



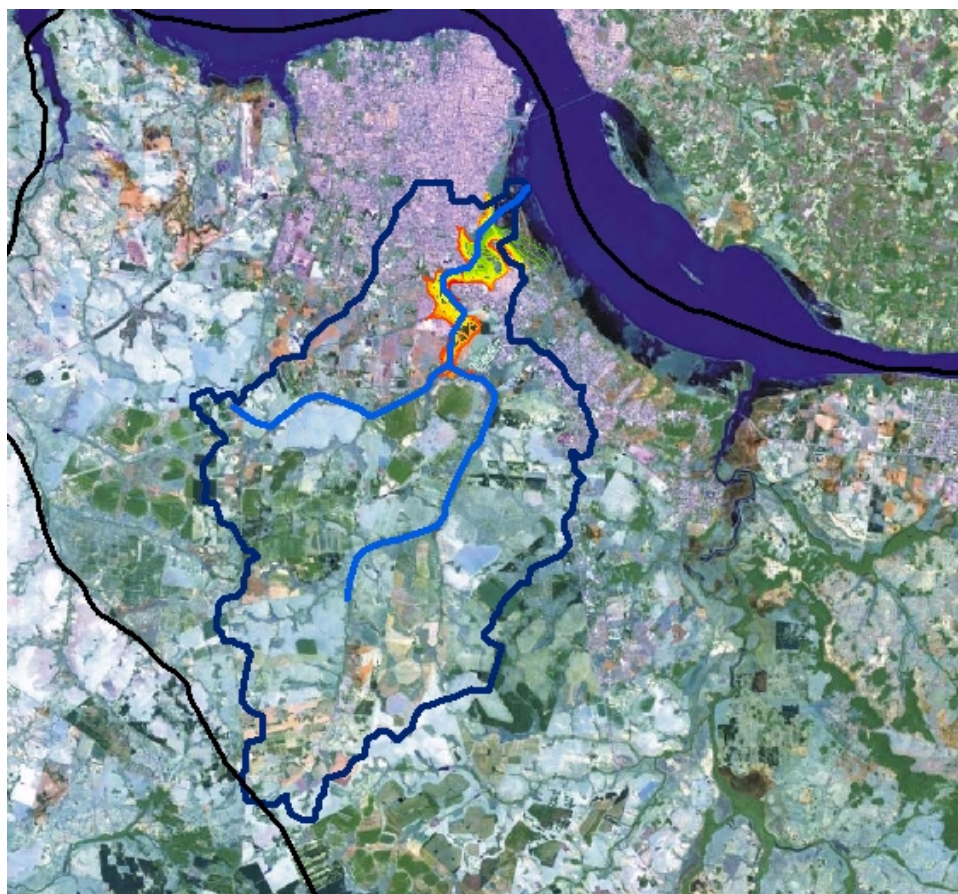
**INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS  
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS  
REPÚBLICA ARGENTINA



ENTIDAD BINACIONAL  
**YACYRETA**  
GENERANDO FUTURO

ESTUDIO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO DE LOS  
SUBEMBALSES DE YACYRETÁ

# MODELACIÓN DEL ARROYO ZAIMÁN – II PARTE



*Proyecto LHA 287*  
*Informe LHA 04-287-08*  
Ezeiza, Diciembre de 2008

**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**

Ing. Alejo SARUBBI

Ing. Mag. Mariano RE

Sr. Emilio A. LECERTÚA

Sr. Martín SABAROTS GERBEC

**INFORME PRODUCIDO POR**

Ángel N. MENÉNDEZ, Emilio LECERTÚA, Martín SABAROTS GERBEC, Alejo SARUBBI

**Colaboración de**

Marcelo CARDINALI, Mauricio PERAYRE, Ricardo CANO, Andrés Ayala, Daniel MAXIT (EBY)

## **MODELACIÓN DEL ARROYO ZAIMÁN – II PARTE**

### **RESUMEN**

Se describen los ajustes efectuados en la calibración del modelo matemático hidrológico-hidráulico del A° Zaimán, en función de datos geométricos inciertos y de nuevas mediciones hechas disponibles. Se aplica el modelo para analizar los efectos del incremento de urbanización en la subcuenca de Villa Dolores, obtener los mapas de riesgo de inundación para distintas recurrencias y establecer el efecto del puente de la Ruta 12.

**DESCRIPTORES TEMÁTICOS:** modelo matemático hidrológico, modelación hidrológica continua, modelo matemático hidráulico, riesgo de inundación.

