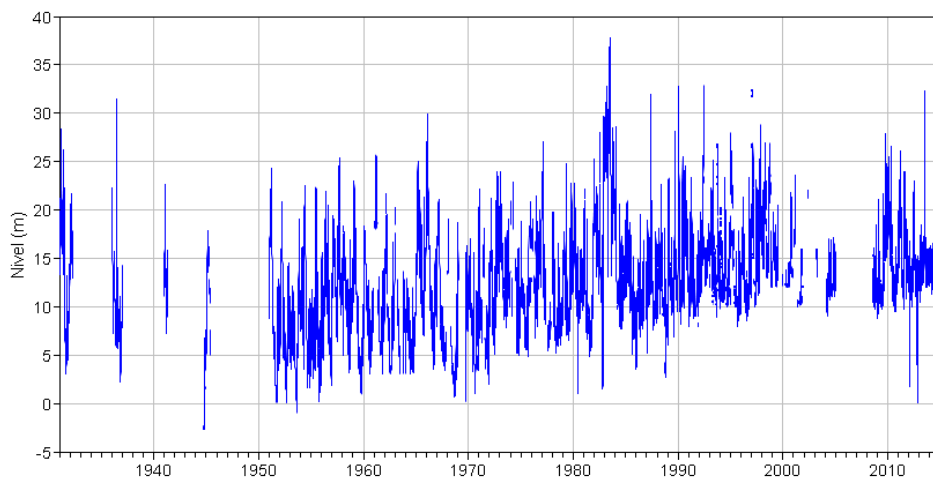
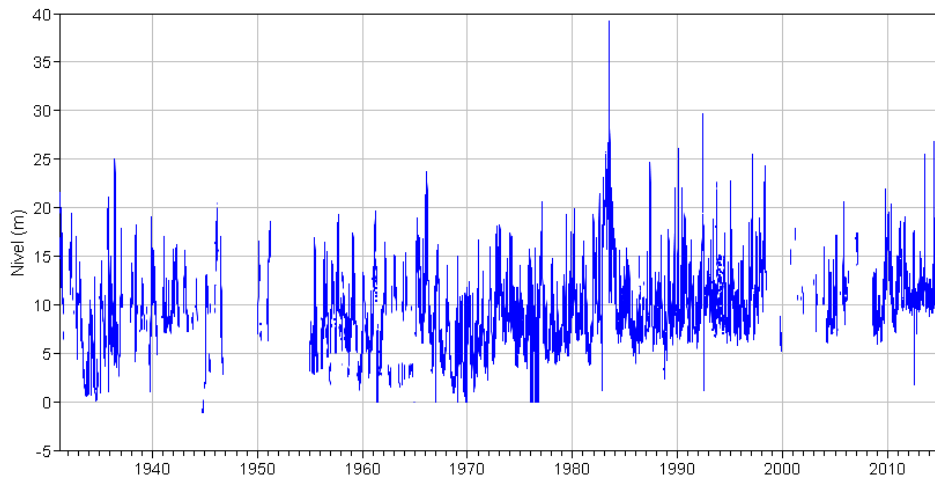


Figura 2.19. Serie de niveles en la estación Libertad.

### 2.1.15 Estación El Dorado

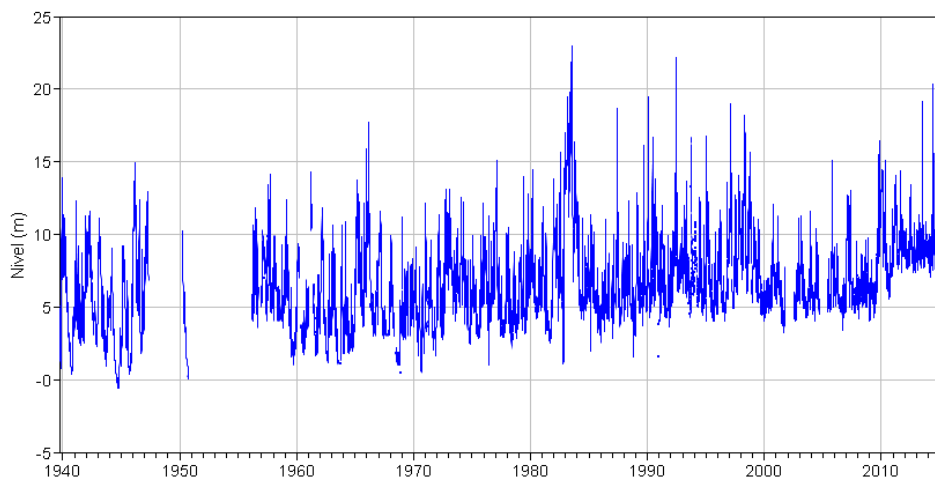
La estación El Dorado pertenece a la red de Prefectura Naval Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas  $26^{\circ} 24' 02''$  S -  $54^{\circ} 41' 40''$  W, sobre margen argentina del río Paraná, a 70,6 km aguas abajo de la estación Libertad, y a 68,5 km aguas arriba de la estación Libertador General San Martín (Puerto Rico) (Figura 2.2f). El cero de la estación está a 79,66 mIGN. La Figura 2.20 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



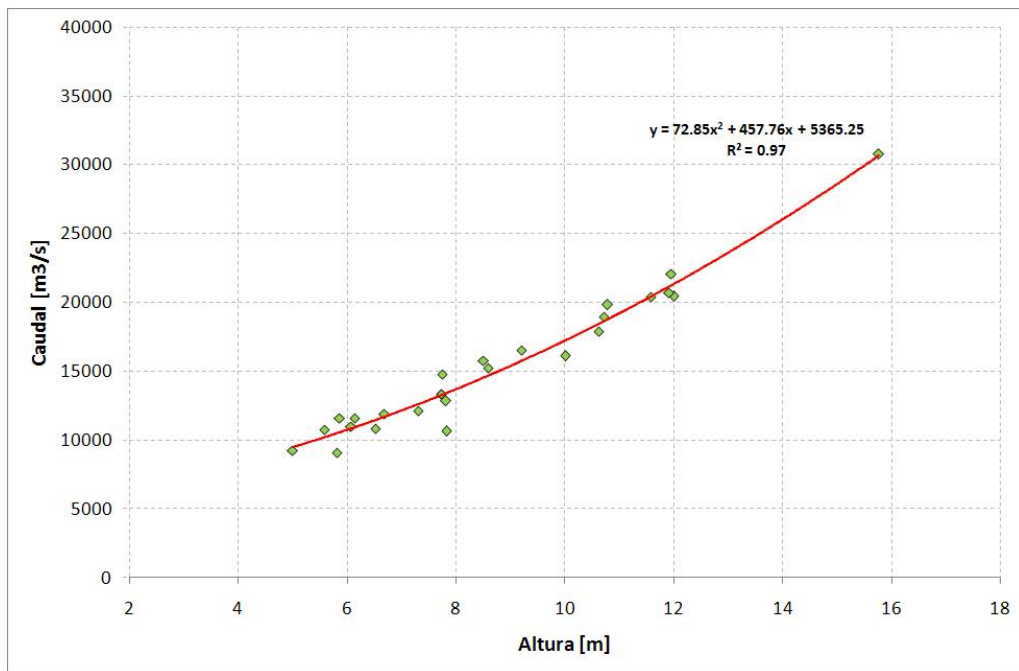
**Figura 2.20.** Serie de niveles en la estación El Dorado.

**2.1.16 Estación Libertador General San Martín (Puerto Rico)**

La estación Libertador General San Martín (Puerto Rico) pertenece a la SSRH de Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 26° 47' 30" S - 55° 01' 27" W sobre la margen argentina del río Paraná, a 68,5 km aguas abajo de la estación El Dorado, y a 77,5 km aguas arriba de la estación Puerto Maní (Figura 2.2g). El cero de la estación está a 78,13 mIGN. La Figura 2.21 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación. La Figura 2.22 muestra los aforos disponibles y la curva altura-caudal propuesta en el Estudio PAE.



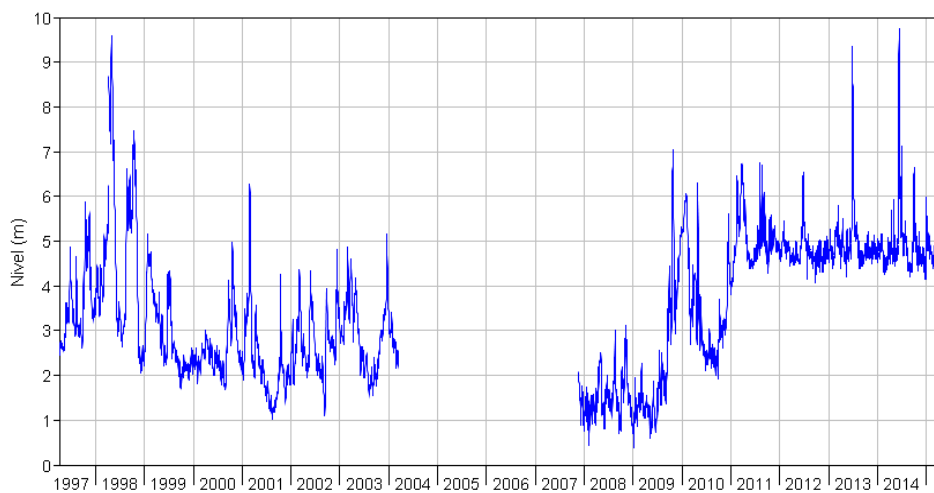
**Figura 2.21.** Serie de niveles en la estación Libertador General San Martín (Puerto Rico).



**Figura 2.22.** Aforos de caudal en la estación Libertador General San Martín (Puerto Rico).

### 2.1.17 Estación Puerto Maní

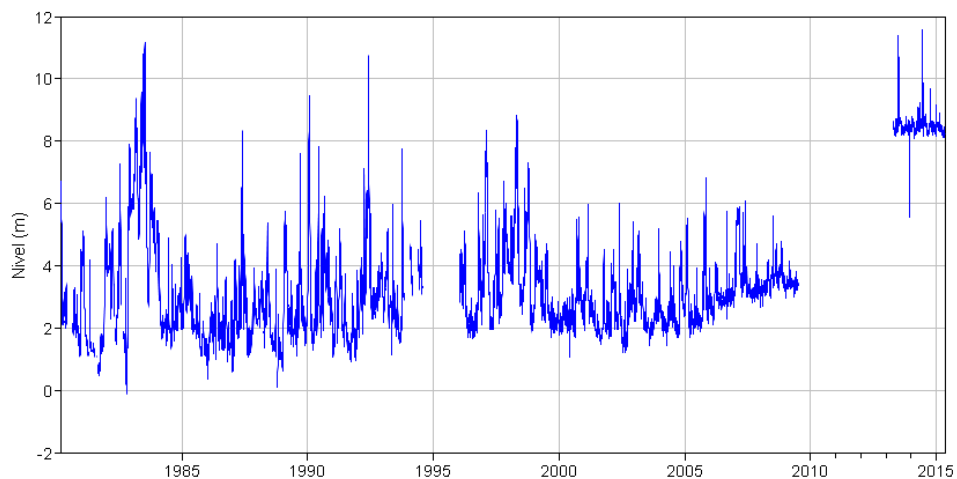
La estación Puerto Maní pertenece a la red de Prefectura Naval Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 27° 06' 22" S - 55° 31' 21" W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 77,5 km aguas abajo de la estación Libertador General San Martín, y a 37,9 km aguas arriba de la estación Santa Ana (Figura 2.2h). El cero de la estación está a 79,51 mIGN. La Figura 2.23 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



**Figura 2.23.** Serie de niveles en la estación Puerto Maní.

### 2.1.18 Estación Santa Ana

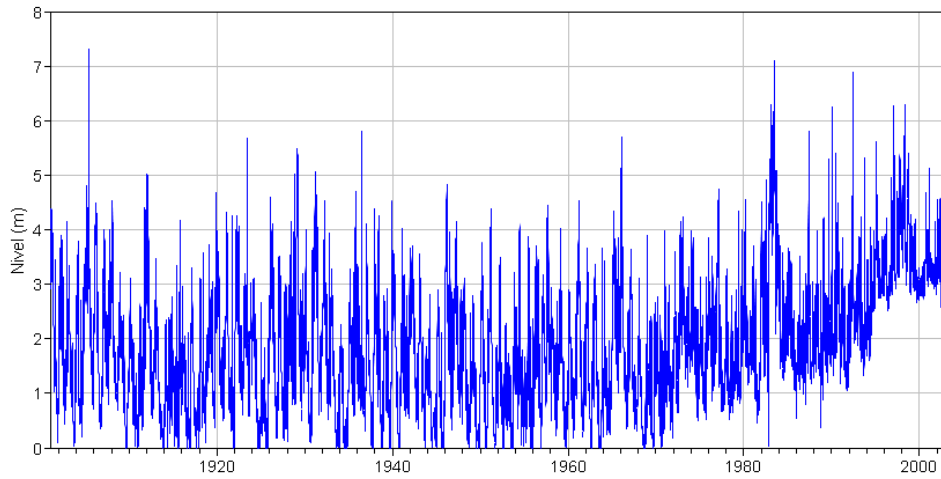
La estación Santa Ana pertenece a la red de Prefectura Naval Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 27° 20' 09" S - 55° 35' 21" W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 37,9 km aguas abajo de la estación Puerto Maní, y a 25,7 km aguas arriba de la estación Ita Cua (Posadas) (Figura 2.2h). El cero de la estación está a 75,04 mIGN. La Figura 2.24 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



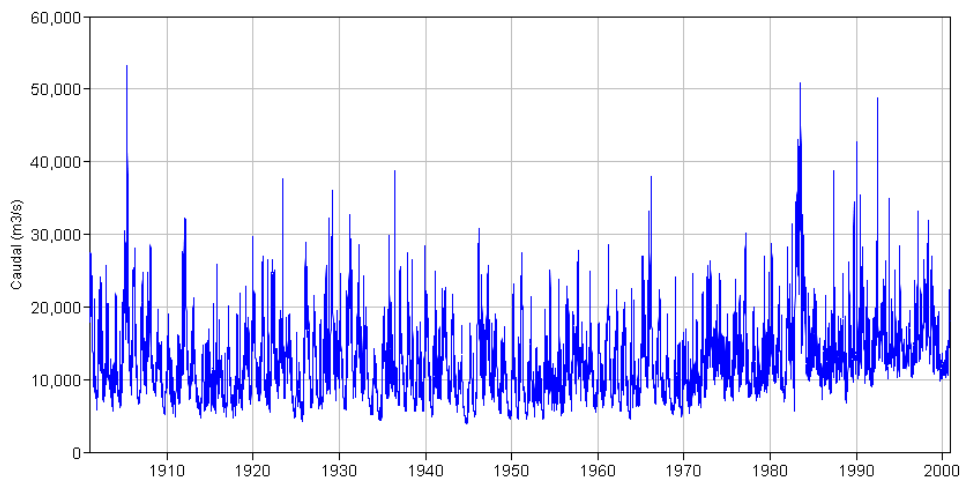
**Figura 2.24.** Serie de niveles en la estación Santa Ana.

### 2.1.19 Estación Ita Cua (Posadas)

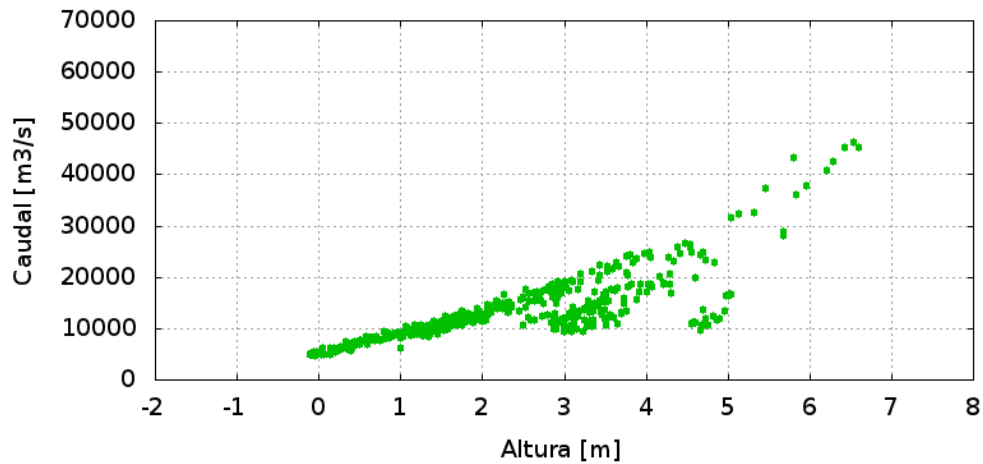
La estación Ita Cua (Posadas) pertenece a la red de la SSRH de Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 27° 25' 37" S - 55° 47' 31" W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 25,7 km aguas abajo de la estación Santa Ana, a 11,0 km aguas arriba de la estación Encarnación, y a 12,6 km de Posadas (Figura 2.2i). El cero de la estación está a 74,04 mIGN. La Figura 2.25 presenta la serie temporal de niveles y la Figura 2.26 la serie temporal de caudales disponibles en esta estación. La Figura 2.27 muestra los aforos disponibles.



**Figura 2.25.** Serie de niveles en la estación Ita Cua (Posadas).



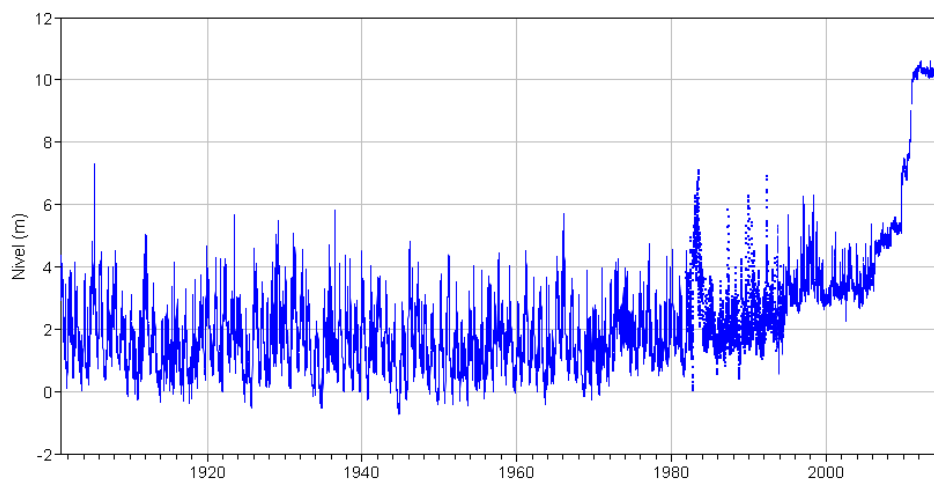
**Figura 2.26.** Serie de caudales en la estación Ita Cua (Posadas).