**DESCRIPTORES GEOGRÁFICOS E INSTITUCIONALES:** Arroyo Zaimán, embalse de Yacyretá, Entidad Binacional Yacyretá.

## ÍNDICE

### **1 INTRODUCCIÓN**

### **2 AJUSTES DEL MODELO**

#### **2.1 NECESIDAD DE AJUSTES**

#### **2.2 VERIFICACIÓN**

#### **2.3 CAUDALES PICO**

### **3 APLICACIÓN DEL MODELO**

#### **3.1 CONDICIONES HISTÓRICAS**

#### **3.2 EFECTO DEL EMBALSE SOBRE CRECIDAS INTERANUALES**

#### **3.3 EFECTO DEL EMBALSE PARA CONDICIONES NORMALES**

#### **3.4 EFECTO DEL PUENTE DE RUTA 12**

#### **3.5 SUBCUENCA VILLA DOLORES**

#### **3.6 PRODUCTOS DEL MODELO**

#### **3.7 EVENTO EXTRAORDINARIO**

### **4 CONCLUSIONES**

## 1 INTRODUCCIÓN

La Entidad Binacional Yacyretá (EBY) ha encomendado al INA la ejecución de estudios para desarrollar una metodología que permita determinar el comportamiento hidrológico-hidráulico de dos de los principales arroyos asociados a subembalses urbanos del embalse de Yacyretá, a saber, el Zaimán (margen argentina) y el Mboi Caé (margen paraguaya) bajo distintos escenarios hidrometeorológicos. La metodología consiste en la implementación de sendos modelos matemáticos hidrológico-hidráulicos, bajo el paradigma de la simulación continua en el tiempo.

En el Primer Informe<sup>1</sup> se describió la base de datos construida para el A° Zaimán, que sirve de soporte para la modelación. En el Segundo Informe<sup>2</sup> se presentó la implementación y calibración del modelo hidrológico-hidráulico del arroyo Zaimán. En el Tercer Informe<sup>3</sup> se describió la base de datos del A° Mboi Caé. En este Informe se completa la presentación de la modelación del A° Zaimán, lo que incluye ajustes en la calibración y su explotación.

---

<sup>1</sup> “Base de Datos del Arroyo Zaimán”, Informe LHA-INA 01-287-07, setiembre de 2007.

<sup>2</sup> “Modelación del Arroyo Zaimán”, Informe LHA-INA 02-287-08, enero de 2008.

<sup>3</sup> “Base de Datos del Arroyo Mboi Caé”, Informe LHA-INA 03-287-07, enero de 2008.

## **2 AJUSTES DEL MODELO**

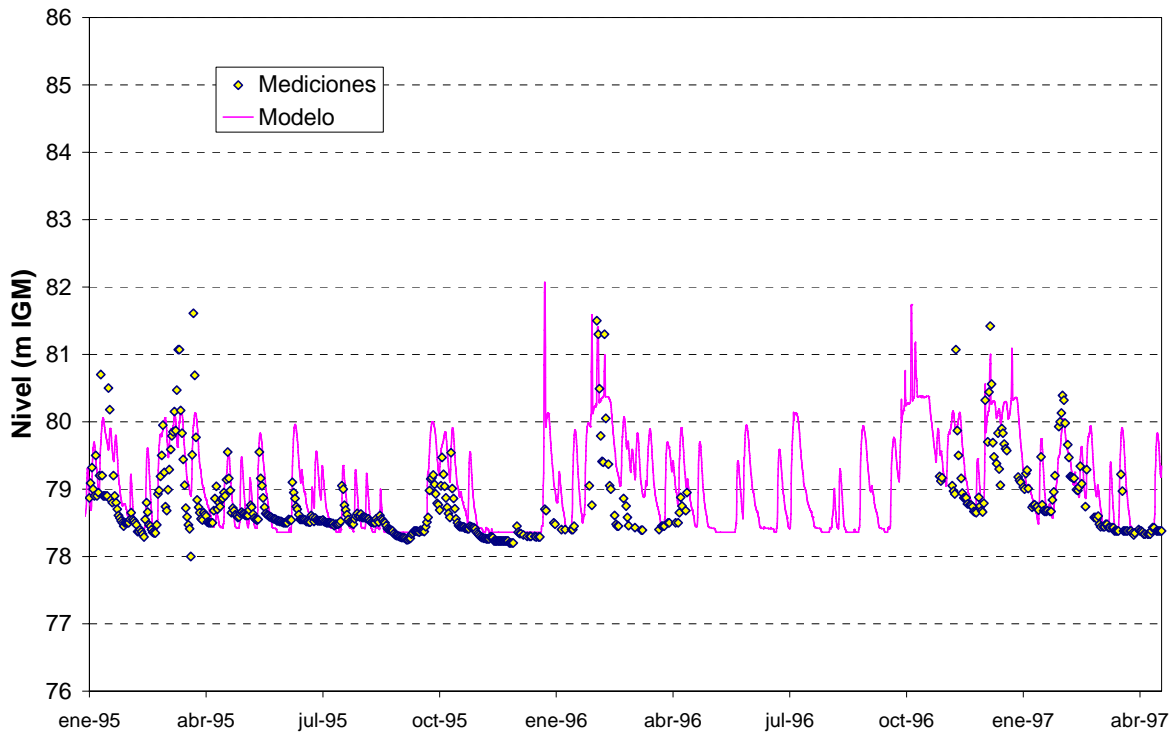
### **2.1 NECESIDAD DE AJUSTES**

A posteriori de la calibración del modelo hidráulico del A° Zaimán, surgieron elementos que condujeron a la necesidad de efectuar algunos ajustes, a saber:

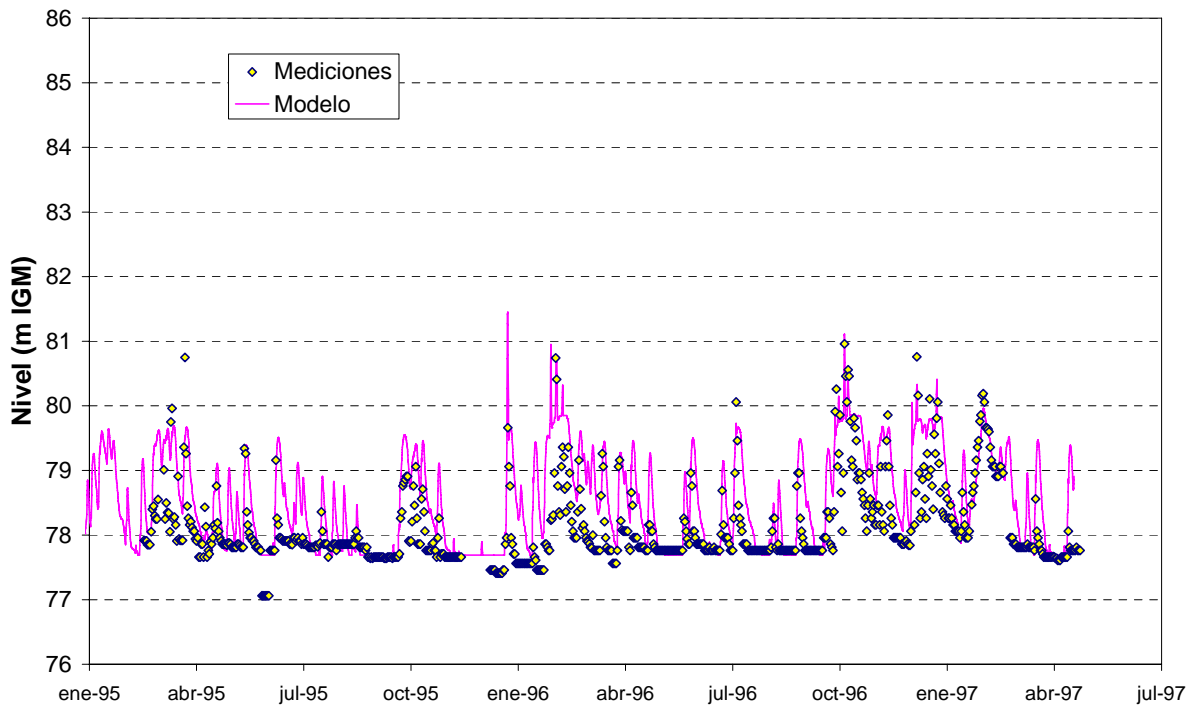
- A partir de una revisión de los resultados del modelo para la evolución del nivel de agua en la Ruta Nacional 12, se consideró que los niveles mínimos eran algo elevados en relación a los medidos, en el orden de los 0,50 m, lo que indica una representación inadecuada de esa sección transversal para aguas muy bajas. Los movimientos de suelo efectuados en oportunidad de construirse el puente pueden haber modificado parcialmente la sección. Fue necesario disminuir la cota de fondo desde 78,5 m a 78,30 m para alcanzar una representación más adecuada.
- Ensayos efectuados con el modelo suponiendo un embalse a cota 76 m pusieron en evidencia que no se encontraba bien representada la aproximación del A° Zaimán al río Paraná, ya que la cota de fondo de la última sección era de 75,5 m. Se impuso entonces una pendiente acorde a la del terreno, con lo que la cota de esa sección disminuyó a 73,5 m.
- Se recibieron datos de niveles registrados en el Puente de Hormigón El Porvenir; se trata de una serie temporal con dos valores diarios (uno a las 6:00 y otro a las 18:00 horas), que se extiende desde el 3 de enero al 30 de abril de 2008. Al aplicar el modelo a esta ventana de tiempo, la alta resolución temporal de las mediciones permitió detectar que los tiempos de recesión estaban sobrestimados por el modelo. Fue necesario, entonces, reducir drásticamente los tiempos de retardo subterráneo desde las 50 horas a sólo 6 horas. También se recibió un aforo de caudal en la misma sección, para el día 15 de diciembre de 2007, el cual sirvió como verificación.
- Se efectuó una compatibilización de caudales pico con estudios antecedentes, lo cual implicó efectuar los siguientes ajustes para disminuir su intensidad: el almacenamiento máximo en depresiones se incrementó de 20 a 40 mm; la máxima infiltración fue aumentada de 1,3 a 2,0 mm/h; la percolación fue subida desde 0,5 a 0,6 mm/h.