**Figura 2.27.** Serie de aforos en la estación Ita Cua (Posadas).

### 2.1.20 Estación Posadas

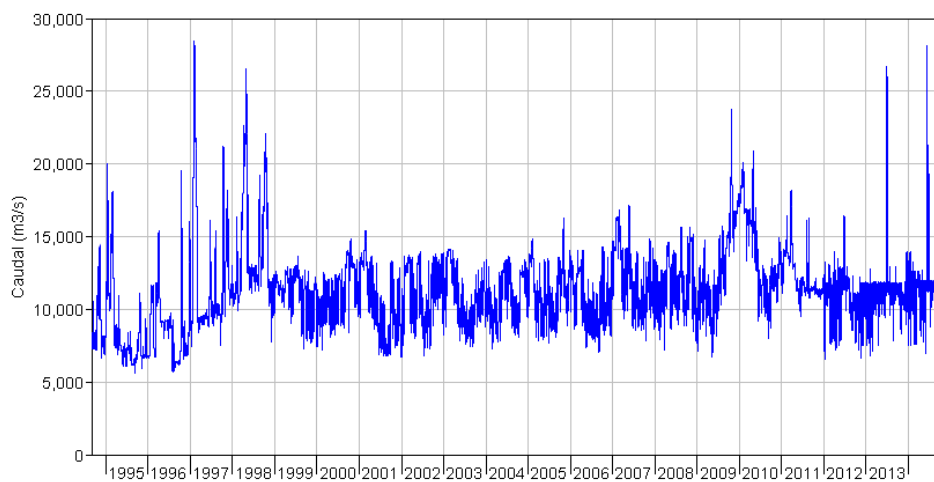
La estación Posadas pertenece a la red de Prefectura Naval Argentina. Se encuentra ubicada en las coordenadas 27° 21' 39" S - 55° 53' 11" W, sobre la margen argentina del río Paraná, a 12,6 km aguas abajo de la estación Ita cua (Posadas) (Figura 2.2i). El cero de la estación está a 73,09 mIGN. La Figura 2.28 presenta la serie temporal de niveles disponibles en esta estación.



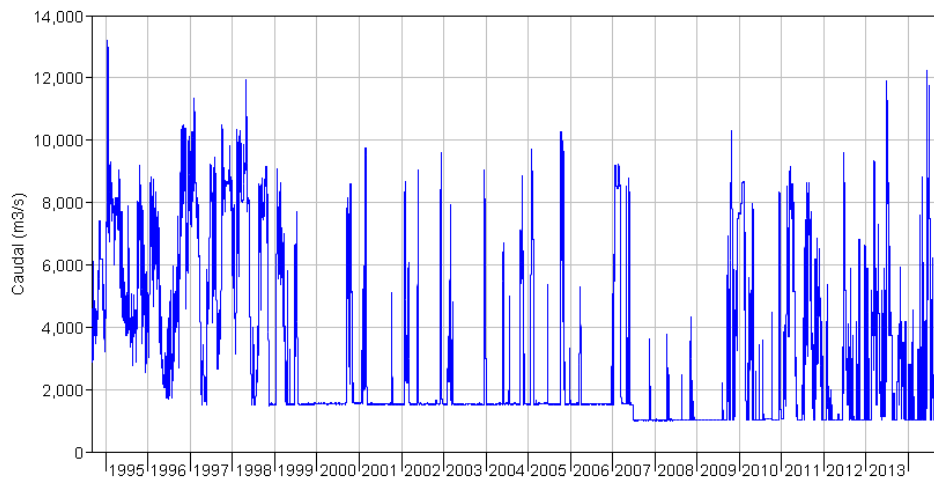
**Figura 2.28.** Serie de niveles en la estación Posadas.

### 2.1.21 Estación CH Yacyretá

Se ha denominado estación Central Central Hidroeléctrica Yacyretá (CH Yacyretá) a la relacionada con los datos de caudal erogados por dicha presa. Se la ubica en las coordenadas 27° 28' 58" S - 56° 44' 11" W , sobre la propia presa en el río Paraná, a 93,0 km aguas abajo de la estación Posadas (Figura 2.1). La presa posee una Central Hidroeléctrica con 18 turbinas sobre el Brazo Principal (que erogan un caudal máximo de 16.600 m<sup>3</sup>/s), un vertedero con 18 vanos también sobre el Brazo Principal (que puede erogar un máximo de 55.000 m<sup>3</sup>/s), y otro vertedero sobre el Brazo Aña Cua con 16 vanos (y una descarga máxima de 40.000 m<sup>3</sup>/s). Las Figuras 2.29 y 2.30 presentan las series temporales de caudales erogados disponibles en esta estación, descompuesto entre Brazo Principal y Brazo Aña Cua.



**Figura 2.29.** Caudal erogado por la Central Hidroeléctrica y el vertedero del Brazo Principal.



**Figura 2.30.** Caudal erogado por el vertedero del Brazo Aña Cua

## 2.2 Aportes Laterales

Los mayores aportes laterales al Alto Paraná, en la zona de modelación, provienen de la margen izquierda (Provincia de Misiones, Argentina). El área drenada es de 14.435 km<sup>2</sup>. Los principales cursos son el Urugua-i (2.528 km<sup>2</sup>), el Piray Guazu (2.135 km<sup>2</sup>), el Yabebiry (1.869 km<sup>2</sup>), el Piray Mini (1.459 km<sup>2</sup>) y el Paranay (1.311 km<sup>2</sup>) (Figura 2.31), que drenan el 64,4% del área de aporte. Las restantes son subcuencas menores.

Existen aforos en los arroyos Paranay, el Piray Mini, el Piray Guazu y el Yabebiry, los cuales son monitoreados en forma continua, cubriendo un 47% de la cuenca. Las series de caudales se presentan las Figuras 2.32 a 2.35.

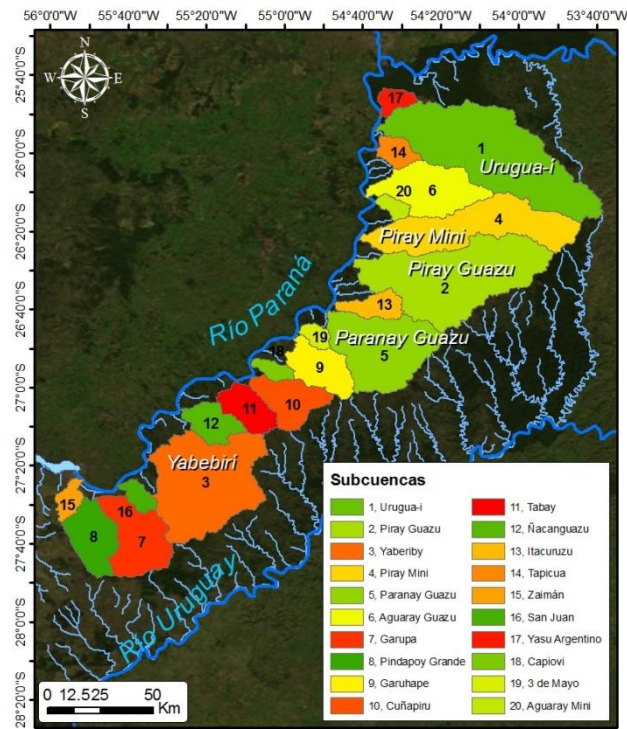


Figura 2.31. Cuencas de la Provincia de Misiones aportantes al Alto Paraná y estaciones de aforo.

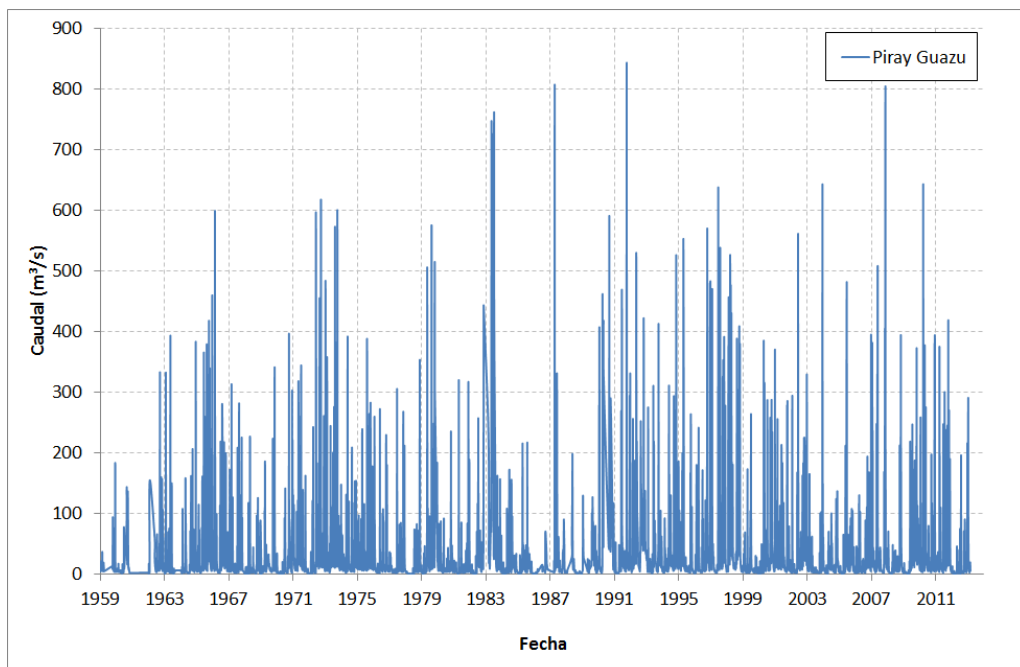
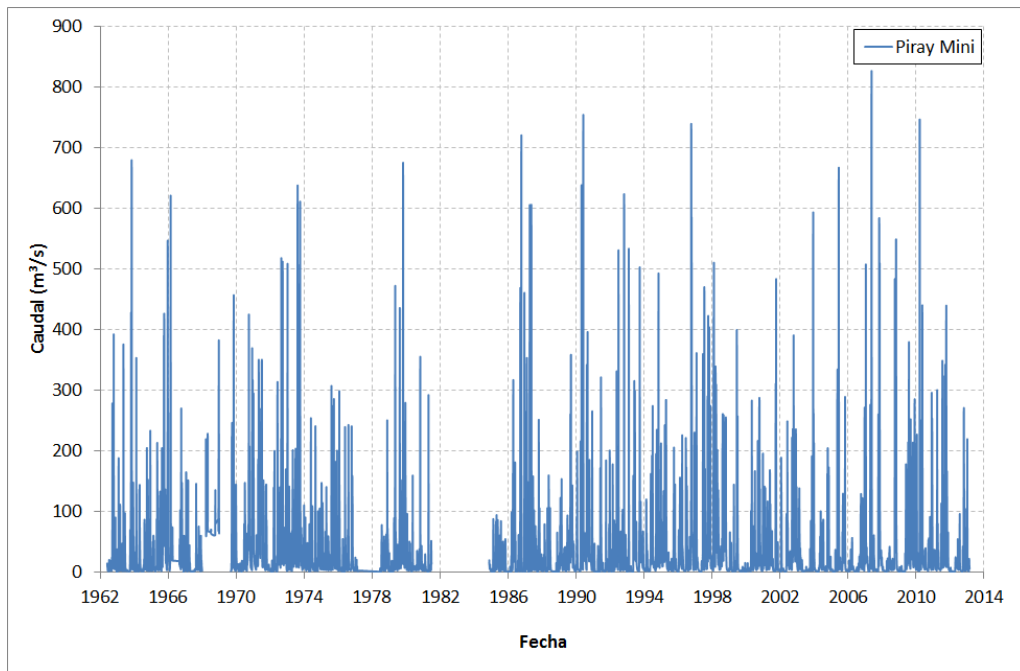
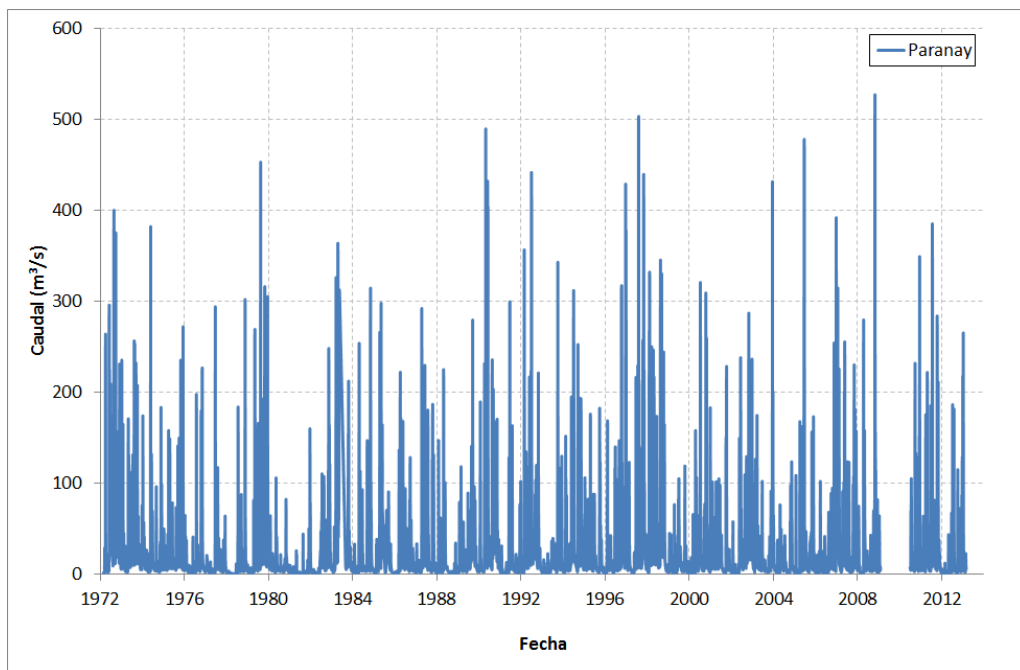


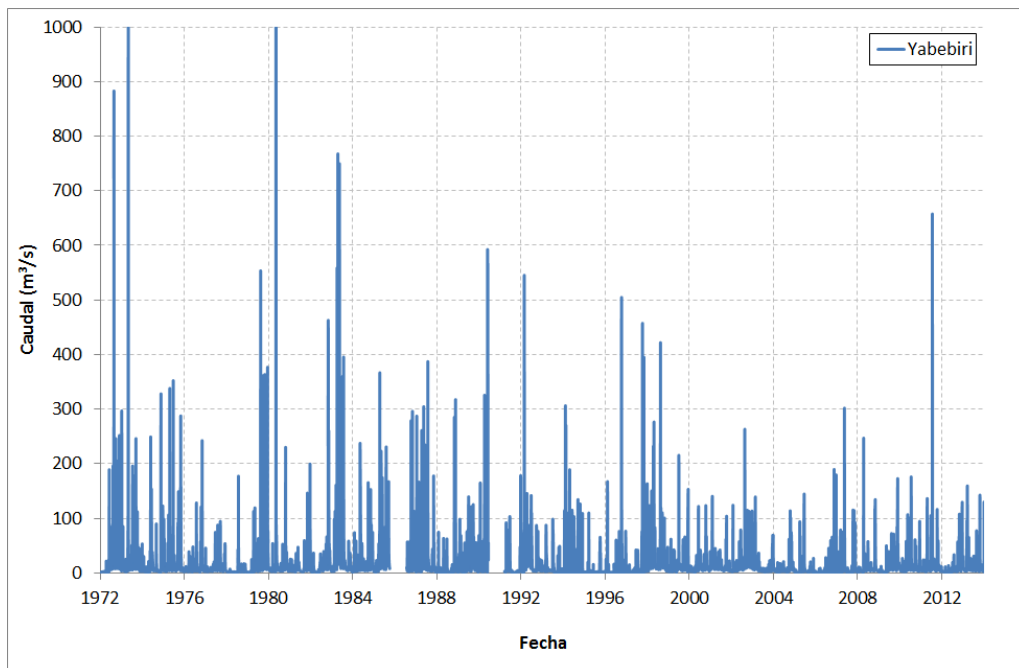
Figura 2.32. Serie de caudales de la estación Piray Guazú – Pinar Ciba.



**Figura 2.33.** Serie de caudales de la estación Piray Mini – Valle Hermoso.



**Figura 2.34.** Serie de caudales de la estación Pararay.

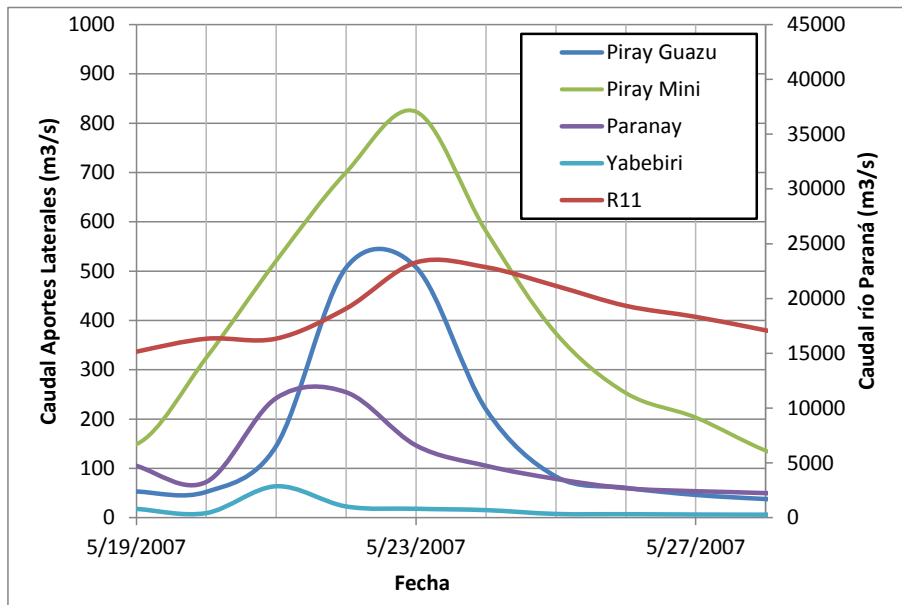


**Figura 2.35.** Serie de caudales de la estación Yabebiri.

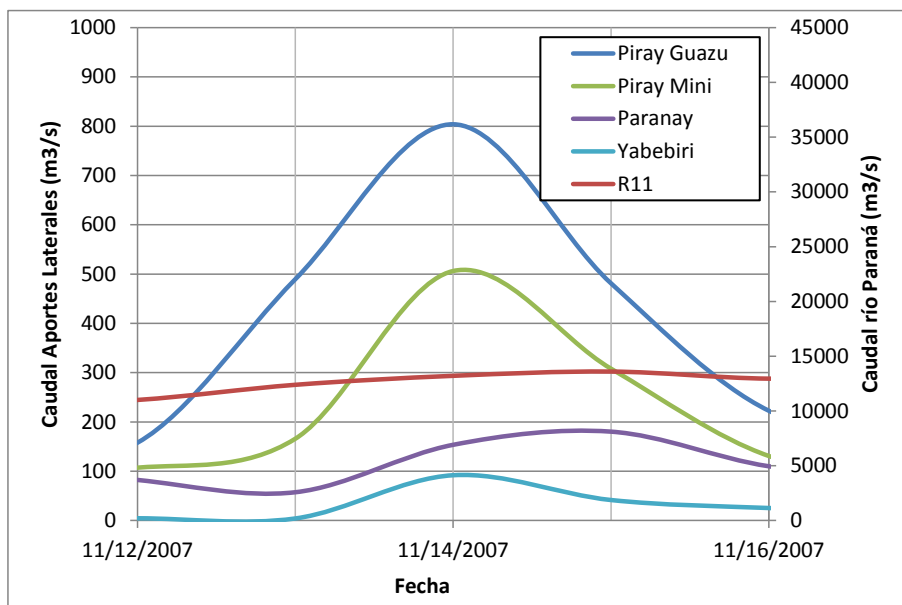
Se analizaron distintos eventos individuales de crecidas de los arroyos, y se compararon los volúmenes aportantes de cada uno con el del río Paraná (para la misma ventana de tiempo), utilizando para este último los caudales obtenidos en la estación R11. Los tres eventos seleccionados corresponden a fechas recientes en las cuales se produjeron los mayores caudales de los arroyos. Estos se individualizan y representan en la Figura 2.36.