### **2.2 VERIFICACIÓN**

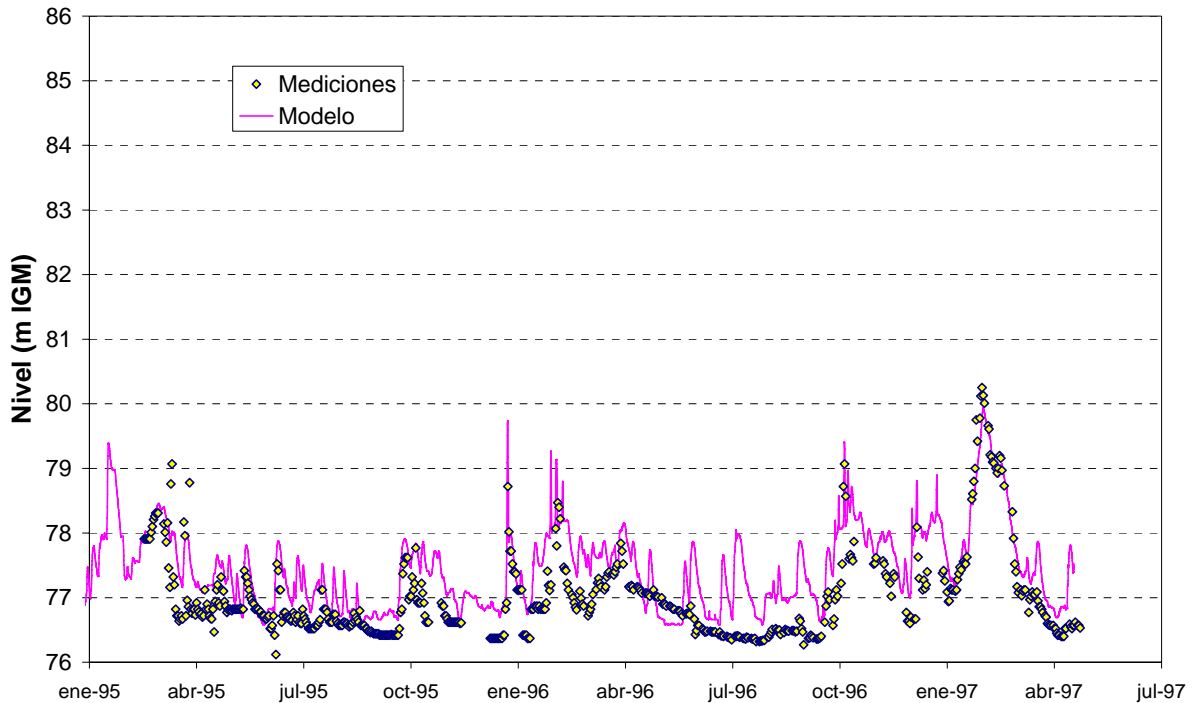
La Figura 2.2.1 muestra la evolución del nivel en la Ruta Nacional 12, la Laguna de Tratamiento y el Puente Ferroviario para la ventana de tiempo que va de enero de 1995 a abril de 1997. Este acuerdo obtenido se considera más satisfactorio que el originalmente presentado en el Segundo Informe.



a) Ruta Nacional 12



b) Laguna de Tratamiento



c) Puente Ferroviario

**Figura 2.2.1:** Comparación entre niveles medidos y calculados en la cuenca baja

En la Figura 2.2.2 se presenta la comparación entre mediciones y resultados del modelo para la evolución del nivel en el Puente de Hormigón El Porvenir. Antes de calificar el nivel de acuerdo, debe tenerse en cuenta que el modelo fue corrido con la serie de precipitaciones de paso diario, de modo que lo que debe esperarse, a priori, es una respuesta suavizada y retrasada. Se observa que, efectivamente, la recesión que muestra el modelo luego de cada crecida es algo más prolongada que lo que indican las mediciones. El hecho de que el modelo proporcione volúmenes de crecida consistentemente más altos se adjudica a que, por un lado, los datos de lluvias utilizados (de la estación INTA-Zaimán) estarían en exceso para representar lo efectivamente precipitado en la cuenca, y, por el otro, a que con dos mediciones diarias de nivel probablemente se hayan perdido algunos picos.

El caudal aforado en el Puente de Hormigón El Porvenir se muestra en la Figura 2.2.3 sobre la serie temporal de caudales calculada con el modelo. Se observa que, tal como sucedía con el nivel, la recesión que muestra el modelo luego de la crecida es algo más prolongada que lo que indica la medición.

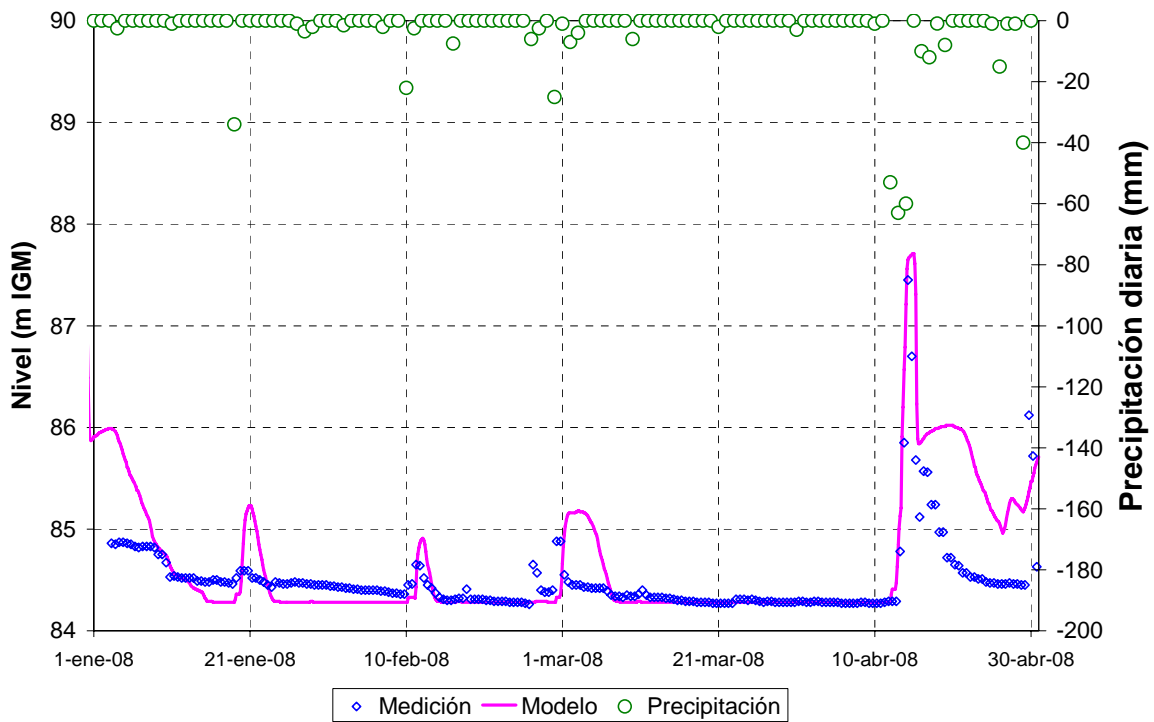


Figura 2.2.2: Comparación entre niveles medidos y calculados en el Puente de Hormigón El Porvenir

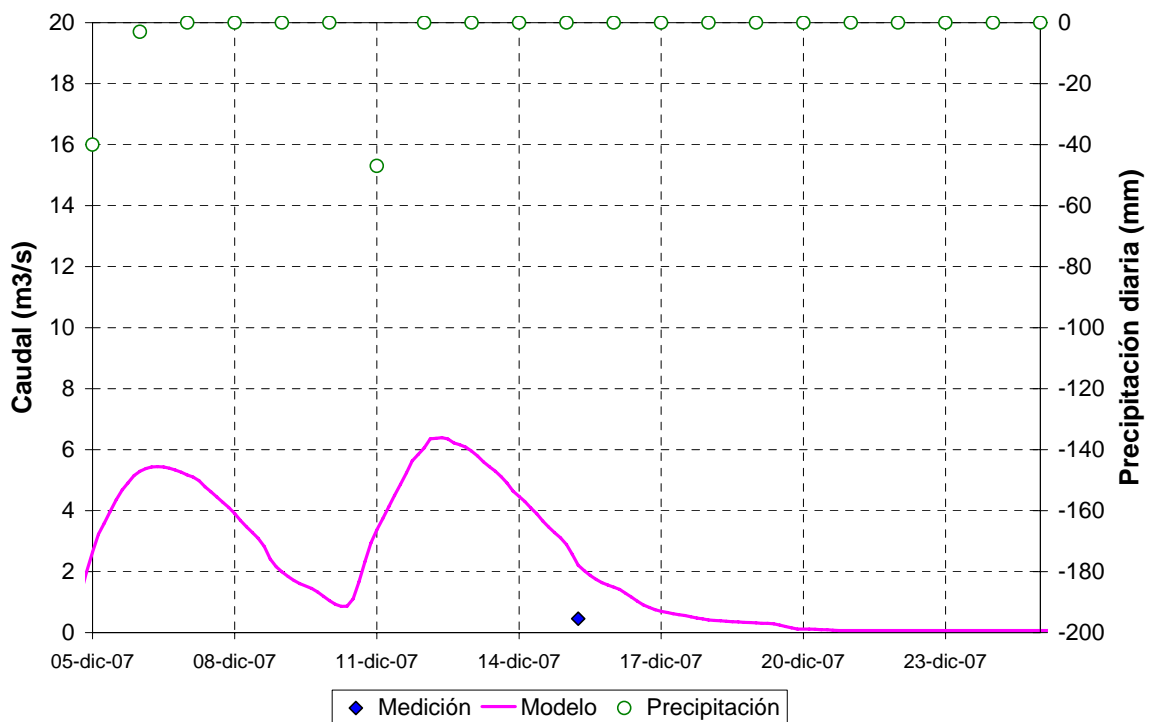


Figura 2.2.3: Comparación entre aforo y serie de caudales en el Puente de Hormigón El Porvenir

### 2.3 CAUDALES PICO

La modelación con precipitaciones de paso diario sólo puede proveer caudales medios diarios. Para poder reproducir los picos diarios es necesario trabajar con series de precipitaciones de paso suficiente como para resolver la distribución temporal de la lluvia durante el día.