La Figura 2.37 muestra el volumen aportado por cada arroyo relativo al escurrido por el río Paraná para los tres eventos. Se observa que el aporte varía entre aproximadamente el 4% y el 7%, lo cual se considera menor, pero significativo. Los que más aportan son, en general, el Piray Miní y Piray Guazú, mientras que el menor aporte es siempre el del Yaberirí.

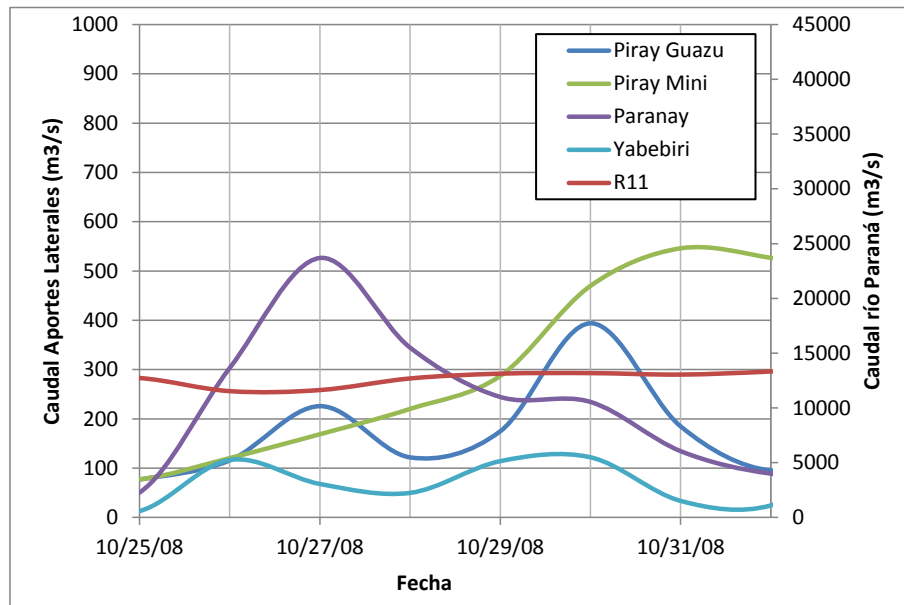
En la Figura 2.38 se presenta el aporte relativo de los mismos arroyos, pero ahora sobre una base anual. Se observa que este resulta mucho menor, generalmente por debajo del 1%, manteniéndose la importancia relativa entre las contribuciones provenientes de los cuatro arroyos.



a) Crecida del Piray Mini con el Paraná en caudales altos. Evento May/07



b) Crecida del Piray Guazu con el Paraná en caudales medios. Evento Nov/07



c) Crecida del Paranay con el Paraná en caudales medios. Evento Oct/08

Figura 2.36. Análisis de casos de crecidas de arroyos.

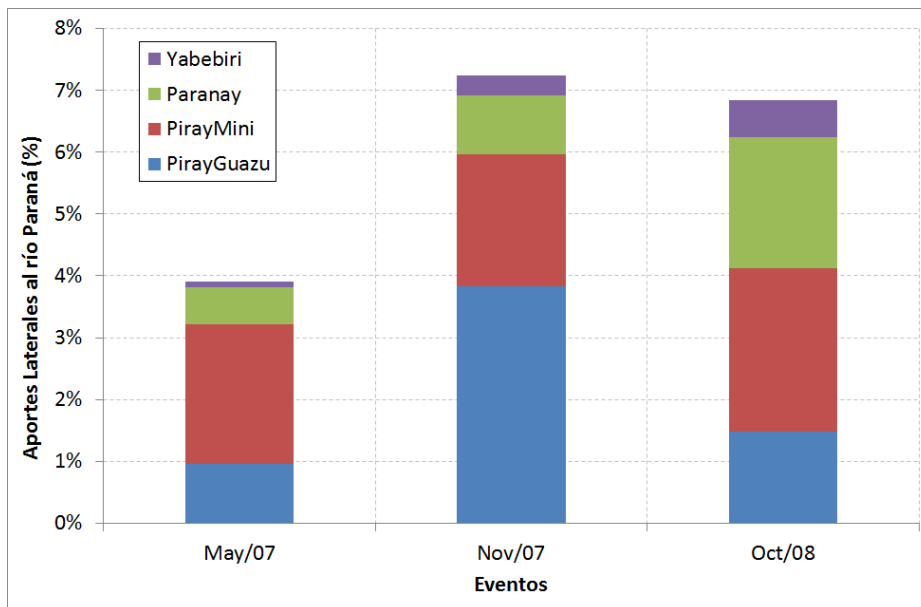
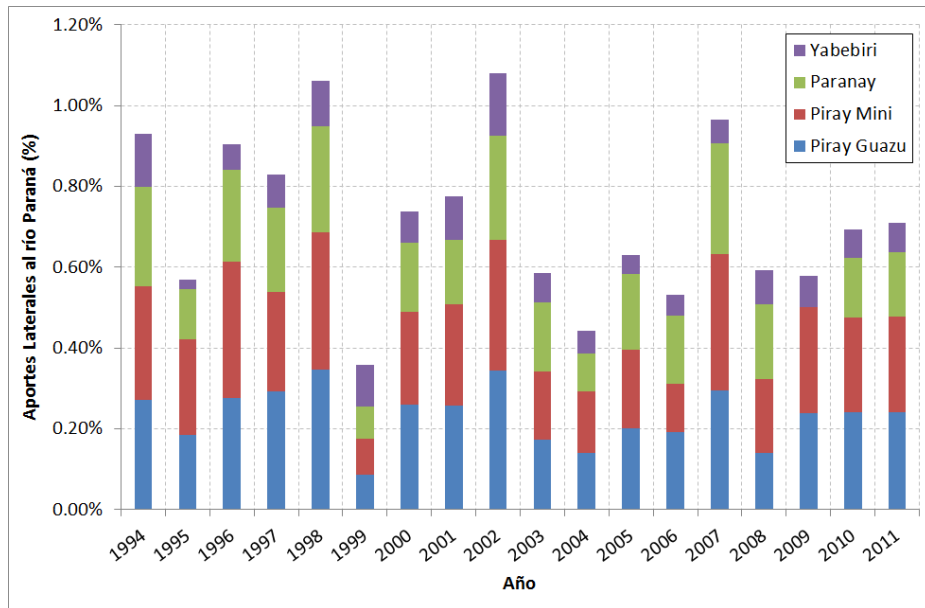


Figura 2.37. Porcentaje de aportes laterales en los 3 eventos analizados relativos al volumen escurrido por el río Paraná.



**Figura 2.38.** Porcentaje de aportes laterales anuales relativos al volumen escurrido por el río Paraná.

### 3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA

#### 3.1 Secciones transversales

En el Primer Informe se presentaron las secciones transversales utilizadas en la implementación del modelo hidrodinámico. En esta fase del estudio, ellas fueron contrastadas con las empleadas en el modelo previo (*Corpus2009*), según informa Almiron (2009).

En la Tabla 3.1 se indican las secciones transversales del modelo presente (*MOAGAR-2*) y el previo. El primero tiene 62 secciones, mientras que el modelo *Corpus2009* totaliza 51 secciones. Comparten entre sí 35 secciones. Esto significa que el modelo *MOAGAR-2* contiene 27 secciones no incluidas en el *Corpus2009*, mientras que este último dispone de 16 secciones no incluidas en el primero.

**Tabla 3.1.** Ubicación y fuente de las estaciones hidrométricas.

| N° | Sección   | Nombre                    | Progresiva (Km) | Distancia (Km) | MOAGAR-2 | Corpus2009 |
|----|-----------|---------------------------|-----------------|----------------|----------|------------|
| 1  | SP22 / 1G | Aguas Abajo Conf Iguazu   | 1926.8          | 0              | SI       | SI         |
| 2  | SP24      | R11                       | 1924.5          | 2.3            | SI       | SI         |
| 3  | SP25 / 2G | Puerto Iguazu Viejo       | 1921.0          | 3.5            | SI       | SI         |
| 4  | SP26      | Puerto Bertoni            | 1917.0          | 4.0            | SI       | NO         |
| 5  | N20       | Estación Experimental     | 1916.0          | 1.0            | SI       | NO         |
| 6  | SP27 / 3G | Km 1911.0 / Pto Peninsula | 1911.0          | 5.0            | SI       | SI         |
| 7  | SP28      | Km 1907.0                 | 1907.0          | 4.0            | SI       | NO         |
| 8  | SP30      | Km 1901.0                 | 1901.0          | 6.0            | SI       | SI         |
| 9  | SP31 / 4G | Arroyo Y-Tuti             | 1897.0          | 4.0            | SI       | SI         |
| 10 | N17       | Cancah del yasi           | 1893.8          | 3.2            | SI       | NO         |
| 11 | SP32      | Km 1891.3                 | 1891.3          | 2.5            | SI       | NO         |
| 12 | N16       | Puerto Bossetti           | 1886.5          | 4.8            | SI       | NO         |
| 13 | SP34 / 5G | Puerto Libertad           | 1877.5          | 9.0            | SI       | SI         |
| 14 | SP35      | Km 1873.0                 | 1873.0          | 4.5            | SI       | NO         |
| 15 | SP36 / 6G | Paranambu                 | 1870.0          | 3.0            | SI       | SI         |

| N° | Sección    | Nombre                        | Progresiva (Km) | Distancia (Km) | MOAGAR-2 | Corpus2009 |
|----|------------|-------------------------------|-----------------|----------------|----------|------------|
| 16 | SP39       | Yrigoyen                      | 1868.0          | 2.0            | SI       | NO         |
| 17 | SP37 / 7G  | Puerto Esperanza              | 1863.0          | 5.0            | SI       | SI         |
| 18 | SP38 / 8G  | Puerto Krieger                | 1857.0          | 6.0            | SI       | SI         |
| 19 | N15        | Arroyo Toro-Cua               | 1853.5          | 3.5            | SI       | NO         |
| 20 | SP40       | Toro-Cua                      | 1846.0          | 7.5            | SI       | NO         |
| 21 | N14        | Arroyo Aguaray-Guazu          | 1840.0          | 6.0            | SI       | NO         |
| 22 | SP42 / 9G  | Puerto Mado                   | 1834.0          | 6.0            | SI       | SI         |
| 23 | SP43       | Aguas Arriba Conf Yacuy Guazú | 1828.0          | 6.0            | SI       | NO         |
| 24 | N13        | Puerto Yacuy-Guazu            | 1826.8          | 1.2            | SI       | NO         |
| 25 | N12        | Isla Pareha                   | 1824.5          | 2.3            | SI       | NO         |
| 26 | SP44       | Km 1822.0                     | 1822.0          | 2.5            | SI       | NO         |
| 27 | SP45 / 10G | Puerto Victoria               | 1816.0          | 6.0            | SI       | SI         |
| 28 | SP46       | Km 1811.3                     | 1811.3          | 4.7            | SI       | NO         |
| 29 | N11        | Puerto Paty-Cua               | 1810.5          | 0.8            | SI       | NO         |
| 30 | SP47 / 11G | Puerto El Dorado              | 1806.0          | 4.5            | SI       | SI         |
| 31 | 12G        | Puerto Piray                  | 1800.0          | 6.0            | SI       | SI         |
| 32 | N10        | Arroyo San Juan               | 1790.8          | 9.2            | SI       | NO         |
| 33 | 13G        | Puerto Montecarlo             | 1787.0          | 3.8            | SI       | SI         |
| 34 | N9         | Isla Caragutatay              | 1784.5          | 2.5            | SI       | NO         |
| 35 | N8         | Mboi-Mbusu                    | 1779.0          | 5.5            | SI       | NO         |
| 36 | 15G        | Paranay Guazu                 | 1772.8          | 6.2            | SI       | SI         |
| 37 | N7         | San Rafael                    | 1761.0          | 11.8           | SI       | NO         |
| 38 | 16G        | Puerto Luján                  | 1754.0          | 7.0            | SI       | SI         |
| 39 | N6         | Puerto Garuhape               | 1747.0          | 7.0            | SI       | NO         |
| 40 | 17G        | Puerto Rico                   | 1740.5          | 6.5            | SI       | SI         |
| 41 | N5         | Puerto León                   | 1736.5          | 4.0            | SI       | NO         |
| 42 | 18G        | Puerto Verde                  | 1726.0          | 10.5           | SI       | SI         |
| 43 | 26         | Caipovi                       | 1720.0          | 6.0            | NO       | SI         |
| 44 | N4         | Puerto San Gotardo            | 1718.0          | 2.0            | SI       | NO         |
| 45 | 20G        | Puerto Leoni                  | 1712.5          | 5.5            | SI       | SI         |
| 46 | 28         | Cap. Meza                     | 1703.0          | 9.5            | NO       | SI         |
| 47 | N3         | Puerto Nuevo                  | 1688.8          | 14.2           | SI       | NO         |
| 48 | 21G        | Puerto Gisella                | 1679.5          | 9.3            | SI       | SI         |
| 49 | 22G        | Santo Pipó                    | 1669.0          | 10.5           | SI       | SI         |
| 50 | 33         | Santo Pipó 2                  | 1668.0          | 1.0            | NO       | SI         |
| 51 | 23G        | Puerto Remanso                | 1665.5          | 2.5            | SI       | SI         |
| 52 | 35         | Antes de Pto. Bella Vista     | 1664.0          | 1.5            | NO       | SI         |
| 53 | 36         | Pto. Bella Vista              | 1662.5          | 1.5            | NO       | SI         |
| 54 | 37         | Pindoí 1                      | 1661.1          | 1.4            | NO       | SI         |

| N° | Sección | Nombre                          | Progresiva (Km) | Distancia (Km) | MOAGAR-2 | Corpus2009 |
|----|---------|---------------------------------|-----------------|----------------|----------|------------|
| 55 | 38      | Pindoí 2                        | 1660.2          | 0.9            | NO       | SI         |
| 56 | 39      | Pindoí 3                        | 1659.4          | 0.8            | NO       | SI         |
| 57 | 40      | Pindoí 4                        | 1658.5          | 0.9            | NO       | SI         |
| 58 | 24G     | Isla Pindoí                     | 1658.0          | 0.5            | SI       | SI         |
| 59 | 42      | Pindoí 5                        | 1657.3          | 0.7            | NO       | SI         |
| 60 | 44      | Pindoí 7                        | 1656.0          | 1.3            | NO       | SI         |
| 61 | 45      | Pindoí 8                        | 1655.3          | 0.8            | NO       | SI         |
| 62 | 26G     | Puerto Doce                     | 1653.0          | 2.3            | SI       | SI         |
| 63 | 48      | Cazador                         | 1651.6          | 1.4            | NO       | SI         |
| 64 | 49      | Punta Margen Paraguaya          | 1650.4          | 1.2            | NO       | SI         |
| 65 | 38H     | Punta Ñaro                      | 1648.5          | 1.9            | SI       | SI         |
| 66 | N2      | Puerto Roca                     | 1645.5          | 3.0            | SI       | N0         |
| 67 | 52      | Ag. Arr. Restinga Itacurubi     | 1644.0          | 1.5            | NO       | SI         |
| 68 | 36H     | Colonia Cantera                 | 1638.5          | 5.5            | SI       | SI         |
| 69 | 56      | Pesiguaro                       | 1635.0          | 3.5            | NO       | SI         |
| 70 | 27G     | Puerto San Ignacio              | 1632.9          | 2.1            | SI       | SI         |
| 71 | 34H     | Reina Victoria                  | 1629.0          | 3.9            | SI       | SI         |
| 72 | 28G     | Teyu Cuaré                      | 1625.0          | 4.0            | SI       | SI         |
| 73 | 33H     | Santa Ana                       | 1621.0          | 4.0            | SI       | SI         |
| 74 | N1      | Puerto San Juan                 | 1614.5          | 6.5            | SI       | N0         |
| 75 | 32H     | La Mina                         | 1606.5          | 8.0            | SI       | SI         |
| 76 | 31H     | Puerto Gramajo                  | 1603.0          | 3.5            | SI       | SI         |
| 77 | 30H     | Candelaria                      | 1600.5          | 2.5            | SI       | SI         |
| 78 | 29H     | Aguas Arriba Conf Garupá (move) | 1597.5          | 3.0            | SI       | SI         |

### 3.2 Modelo MOAGAR-3

Se procedió a incorporar al presente modelo las 16 secciones transversales adicionales provenientes del modelo *Corpus2009*. La mayoría de estas secciones corresponden a batimetrías realizadas durante el año 2008 en la zona de la isla Pindoí. De esta manera se ha generado el modelo *MOAGAR-3*, que tiene un total de 78 secciones transversales, con un espaciamiento medio de 4,3 km.

La Figura 3.1 muestra la ubicación de las secciones transversales adicionales, mientras que en la Figura 3.2 se presentan algunas de esas secciones, a título ilustrativo.

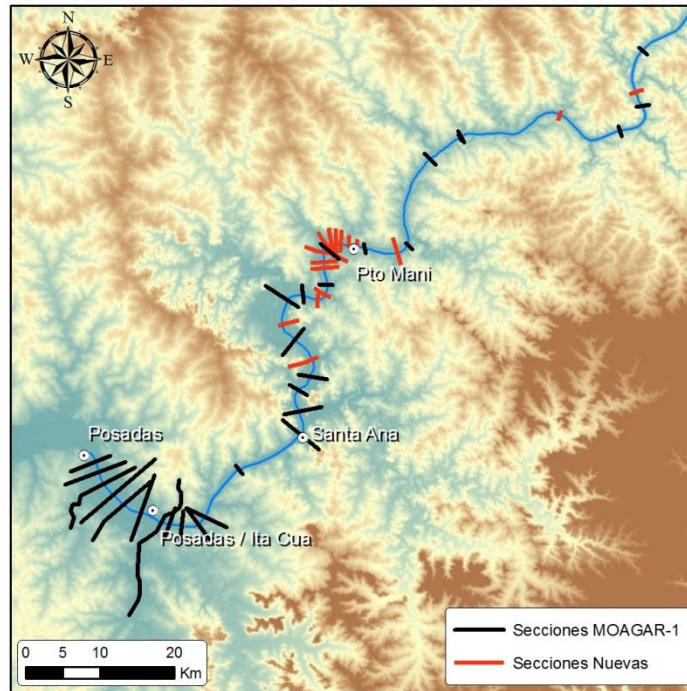
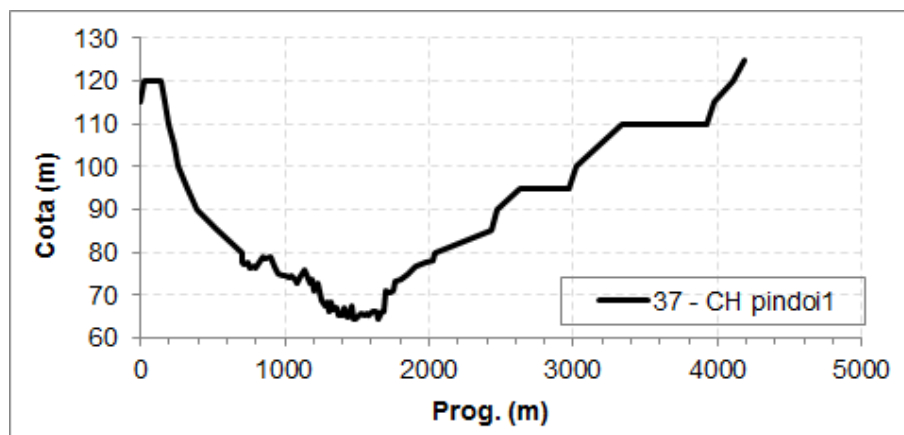
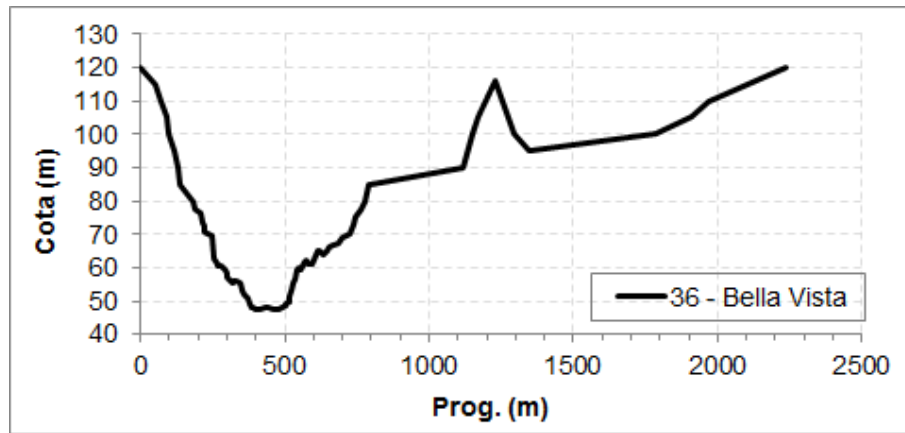


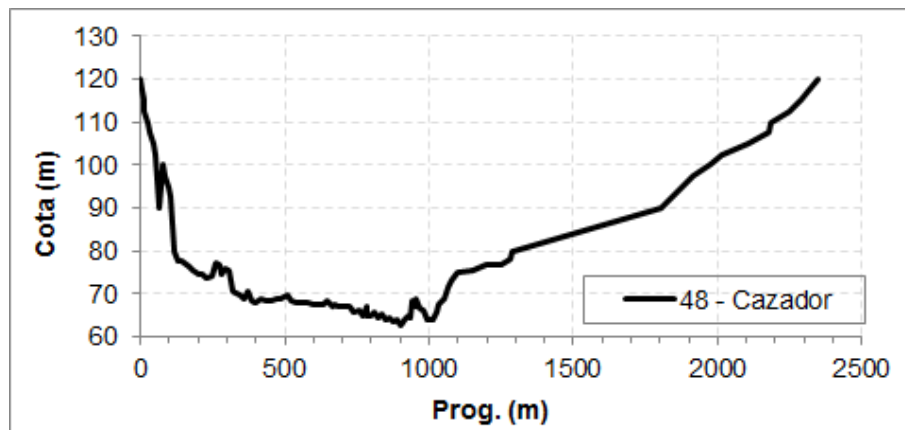
Figura 3.1. Ubicación de secciones transversales adicionales.



a) Sección 37 – CH Pindoí 1



*b) Sección 36 – Bella Vista*



*c) Sección 48 - Cazador*

**Figura 3.2.** Secciones adicionales del modelo MOAGAR-3.

## 4 MODELO HIDRODINÁMICO

### 4.1 Secciones transversales

Además de las 78 secciones transversales relevadas, en el modelo *MOAGAR-3* se introdujeron nuevas secciones por interpolación geométrica cada aproximadamente 2000 m, obteniéndose un total de 273 secciones. Esto tuvo por objeto disminuir los errores numéricos y tener mayor uniformidad en el paso espacial entre secciones.

### 4.2 Cálculo de la conductividad hidráulica

A los efectos del cálculo, el modelo hidrodinámico opera, para cada sección transversal, en base a dos curvas de parámetros como función del nivel de agua: el área de escurrimiento, parámetro puramente geométrico, y la conductividad hidráulica (*conveyance* en inglés), parámetro inverso a la resistencia hidráulica.

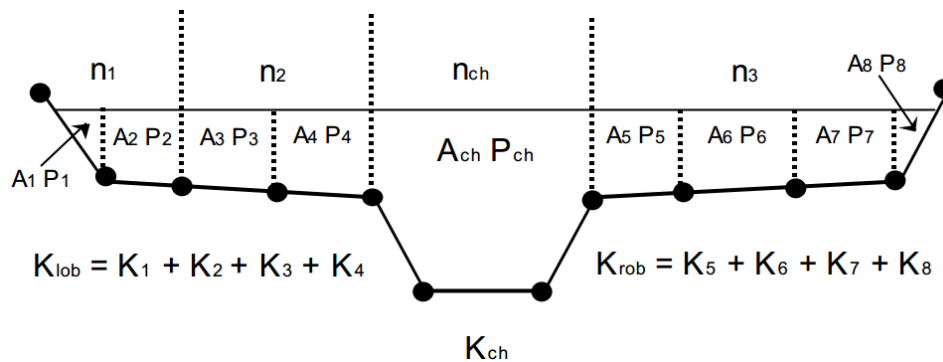
La conductividad hidráulica,  $K$ , depende de parámetros geométricos y de textura de la superficie (rugosidad). La definición básica es la siguiente:

$$K = \frac{1}{n} A \left( \frac{A}{P} \right)^{2/3}$$

donde  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $A$  el área de la sección transversal y  $P$  el perímetro mojado; la relación entre estos dos últimos parámetros se conoce como radio hidráulico.

La ecuación anterior no hace distinción acerca de la distribución del perímetro mojado en la sección, lo cual resulta apropiado para secciones simples, sobre todo si el tirante y el ancho de la sección son de órdenes parecidos y la velocidad puede considerarse aproximadamente uniforme en todo el ancho. No obstante, en secciones compuestas esta parametrización no provee una representación adecuada de las pérdidas energéticas. La mayor limitación aparece cuando se produce el desborde de las márgenes, a partir de lo cual el perímetro mojado suele crecer mucho más rápido que el área. Si se procede con la forma de cálculo expresada más arriba, se observa una caída de la conductividad con el nivel, lo cual no es físicamente correcto, ya que la velocidad media en el cauce principal disminuye en esas condiciones.

En el modelo *MOAGAR-3* se utilizó una manera alternativa para calcular la conductividad, más apropiada para las secciones anchas y compuestas del Paraná. En este método, la sección transversal se divide en fajas verticales, separando zonas donde la velocidad media difiere; en particular, las márgenes de la sección principal (Weber 2003). En la Figura 4.1 se ilustra esta discretización.



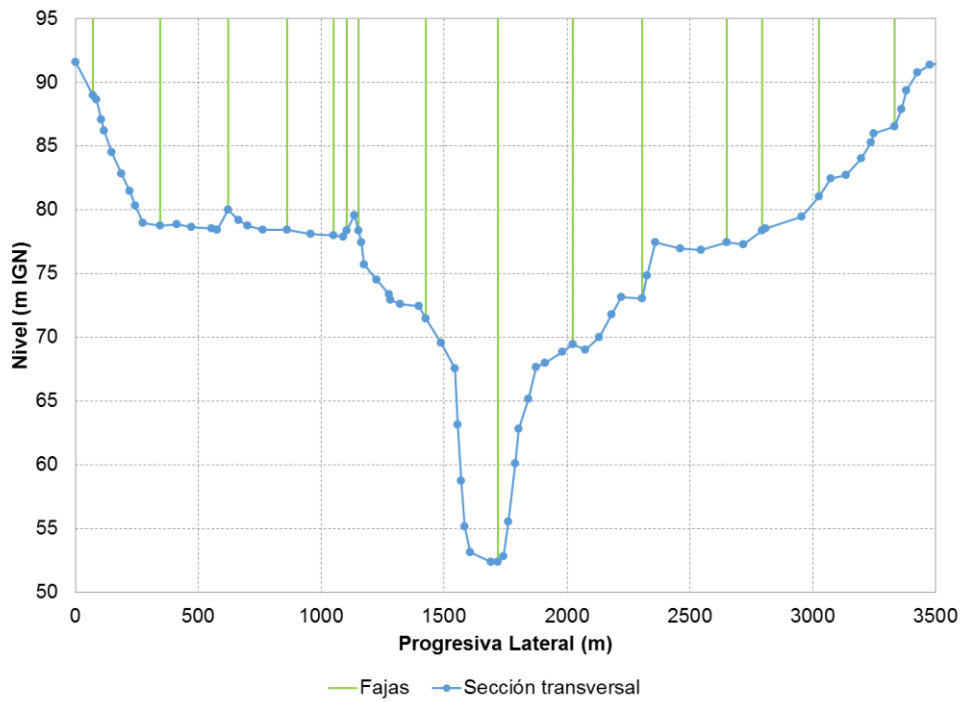
**Figura 4.1.** Esquematización de la sección transversal en fajas.

El método propone calcular la conductividad en cada faja de manera independiente, considerando el área ( $A_i$ ), el perímetro mojado ( $P_i$ ) y la rugosidad ( $n_i$ ) de cada una por separado, y luego sumarlas para obtener la conductividad total:

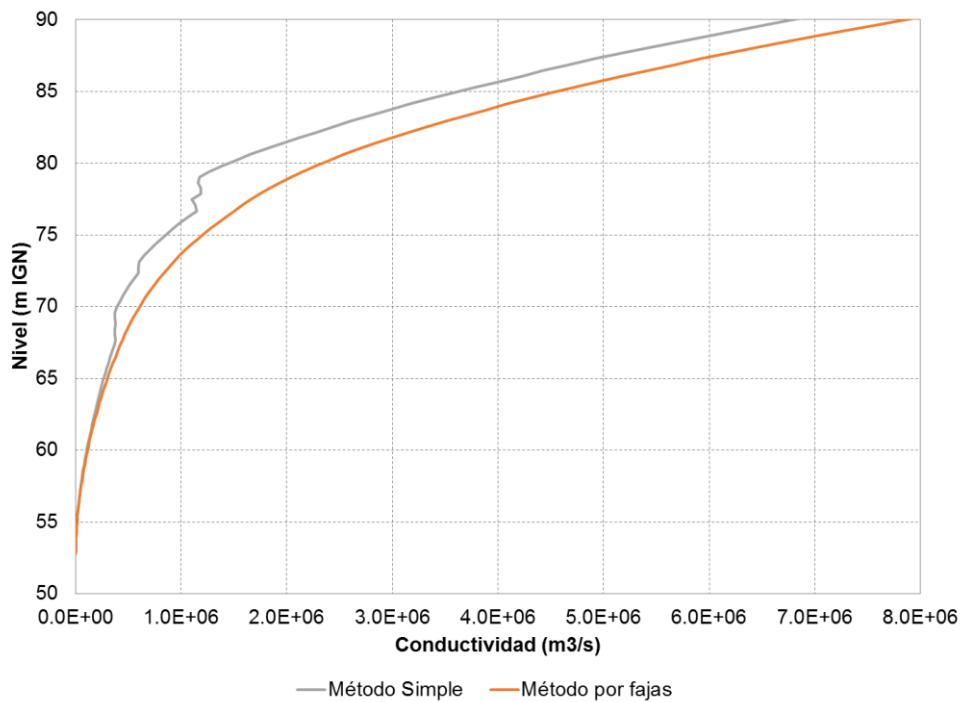
$$K = \sum_{i=1}^N \frac{1}{n_i} A_i \left( \frac{A_i}{P_i} \right)^{2/3}$$

donde  $N$  es la cantidad de fajas.

A fin de ilustrar las diferencias entre los dos métodos, en la Figura 4.2 se presentan las curvas de conductividad versus nivel para la sección del Paraná con progresiva 1.597.500, correspondiente a Ita Cuá. Se observa que el método por fajas resulta en conductividades monótonamente crecientes en el intervalo entre 70 y 80 mIGN, lo cual refleja más apropiadamente el comportamiento esperable en el río. En cambio, con el método simple (que es el utilizado por defecto en el código HEC-RAS) se observan oscilaciones en ese intervalo, las cuales se deben al significativo crecimiento del perímetro mojado en ese intervalo, que por momentos neutraliza o incluso revierte el efecto del crecimiento del área de escurrimiento, reduciendo la velocidad media teórica en toda la sección. Esto no es esperable físicamente, ya que el mayor caudal escurre por la zona más profunda del cauce principal, muy alejado de las márgenes (la sección tiene una relación altura/ancho de 1:100). El valor de la conductividad resulta como consecuencia hasta 75% superior en ese rango de niveles al ser calculado por el método de fajas.



a) Sección transversal del río Paraná, progresiva 1.597.500



b) Curvas de conductividad

Figura 4.2. Comparación de curvas de conductividad según distintos métodos de cálculo

En el modelo *MOAGAR-3* se prestó además particular atención a la discretización vertical de las curvas área y conductividad versus nivel de cada sección, que son efectuadas al inicio de la simulación y almacenadas en forma de tablas. Los niveles para los cuales se realiza el cálculo se deben fijar en forma manual, ya que dichas tablas tienen un máximo de 100 valores de nivel, y el modelo utiliza por defecto intervalos que pueden dejar fuera de las tablas condiciones de crecida. Es por tanto necesario elegir el intervalo de manera que cubra todo el rango de niveles a simular, y al mismo tiempo proveer una resolución suficiente como para que los resultados sean precisos.

En función de los resultados disponibles de operar con el modelo *MOAGAR-2*, se discretizaron las curvas con intervalos de 0,6 m entre las cotas 70 y 130 mIGN para el río Paraná, y de 0.6 m entre las cotas 85 y 145m IGN para el río Iguazú. Cabe destacar que estos intervalos dejan fuera del rango a las cotas de fondo en las zonas más bajas de muchas de las secciones, pero esto no representa un problema, ya que lo importante es que las cotas de superficie libre estén comprendidas en la tabla.

### 4.3 Calibración

Se efectuó la calibración del modelo *MOAGAR-3* operándolo solamente hasta la ciudad de Posadas. El tramo restante, hasta la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) será incorporado a posteriori. Se utilizó como escenario de calibración la etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá, sobre el período 1983-1994.

Para la calibración del modelo se utilizaron como funciones objetivo las series de niveles en las mismas estaciones principales empleadas en el modelo *MOAGAR-2*:

- Ita Cuá, Santa Ana, San Martín, El Dorado y R11 en el tramo Posadas-Punto Trifinio
- Puente La Amistad en el tramo Punto Trifinio-Iguazú
- Puerto Iguazú sobre el río Iguazú.

Los parámetros básicos de calibración fueron los coeficientes de rugosidad de Manning, que se consideraron uniformes en los 7 tramos entre las estaciones de calibración identificados en la Tabla 4.1. Eventualmente se apeló a imponer una curva de factor de rugosidad por tramo, es decir, un factor de modulación del coeficiente de Manning con el caudal.

Para cada tramo se consideraron dos valores del coeficiente de rugosidad de Manning: uno para el cauce y otro para la planicie. El primero se aplica al cauce principal y a las zonas bajas adenañas a este, en principio sin vegetación espesa. El valor de planicie se aplica al resto, que son zonas más altas, con mayor densidad y envergadura de vegetación. Se adoptó como nivel de corte entre ambas zonas aquel que solo se anega el 5% del tiempo. Para definir ese nivel de corte se utilizaron resultados del modelo *MOAGAR-2*, con los cuales se llevó a cabo una estadística de los caudales en el río, determinándose que los caudales representativos de esa situación son de aproximadamente 21.800 m<sup>3</sup>/s para el río Paraná aguas arriba del Punto Trifinio, y 4.500 m<sup>3</sup>/s en el río Iguazú (la suma en el río Paraná aguas abajo del Punto Trifinio). Luego se realizó una simulación en régimen permanente con esos valores de caudal como condición de borde, obteniéndose así el nivel de corte en todas las secciones del modelo.

**Tabla 4.1. Tramos de calibración.**

| Tramo                               | Progresiva Inicial (m) | Progresiva Final (m) | Longitud (m) |
|-------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------|
| Tramo 1, Posadas - Ita Cuá          | 1.583.000              | 1.597.500            | 14.500       |
| Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana        | 1.597.500              | 1.621.000            | 23.500       |
| Tramo 3, Santa Ana – San Martín     | 1.621.000              | 1.740.500            | 119.500      |
| Tramo 4, San Martín – El Dorado     | 1.740.500              | 1.804.790            | 64.290       |
| Tramo 5, El Dorado – R11            | 1.804.790              | 1.924.500            | 119.710      |
| Tramo 6, R11 - Itaipú               | 1.924.500              | 1.948.000            | 23.500       |
| Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas | 0                      | 23.250               | 23.250       |

Las curvas de factor de rugosidad fueron discretizadas a intervalos de 10.000 m<sup>3</sup>/s para el río Paraná y de 5.000 m<sup>3</sup>/s para el río Iguazú.