Ante la falta de datos de caudal, se recurrió a la estrategia de mantener la compatibilidad con los estudios antecedentes. En particular, se tomó como punto de partida, por su explicación de detalle, los estudios hidrológicos de CIDY<sup>4</sup>. En ellos se utilizó el método de los hidrogramas sintéticos triangulares del SCS (Soil Conservation Service) de EE.UU. En base a los registros de lluvias del período 1951 – 1972 para la ciudad de Posadas, se extrajo información sobre las máximas precipitaciones anuales en periodos de 5, 15, 30 y 60 min, y 3, 6, 12 y 24 hrs de duración, con lo cual se determinaron las siguientes ecuaciones para la distribución temporal de la intensidad de lluvia,  $I(t)$ , asociada a eventos de distintos tiempos de recurrencia,  $Tr$ :

$$Tr = 5 \text{ años} \quad I(t) = 50,71 t^{0,39}$$

$$Tr = 10 \text{ años} \quad I(t) = 58,36 t^{0,38}$$

$$Tr = 25 \text{ años} \quad I(t) = 66,51 t^{0,38}$$

$$Tr = 50 \text{ años} \quad I(t) = 73,13 t^{0,37}$$

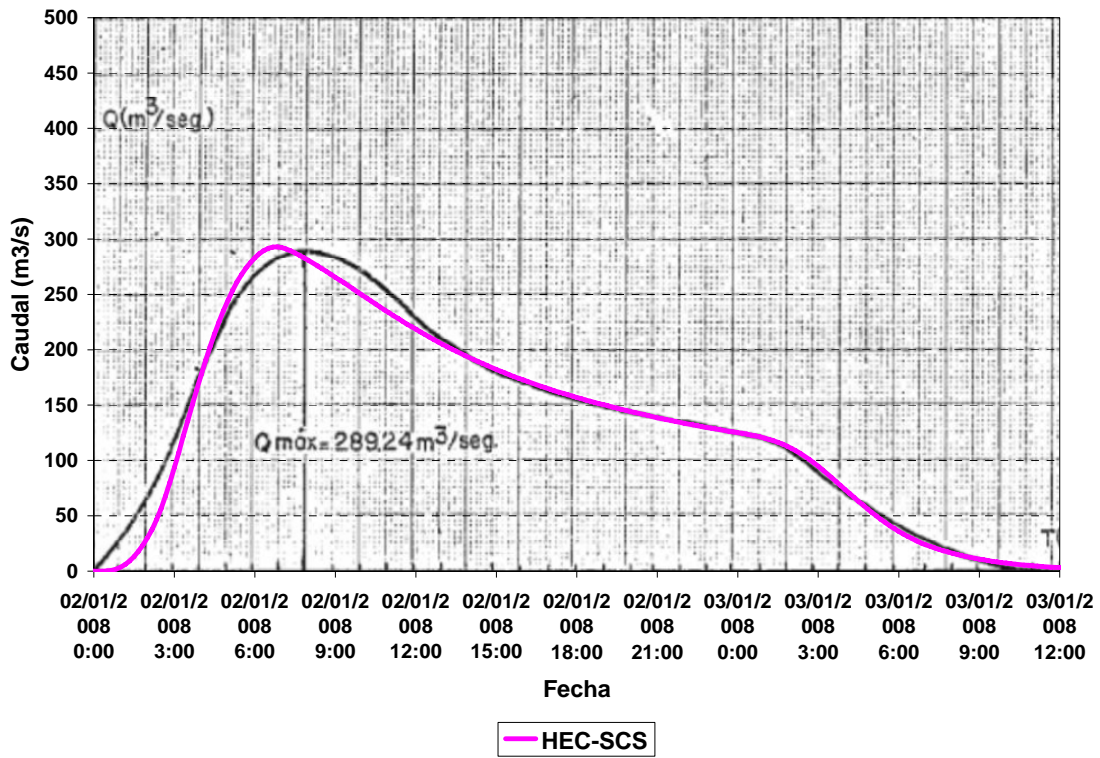
Para la aplicación del método del SCS se utilizaron los siguientes datos: área de la cuenca = 148 km<sup>2</sup>; tiempo de concentración de la cuenca = 6,76 hrs; curva número = 80.

A modo de verificación, en primer lugar se reprodujeron las corridas de CIDY utilizando el HEC-SCS con los mismos parámetros. En la Figura 2.3.1 siguientes se comparan los resultados obtenidos para las tres recurrencias. Las pequeñas diferencias observadas en el período de crecimiento del caudal se deben, seguramente, a alguna diferencia en los parámetros utilizados en ambos modelos.