Se desarrolló un algoritmo automático para acelerar el proceso de calibración, y permitir recalibrar el modelo fácilmente en el caso de requerirse cambios a futuro en la cantidad de secciones adoptadas o el criterio de ajuste seleccionado. El programa de auto-calibración modifica los archivos de entrada del HEC-RAS y ejecuta el modelo una gran cantidad de veces, ajustando iterativamente cada parámetro, dentro de su rango de valores posibles, hasta minimizar un indicador de bondad de ajuste.

Para cada parámetro se definió un rango de valores aceptables: 0,025 ~ 0,060 para el coeficiente Manning de cauce (con valor inicial por defecto de 0,04); 0,08 ~ 0,25 para el coeficiente de Manning de planicie (con valor inicial por defecto de 0,10); 0,5 ~ 1,2 para el factor de rugosidad (con valor inicial por defecto de 1,0).

El algoritmo de calibración realiza el siguiente proceso:

- a) Se ajusta el valor del coeficiente de Manning de cauce del Tramo 1 (inferior) con el criterio de minimizar el indicador *RMSE* para todas las observaciones que corresponden a estiaje (caudales menores a 11.000 m<sup>3</sup>/s) de la estación de aguas arriba.
- b) Se ajusta el valor del coeficiente de Manning de planicie del Tramo1 con el criterio de minimizar *RMSE* para toda la serie en la estación de aguas arriba.
- c) Se repiten los pasos a) y b) de manera sucesiva para los tramos 2 a 7.
- d) Se repiten los pasos a) a c) iterativamente hasta obtener la convergencia de los valores del coeficiente de Manning en todos los tramos. Esta convergencia resultó muy rápida, requiriendo solo 1 iteración.

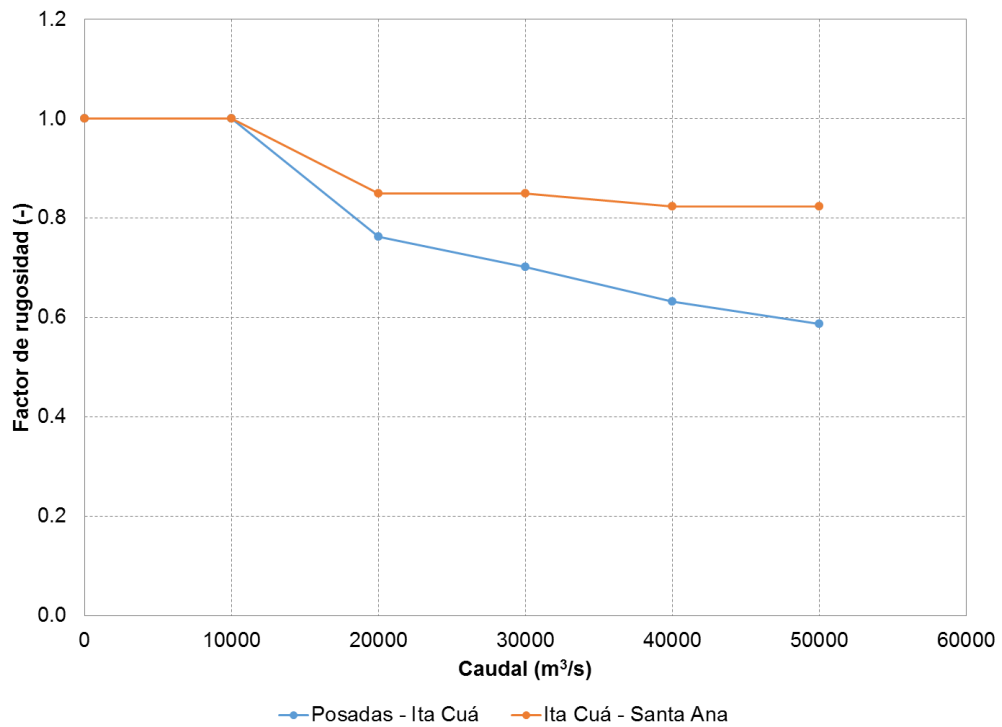
- e) Se ajusta el primer punto de la curva de factor de rugosidad del Tramo 1, con el criterio de minimizar *RMSE* en toda la serie de calibración de la estación de aguas arriba.
- f) Se repite el paso e) sucesivamente para los siguientes puntos de la curva de factor de calibración de ese tramo.
- g) Se repiten los pasos e) y f) de manera sucesiva para los tramos 2 a 7.
- h) Se repiten los pasos e) a g) iterativamente hasta obtener la convergencia de las curvas de factor de rugosidad en todos los tramos. Esta convergencia también resultó muy rápida, requiriendo solo 2 iteraciones.

Para mejorar la velocidad de convergencia y simplificar la parametrización del modelo, el algoritmo de calibración descarta automáticamente los valores calibrados de los parámetros cuando estos no contribuyen a mejorar significativamente los indicadores de error correspondientes. En particular, el valor de cualquier parámetro que luego de ajustado no mejora el indicador más de 1% respecto del valor por defecto, es reemplazado por el valor por defecto. Se encontró que esto sucede con todos los factores de rugosidad en los tramos superiores del río, que no contribuyen a mejorar el ajuste de manera significativa. Lo mismo sucede para algunos valores del coeficiente de Manning de planicie, ya que, dada la escasa contribución de las planicies de inundación a la conductividad total de la sección, los resultados son a menudo poco sensibles al valor de Manning adoptado para esta.

Los valores resultantes de aplicar este algoritmo, y que fueron adoptados para el modelo *MOAGAR-3*, se presentan en la Tabla 4.2. Los únicos tramos para los cuales fueron necesarias curvas de factor de rugosidad fueron los dos primeros; estas se muestran en la Figura 4.3.

**Tabla 4.2.** *Coefficientes de Manning luego de la calibración para la etapa previa al llenado.*

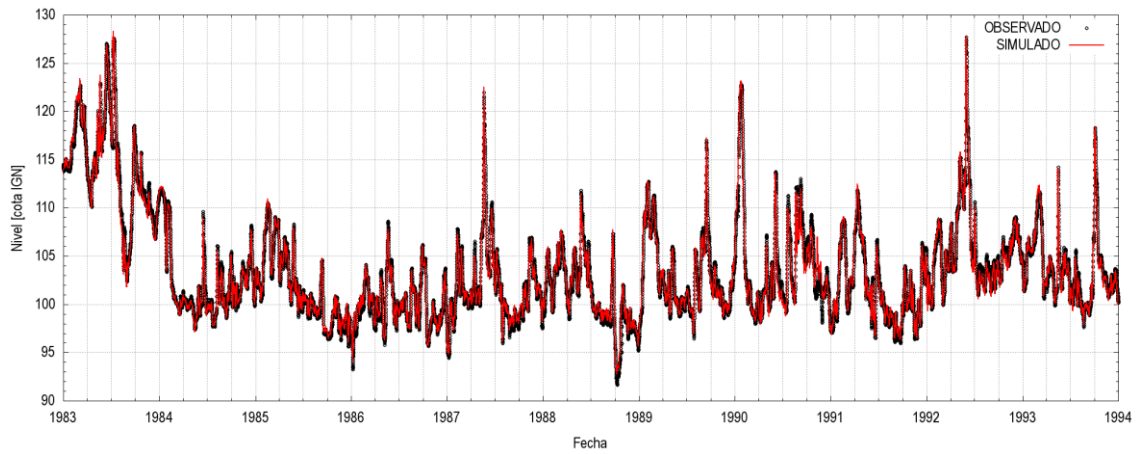
| Tramo                               | Manning de cauce | Manning de planicie |
|-------------------------------------|------------------|---------------------|
| Tramo 1, Posadas - Ita Cuá          | 0,0421           | 0,10                |
| Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana        | 0,0495           | 0,10                |
| Tramo 3, Santa Ana – San Martín     | 0,0400           | 0,10                |
| Tramo 4, San Martín – El Dorado     | 0,0457           | 0,10                |
| Tramo 5, El Dorado – R11            | 0,0477           | 0,19                |
| Tramo 6, R11 - Itaipú               | 0,0530           | 0,10                |
| Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas | 0,0600           | 0,10                |



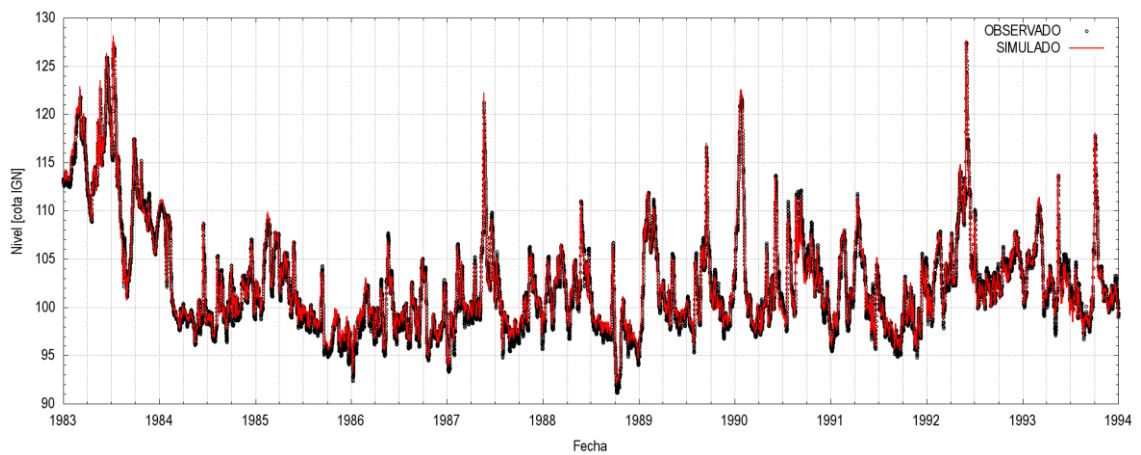
**Figura 4.3.** Curvas del factor de rugosidad luego de la calibración para la etapa previa al llenado.

Los valores del coeficiente de Manning de cauce mostrados en la Tabla 4.2 son significativamente más altos que los correspondientes al modelo MOAGAR-2 (ver Primer Informe Parcial), pero este incremento resulta compensado con la ausencia, en la mayoría de los tramos, de ajustes con el factor de rugosidad, conduciendo a conductividades hidráulicas comparables.

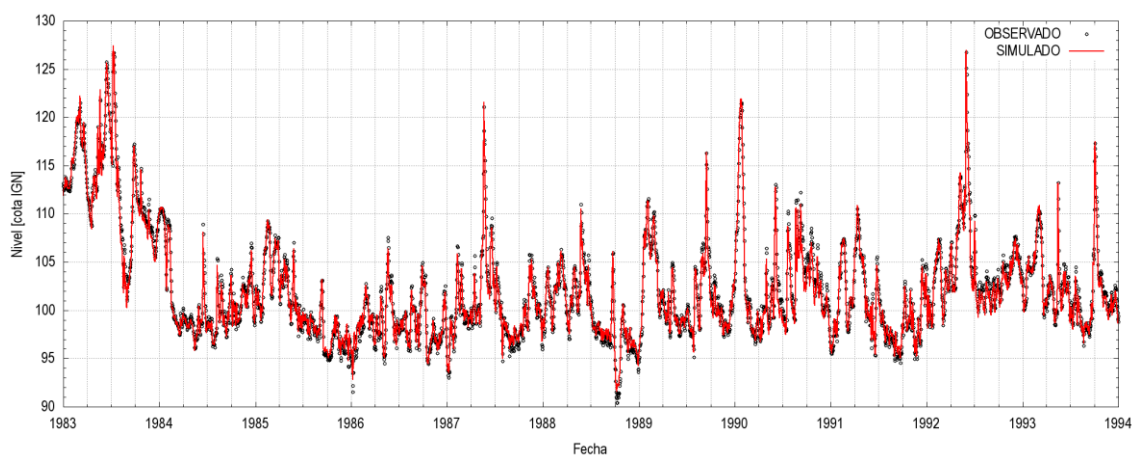
En la Figura 4.4 se presenta la comparación entre niveles observados y simulados luego de la calibración para todas las estaciones de calibración. Se observa un acuerdo muy satisfactorio para todas ellas. Esto se refleja en los indicadores de bondad de ajuste, mostrados en la Tabla 4.3.



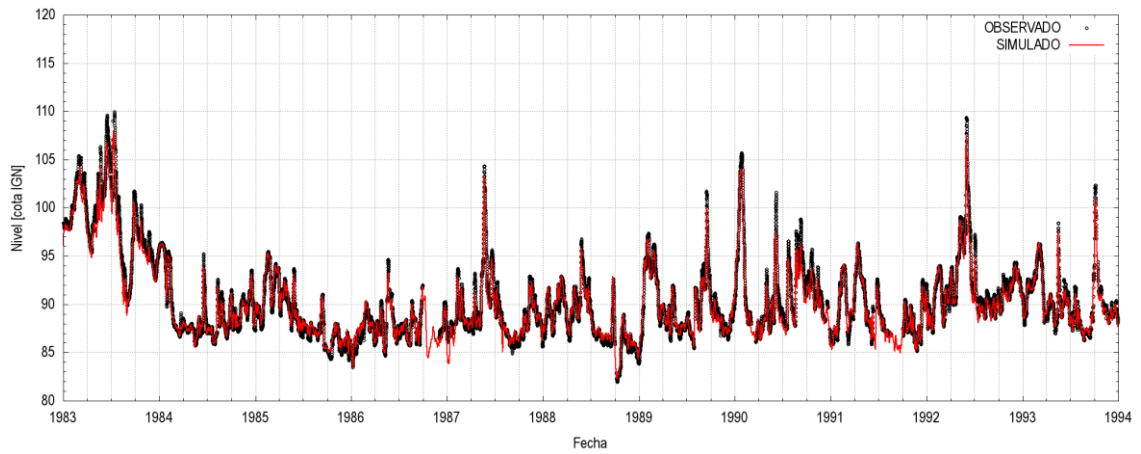
**a) Puente de la Amistad**



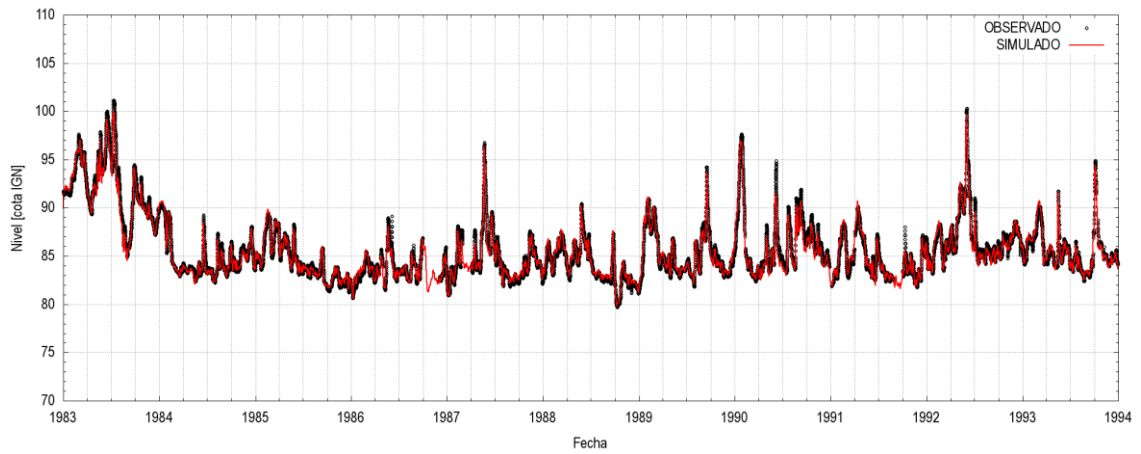
**b) Puerto Iguazú**



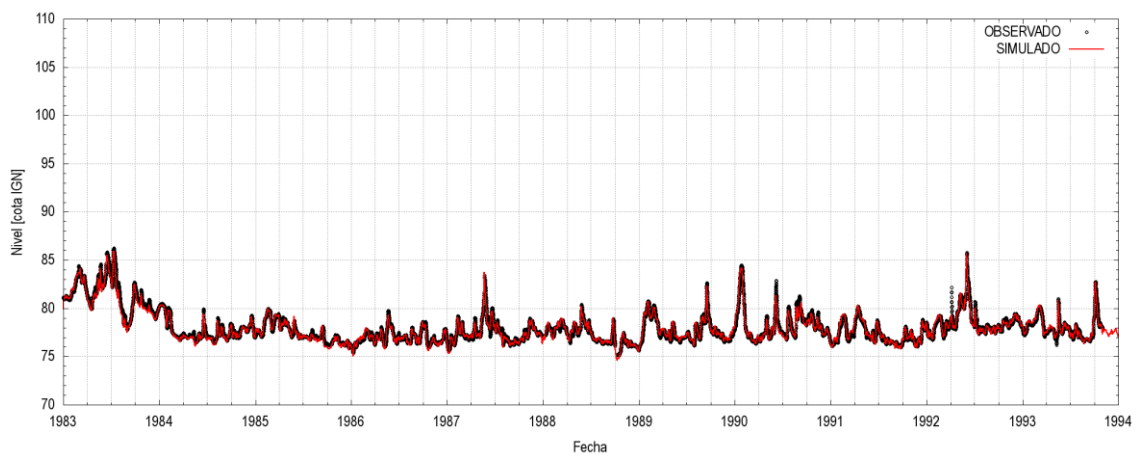
**c) R11**



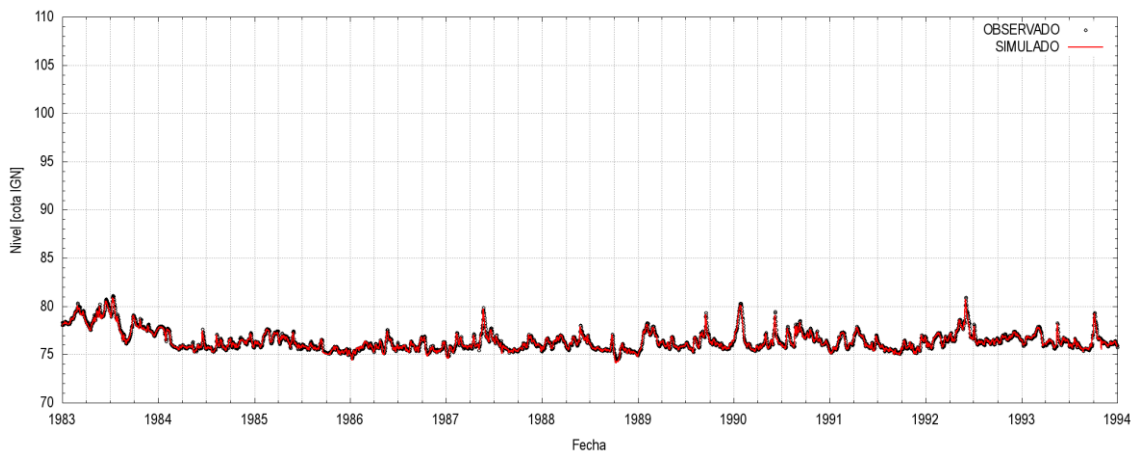
**d) El Dorado**



**e) Libertador Gral. San Martín**



**f) Santa Ana**



g) Posadas Ita Cuá

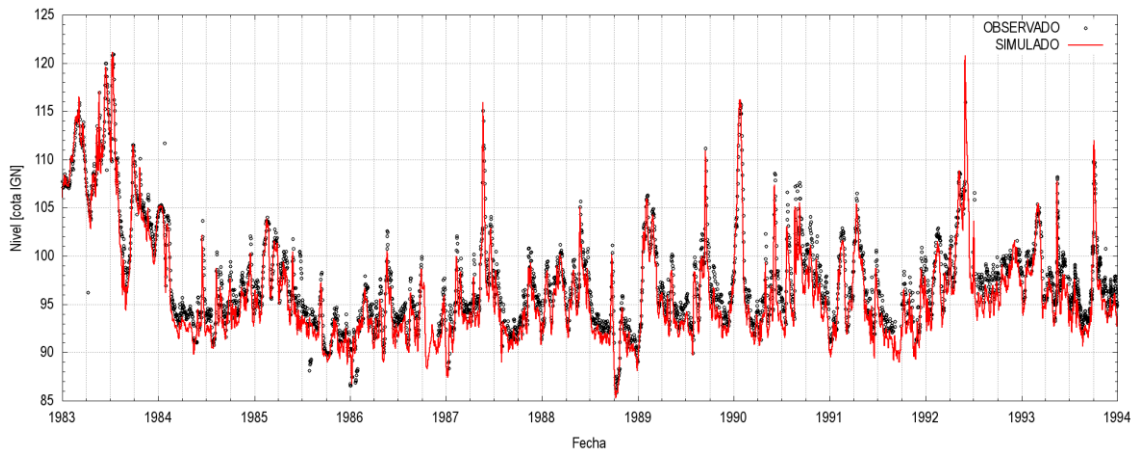
**Figura 4.4.** Comparación entre niveles observados y simulados con el modelo MOAGAR-3 para la etapa previa al llenado, en las estaciones de calibración.