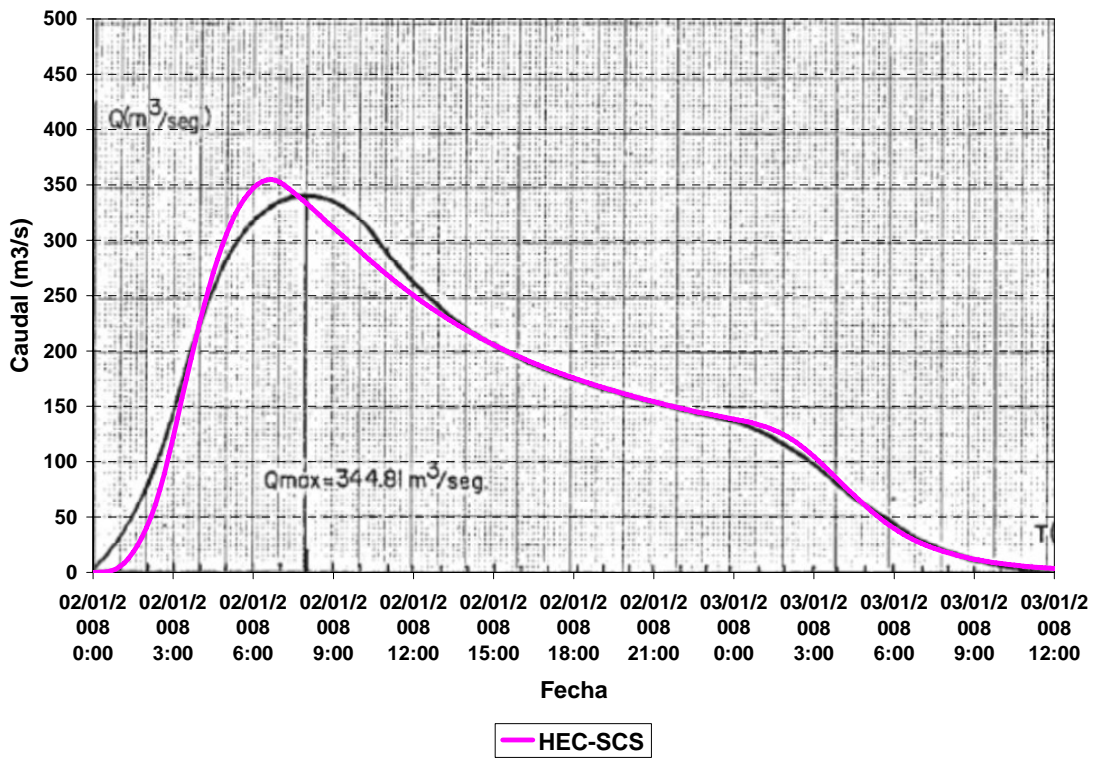
A continuación se llevaron a cabo ensayos con el modelo presente, en base al HEC-SMA, para las precipitaciones de distintas recurrencias. La Figura 2.3.2 muestra la comparación con los resultados del método SCS. Se observa que, con los ajustes efectuados en los parámetros (ver más arriba) se logra reproducir picos de caudal cercanos a los obtenidos por CIDY, aunque los balances de masa vertical difieren entre ambos (el SMA genera menor escurrimiento, sobre todo para las recurrencias bajas). En la Tabla 2.3.1 se efectúa la comparación de los caudales pico. Se observa que las diferencias están dentro del 4% para recurrencias mayores a 10 años, con un máximo de 8% para 5 años.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la respuesta en caudales del sistema es muy sensible a la distribución temporal de la lluvia. Si, por ejemplo, en lugar de la distribución ajustada a las mediciones utilizadas hasta aquí, se tomara el método de los Bloques Alternos, la respuesta sería la mostrada en la Figura 2.3.3. Se observan los altamente significativos incrementos en caudal pico que resultan (obviamente, se mantiene el volumen total escurrido), lo que constituye una indicación del nivel de incertidumbre asociado a esos valores.

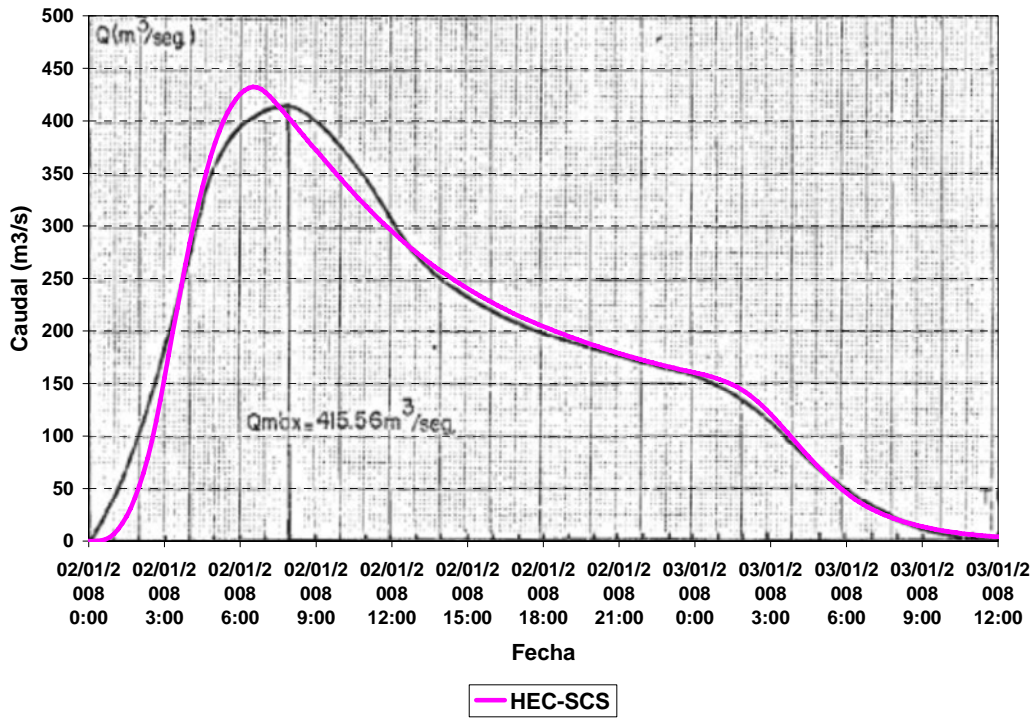
<sup>4</sup> Harza y Consorciados (CIDY), “Estudios hidrológicos de arroyos. Hidrología de arroyos. 1ª Etapa. 2º Informe de Avance”. Volumen 5, 1980