**Tabla 4.3.** Indicadores de bondad de ajuste para la etapa previa al llenado, en las estaciones de calibración.

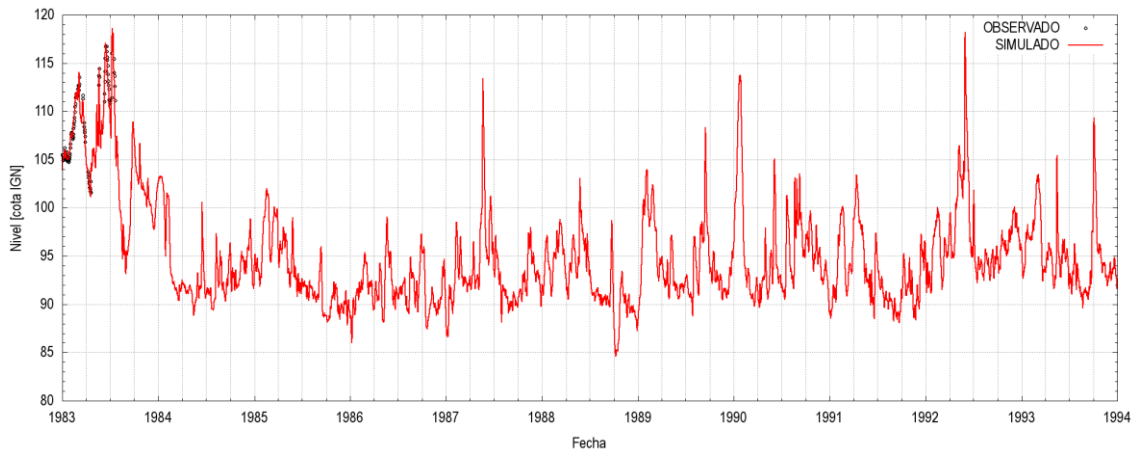
| Estación                    | MED (m) | RMSE (m) | R <sup>2</sup> | NSE  |
|-----------------------------|---------|----------|----------------|------|
| Puerto Iguazú               | -0,17   | 0,64     | 0,99           | 0,99 |
| Puente de la Amistad        | 0,01    | 0,49     | 0,99           | 0,99 |
| R11                         | 0,12    | 0,51     | 0,99           | 0,99 |
| El Dorado                   | 0,20    | 0,68     | 0,98           | 0,97 |
| 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 |

#### 4.4 Verificación

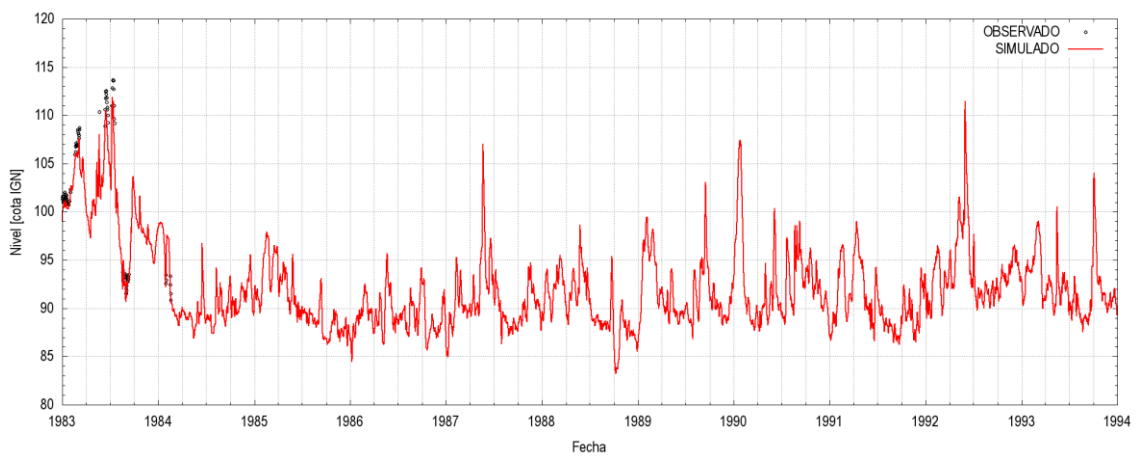
La Figura 4.5 muestra los resultados de nivel para las 12 estaciones de verificación introducidas en el Primer Informe Parcial, en las que se cuenta con observaciones esporádicas. Se observa un acuerdo general satisfactorio. Las desviaciones se atribuyen mayormente a limitaciones en la calidad de los datos o en los ceros de las estaciones. En la Tabla 4.4 se presentan los indicadores de bondad de ajuste para estas estaciones. En varias de ellas se observa una diferencia de valores medios relativamente significativa, lo cual puede estar ligado a errores en los ceros; esta desviación además contribuye directamente a incrementar el valor de *RMSE*.



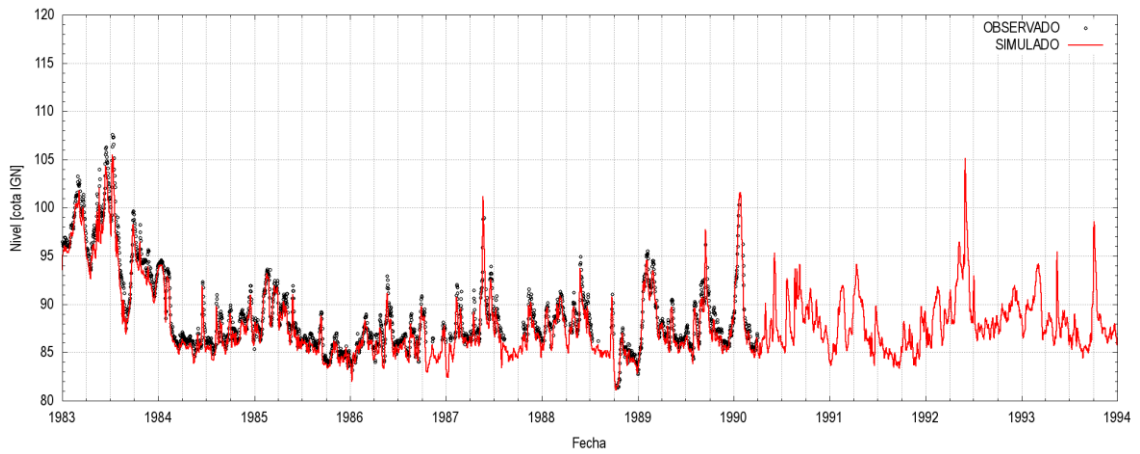
**a) Libertad**



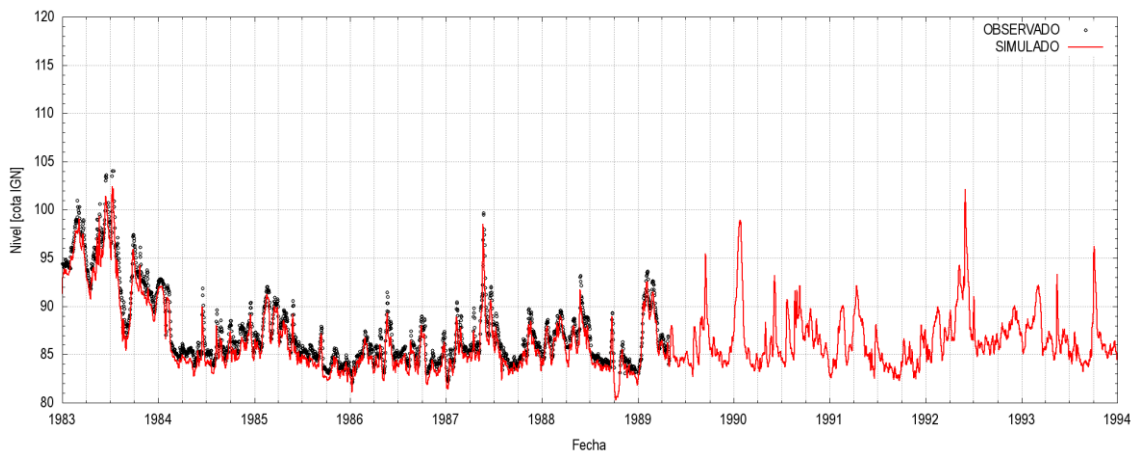
**b) Ita Pyte**



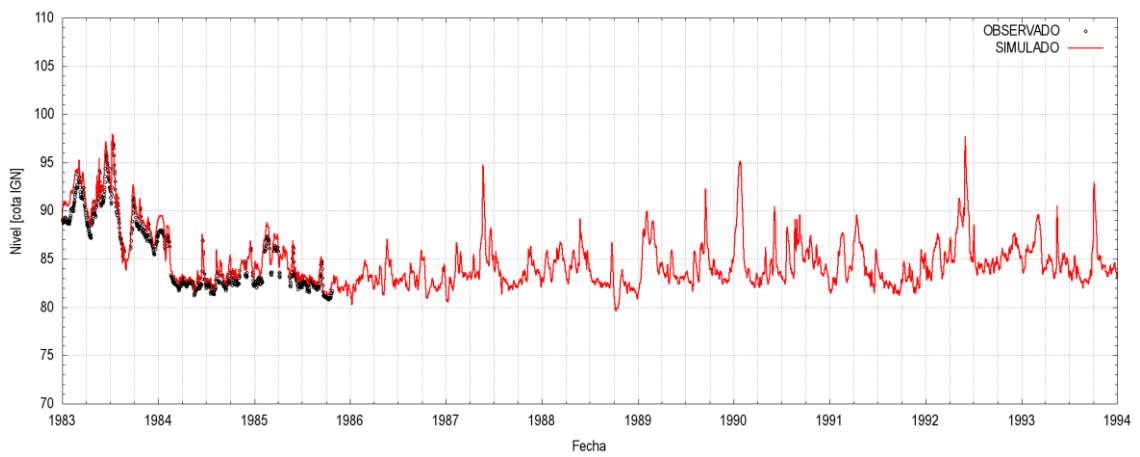
**c) Lomas Valentinas**



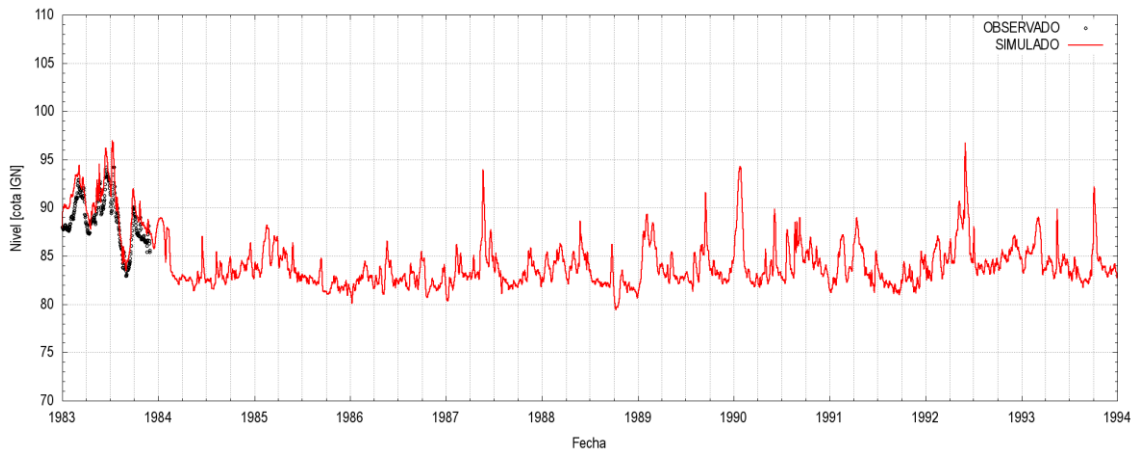
**d) Montecarlo**



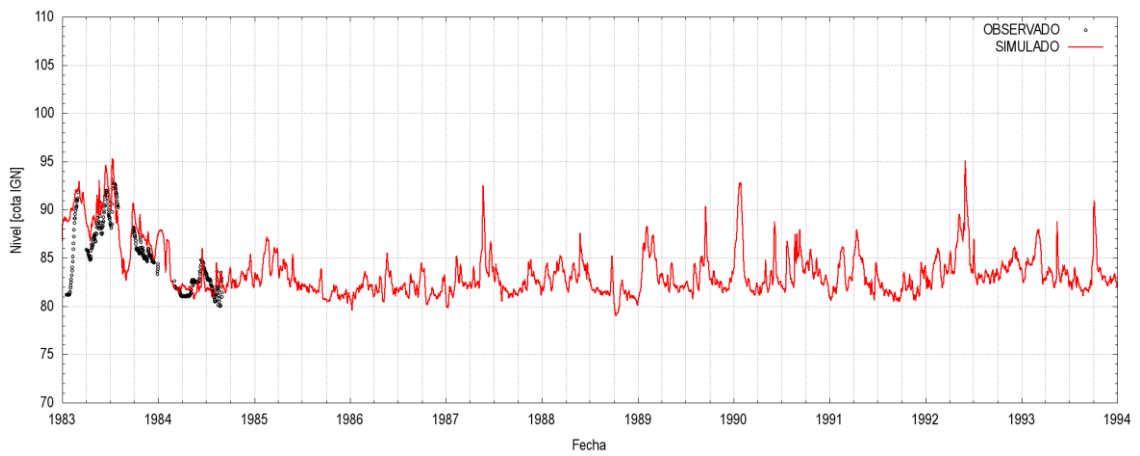
**e) San Rafael**



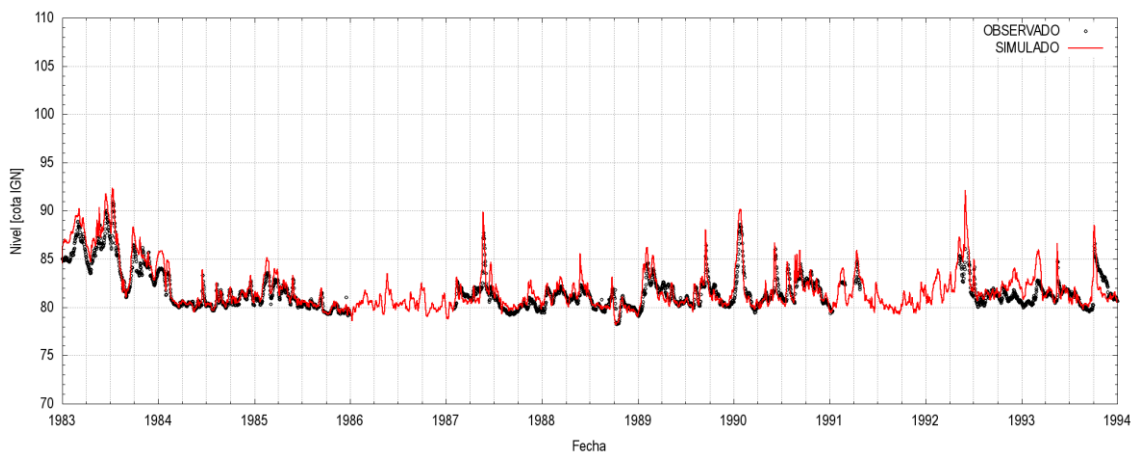
**f) Pto. Mineral**



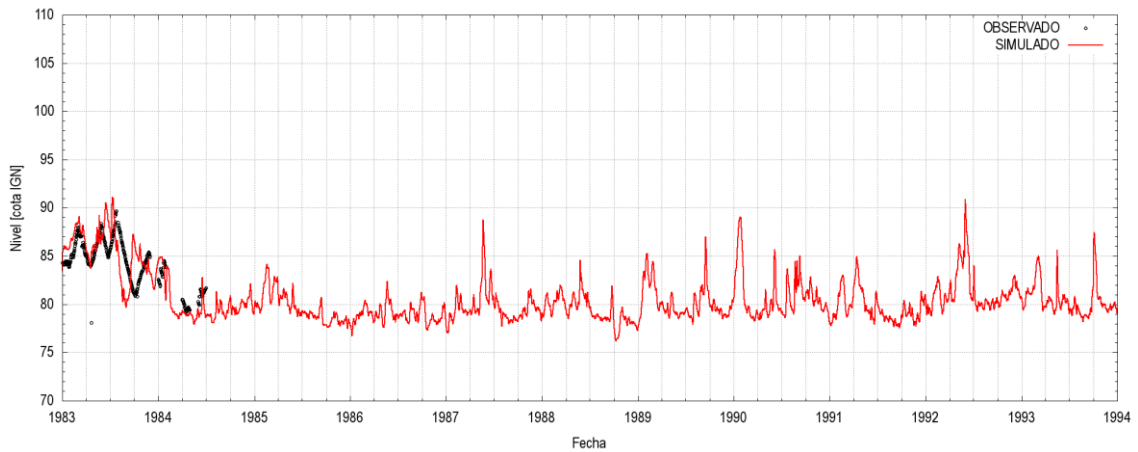
**g) Capitán Meza**



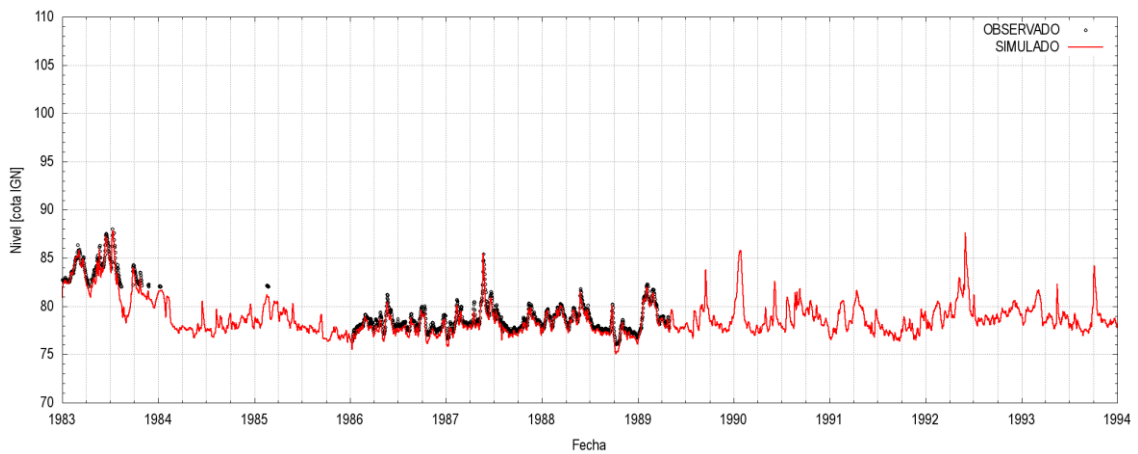
**h) Pto. Gisela**



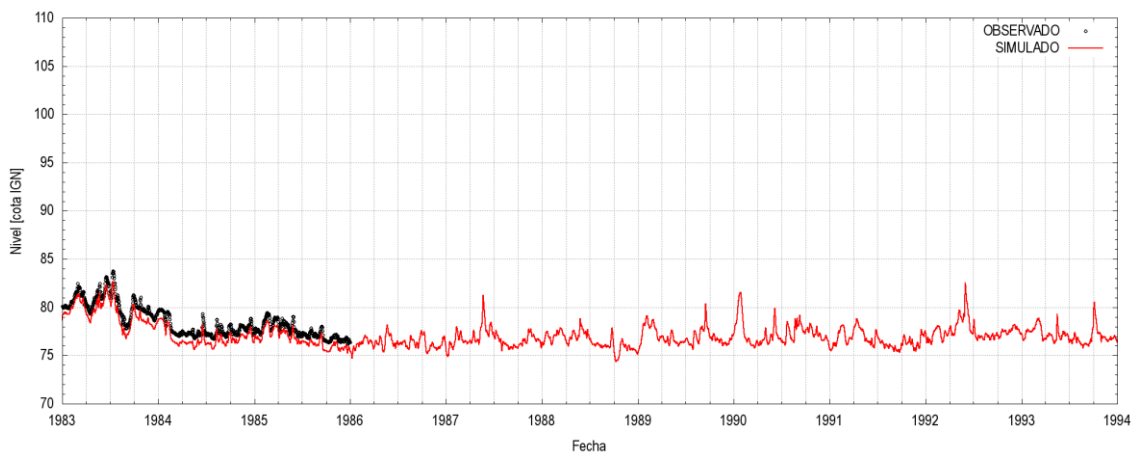
**i) Corpus**



*j) Pto. Doce*



*k) Colonia Cantera*



*l) La Mina*

**Figura 4.5.** Comparación entre niveles observados y simulados con el modelo MOAGAR-3 para la etapa previa al llenado, en las estaciones de verificación.

**Tabla 4.4.** Indicadores de bondad de ajuste para la etapa previa al llenado, en las estaciones de verificación.

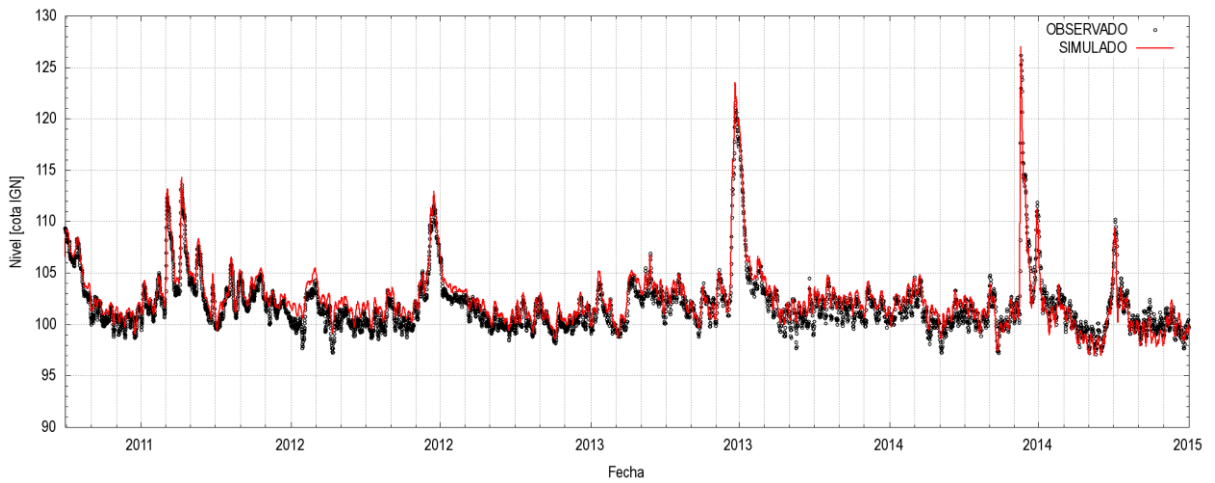
| Estación         | MED (m) | RMSE (m) | R <sup>2</sup> | NSE  |
|------------------|---------|----------|----------------|------|
| Libertad         | 1,22    | 1,58     | 0,97           | 0,91 |
| Ita Pyte         | 0,13    | 0,95     | 0,95           | 0,94 |
| Lomas Valentinas | 1,16    | 1,43     | 0,99           | 0,96 |
| Montecarlo       | 0,72    | 0,90     | 0,99           | 0,96 |
| San Rafael       | 0,97    | 1,08     | 0,99           | 0,97 |
| Puerto Mineral   | -0,85   | 0,99     | 0,99           | 0,93 |
| Capitán Meza     | -1,43   | 1,63     | 0,93           | 0,58 |
| Puerto Gisela    | -1,27   | 2,37     | 0,76           | 0,51 |
| Corpus           | -0,42   | 0,96     | 0,89           | 0,76 |
| Colonia Cantera  | 0,46    | 0,52     | 0,99           | 0,95 |
| La Mina          | 0,91    | 0,92     | 0,99           | 0,68 |

#### 4.5 Escenario a cota definitiva

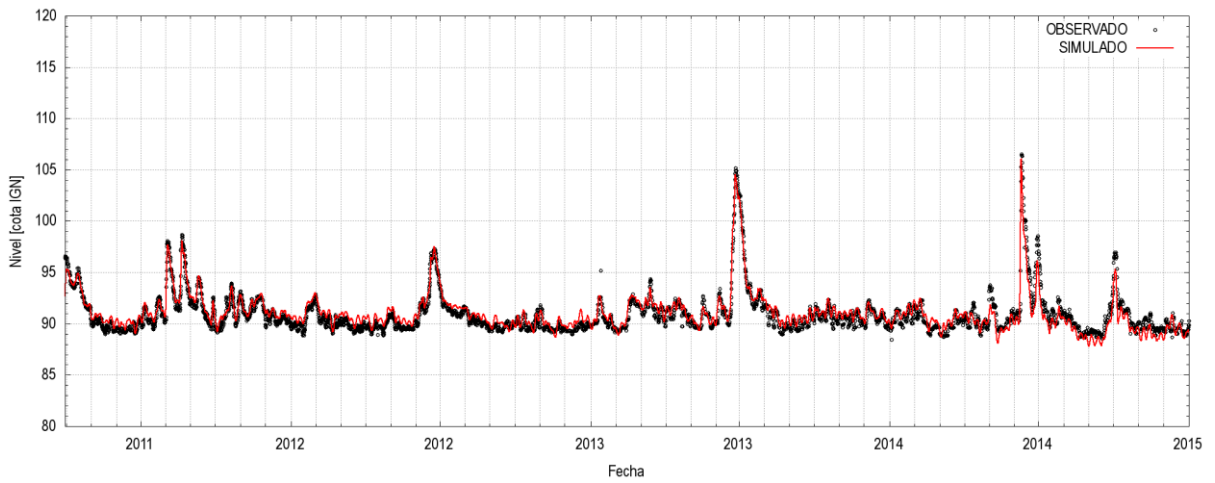
Se aplicó el modelo *MOAGAR-3*, calibrado para la etapa previa al llenado, para simular la etapa a cota definitiva del embalse, sobre el la ventana de tiempo que se extiende entre abril de 2011 y enero de 2015. Cabe destacarse que para este período no se cuenta con registros en las estaciones de calibración Ita Cuá, R11 y Puente de la Amistad. También se destaca que los registros en la estación Santa Ana fueron discontinuados, reiniciándose su lectura recién a partir de abril de 2013.

La Figura 4.6 muestra los resultados obtenidos para todas las estaciones de calibración con datos. Se observa un sesgo sistemático del modelo a sobrestimar los niveles. La Tabla 4.5 presenta los indicadores de bondad de ajuste, donde el sesgo sistemático queda reflejado en los valores siempre negativos de la diferencia de valores medios, de entre 0,06 y 0,76 m en valor absoluto. Este sesgo estaría indicando la ocurrencia de una suavización del cauce del río debido a la presencia del embalse de Yacyretá, lo cual puede interpretarse como indicativo del cambio de textura de la superficie debido a la degradación de la vegetación sometida a inundación (permanente o temporaria).

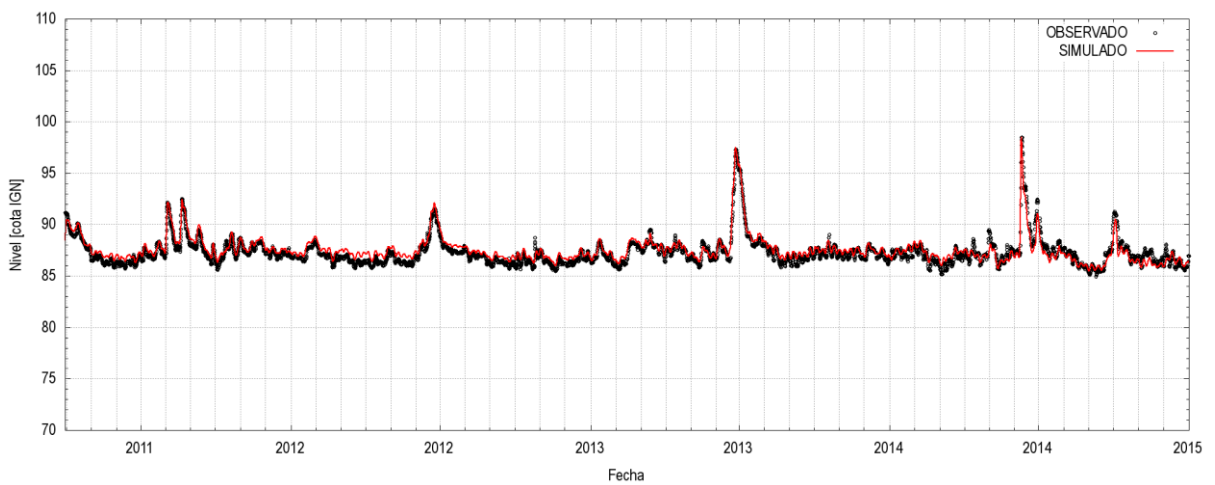
Se procedió por lo tanto a la recalibración del modelo *MOAGAR-3* para la etapa a cota definitiva. A fin de identificar los cambios en los parámetros de la manera más genuina posible, se utilizaron para la nueva calibración las mismas estaciones que en el caso anterior. Para suplir la falta de información en Santa Ana, los Tramos 1 y 2 se recalibraron juntos, manteniendo la relación entre valores del coeficiente de Manning obtenidos en el caso anterior, y utilizando una única curva de factor de rugosidad. Para los Tramos 5 y 6 se mantuvieron los parámetros de la etapa previa al llenado, ya que no se cuenta con información para ajustarlos debido a la falta de registros en R11 y Puente de la Amistad.



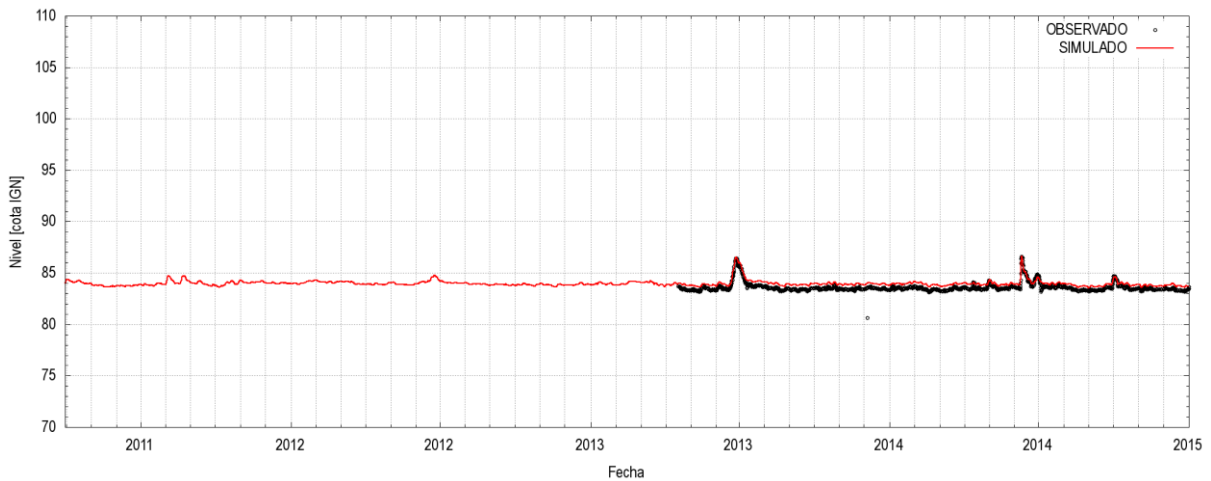
**a) Puerto Iguazú**



**b) El Dorado**



**c) Libertador Gral. San Martín**



d) Santa Ana

**Figura 4.6.** Comparación entre niveles observados y simulados con el modelo MOAGAR-3 (calibrado para etapa previa al llenado) para la etapa a cota definitiva, en las estaciones de calibración.

**Tabla 4.5.** Indicadores de bondad de ajuste para la etapa a cota definitiva (con modelo calibrado para etapa previa al llenado), en las estaciones de calibración.

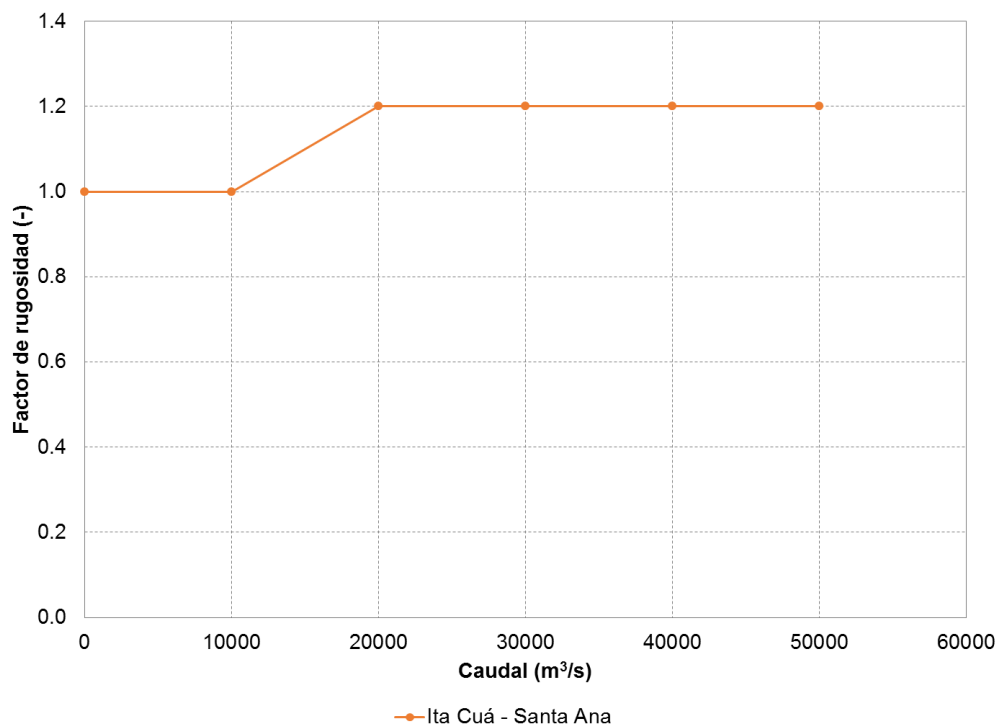
| Estación                    | MED (m) | RMSE (m) | R <sup>2</sup> | NSE  |
|-----------------------------|---------|----------|----------------|------|
| Puerto Iguazú               | -0,60   | 0,98     | 0,93           | 0,89 |
| El Dorado                   | -0,18   | 0,66     | 0,90           | 0,89 |
| Libertador Gral. San Martín | -0,26   | 0,50     | 0,91           | 0,87 |
| Santa Ana                   | -0,37   | 0,40     | 0,90           | 0,21 |

Los valores obtenidos para los parámetros por el proceso de auto-calibración para la etapa a cota definitiva se muestran en la Tabla 4.6 (coeficiente de Manning) y la Figura 4.7 (factor de rugosidad para los Tramos 1 y 2).

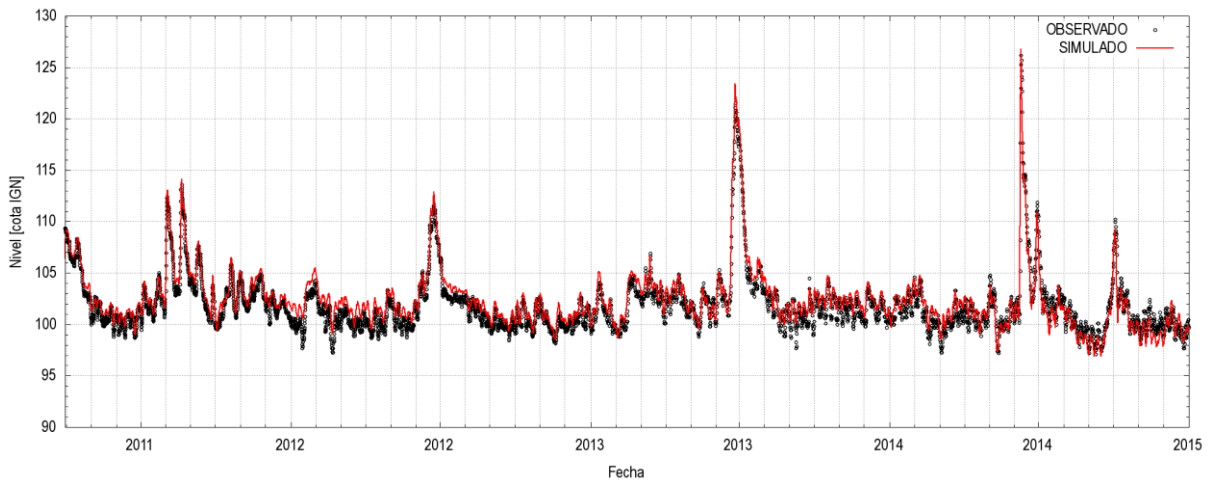
En la Figura 4.7 se muestran los resultados obtenidos para todas las estaciones de calibración con datos. Se observa que el sesgo sistemático fue esencialmente corregido, como era de esperarse. Los indicadores de bondad de ajuste se presentan en la Tabla 4.6, observándose una mejora de todos ellos respecto del uso del modelo calibrado para la etapa previa al llenado.

**Tabla 4.6.** Coeficientes de Manning luego de la calibración para la etapa a cota definitiva.

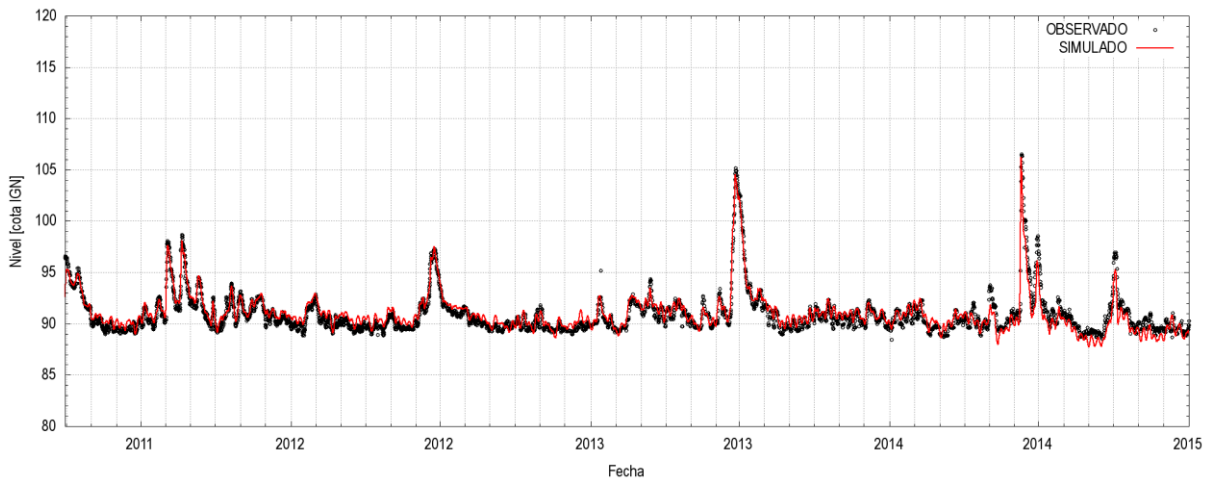
| Tramo                               | Manning de cauce | Manning de planicie |
|-------------------------------------|------------------|---------------------|
| Tramo 1, Posadas - Ita Cuá          | 0,0255           | 0,10                |
| Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana        | 0,0300           | 0,10                |
| Tramo 3, Santa Ana – San Martín     | 0,0379           | 0,13                |
| Tramo 4, San Martín – El Dorado     | 0,0466           | 0,10                |
| Tramo 5, El Dorado – R11            | 0,0477           | 0,19                |
| Tramo 6, R11 - Itaipú               | 0,0530           | 0,10                |
| Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas | 0,0600           | 0,10                |



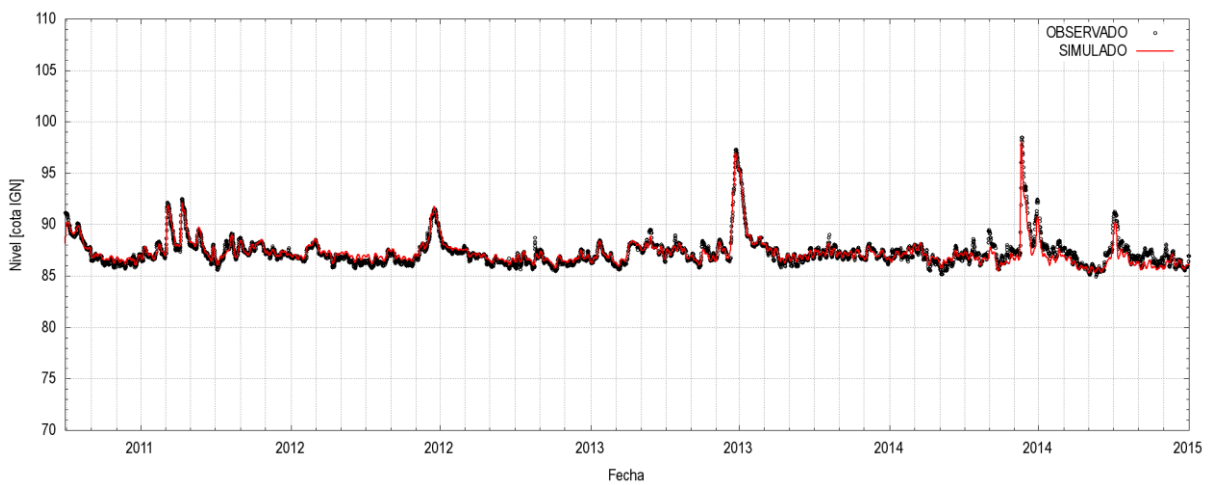
**Figura 4.7.** Curvas del factor de rugosidad luego de la calibración para la etapa a cota definitiva.



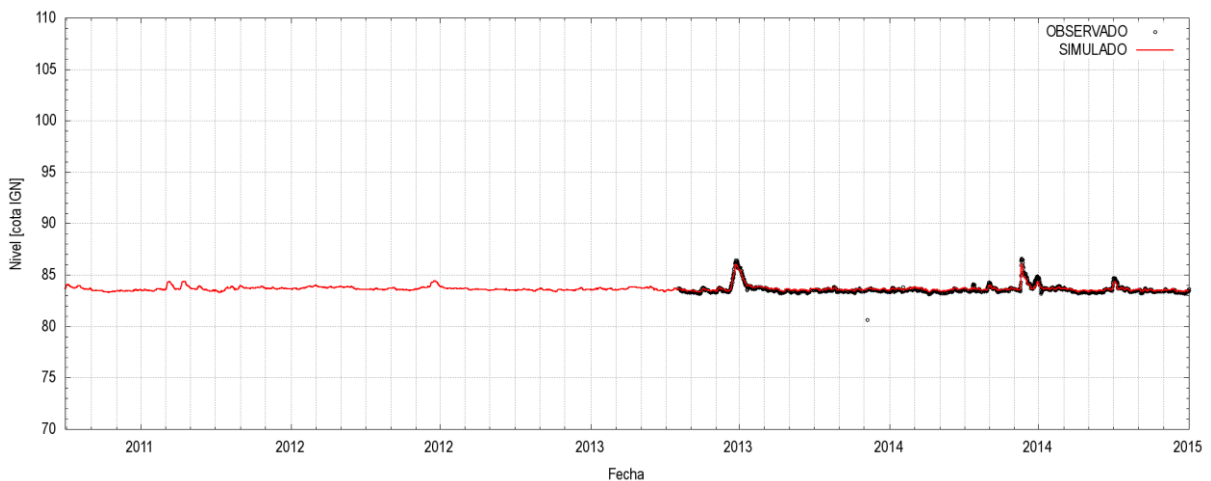
**a) Puerto Iguazú**



**b) El Dorado**



**c) Libertador Gral. San Martín**



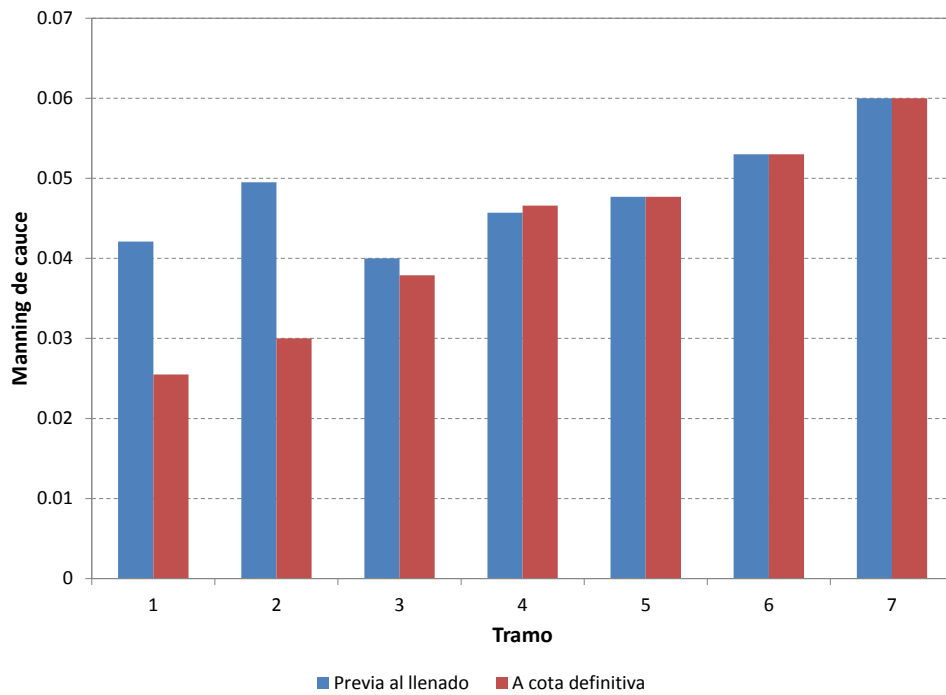
d) Santa Ana

**Figura 4.8.** Comparación entre niveles observados y simulados con el modelo MOAGAR-3 calibrado para etapa a cota definitiva, en las estaciones de calibración.

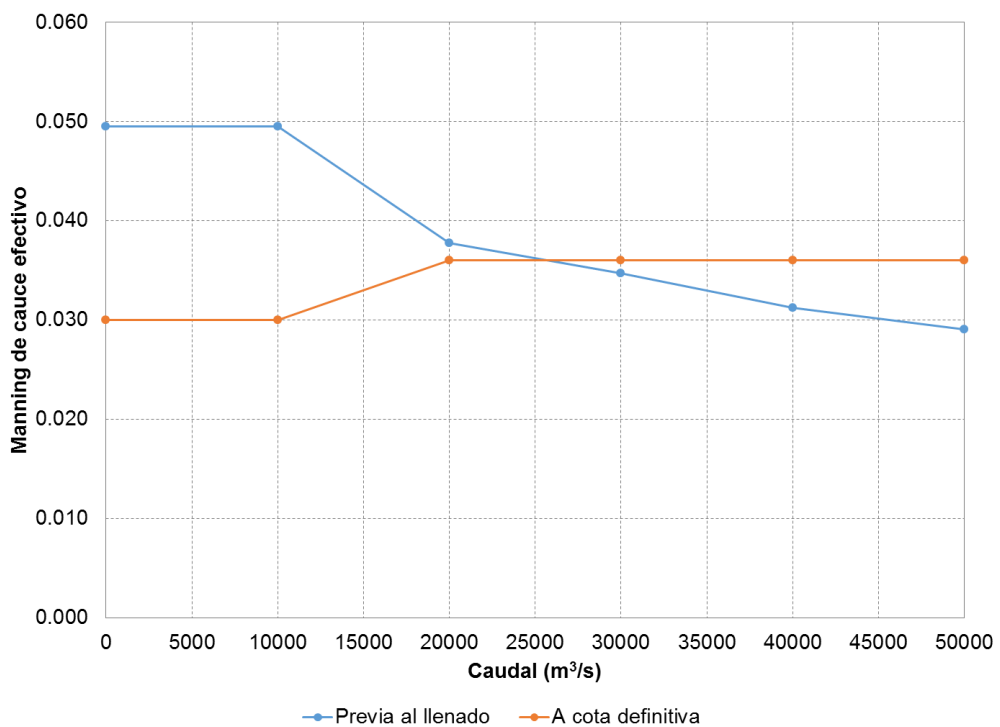
**Tabla 4.7.** Indicadores de bondad de ajuste para la etapa a cota definitiva, en las estaciones de calibración.

| Estación                    | MED (m) | RMSE (m) | R <sup>2</sup> | NSE  |
|-----------------------------|---------|----------|----------------|------|
| Puerto Iguazú               | -0,55   | 0,96     | 0,93           | 0,90 |
| El Dorado                   | -0,13   | 0,65     | 0,90           | 0,90 |
| Libertador Gral. San Martín | 0,01    | 0,43     | 0,91           | 0,91 |
| Santa Ana                   | -0,06   | 0,16     | 0,92           | 0,87 |

Como una media del cambio de rugosidad entre ambas etapas, en la Figura 4.9a se grafica el coeficiente de Manning de cauce para cada tramo, donde se observa que la disminución para la etapa a cota definitiva se concentra sobre todo en los dos primeros tramos, disminuyendo rápidamente hasta desaparecer en el Tramo 5. La Figura 4.9b muestra la variación con el caudal del coeficiente de Manning de cauce efectivo del Tramo 2 para ambas etapas, donde se observa que la diferencia desaparece para caudales crecientes, e incluso se revierte. Para interpretar correctamente este último gráfico, hay que tener en cuenta que cada caudal representa un nivel de agua distinto en ambas etapas; específicamente, un nivel más alto para la etapa a cota definitiva (sobre todo a bajos caudales), lo cual indica que también está influyendo un factor geométrico. Adicionalmente, en ella no se tiene en cuenta la contribución de la rugosidad de la planicie, que aportaría más a la etapa a cota definitiva (seguramente compensando la reversión a altos caudales que muestra la Figura 4.9b).



**a) Coeficiente de Manning del cauce**



**b) Coeficiente de Manning del cauce efectivo en función del caudal**

**Figura 4.9.** Comparación de rugosidad entre las etapas previa al llenado y a cota definitiva.

## 5 CONCLUSIONES

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

- Se recabó mayor información hidrométrica, precisando la existente y complementándola. Se presentó la información actualizada sobre la ubicación, fuentes de datos y ventanas temporales disponibles para 21 estaciones hidrométricas.
- Los mayores aportes laterales al Alto Paraná, en la zona de modelación, provienen de la margen izquierda (Provincia de Misiones, Argentina). Del análisis de tres eventos de crecida de los principales arroyos que aportan al Alto Paraná surge que el volumen aportado por ellos, relativo al escurrido por el río Paraná, varía entre el 4% y el 7%, lo cual se considera menor, pero significativo. El aporte relativo sobre una base anual resulta mucho menor, generalmente por debajo del 1%.
- De la comparación de secciones transversales entre el modelo preliminar (*MOAGAR-2*), con 62 secciones transversales, y el modelo *Corpus2009*, con 51 secciones, surgió que comparten entre sí 35 secciones. Se incorporaron al modelo *MOAGAR-2* las 16 secciones transversales adicionales provenientes del modelo *Corpus2009*, generándose el modelo *MOAGAR-3*. Además, en este modelo se introdujeron nuevas secciones por interpolación geométrica cada aproximadamente 2000 m, obteniéndose un total de 273 secciones.
- En el modelo *MOAGAR-3* se utilizó un método alternativo para calcular la conductividad hidráulica, en el cual la sección transversal se divide en fajas verticales, separando zonas donde la velocidad media difiere, el cual resulta más apropiado para secciones compuestas.
- Se calibró el modelo *MOAGAR-3*, operándolo solamente hasta la ciudad de Posadas, para la etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá. Los parámetros básicos de calibración fueron los coeficientes de rugosidad de Manning, que se consideraron uniformes en los 7 tramos entre las estaciones de calibración, y curvas de factor de rugosidad por tramo. Para cada tramo se consideraron dos valores del coeficiente de rugosidad de Manning: uno para el cauce y otro para la planicie. Se desarrolló y aplicó un algoritmo automático para calibrar. Los únicos tramos para los cuales fueron necesarias curvas de factor de rugosidad fueron los dos primeros.
- Se verificó el modelo calibrado, comparando con niveles registrados en 12 estaciones secundarias.
- La aplicación del modelo *MOAGAR-3* (calibrado para la etapa previa al llenado) para simular la etapa a cota definitiva del embalse mostró un sesgo sistemático del modelo a sobrestimar los niveles, que estaría indicando la ocurrencia de una suavización del cauce del río debido a la presencia del embalse de Yacyretá.

- Se recalibró el modelo *MOAGAR-3* para la etapa a cota definitiva, resultando coeficientes de Manning de cauce mayores para los dos primeros tramos, diferencia que disminuye rápidamente hacia aguas arriba. La diferencia en el coeficiente de Manning efectivo, resultante de multiplicar el primero por el factor de rugosidad, también disminuye rápidamente para caudales crecientes.
- Se dispone entonces de un modelo hidrodinámico actualizado y calibrado con precisión para la zona de estudio, con excepción del tramo de embalse entre Posadas y la presa de Yacyretá, el cual será incorporado en la próxima fase del estudio. También se analizará entonces el detalle del tramo inmediatamente aguas abajo de las Cataratas.

## REFERENCIAS

Almiron, R., 2009. "Funcionamiento hidráulico del tramo Iguazú Posadas del río Paraná". Informe EBY.

Weber, J., 2003. "Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación". Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, marzo.