a) *Tr* = 5 años

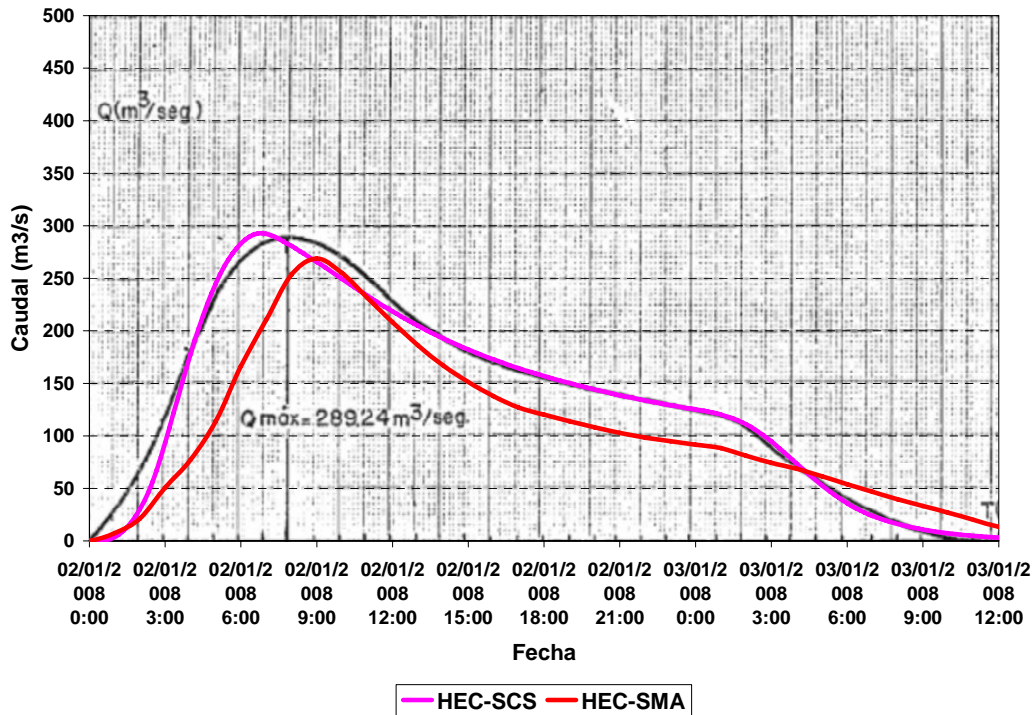


b) *Tr* = 10 años

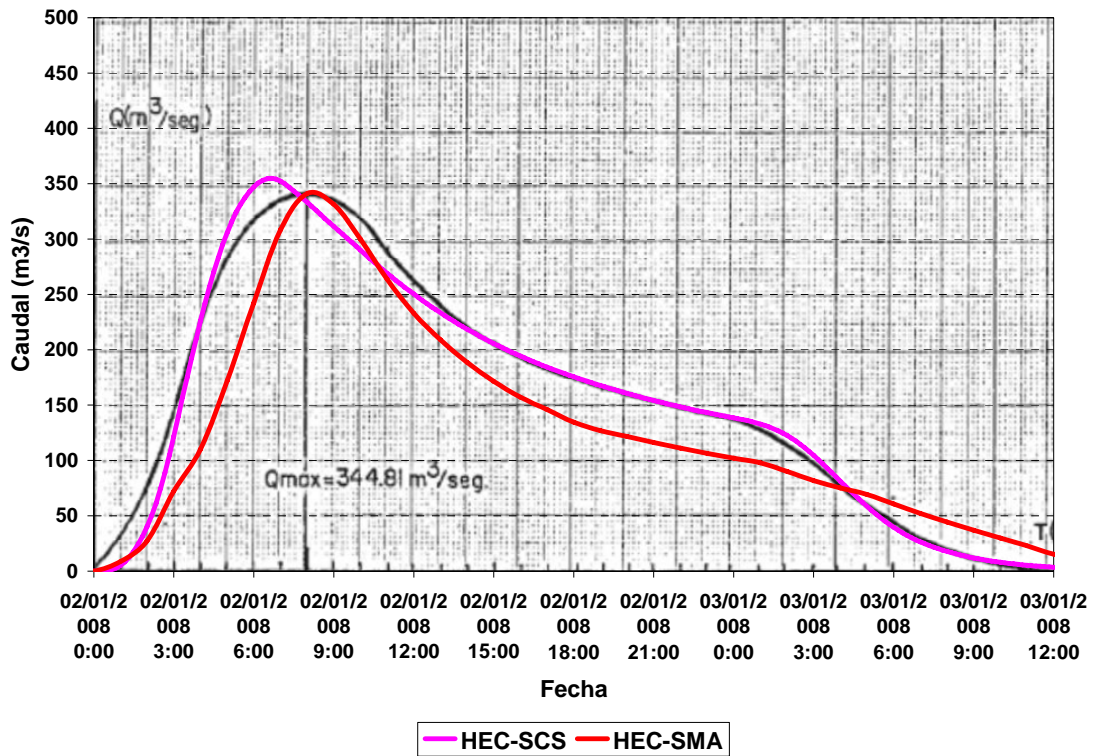


c)  $Tr = 25$  años

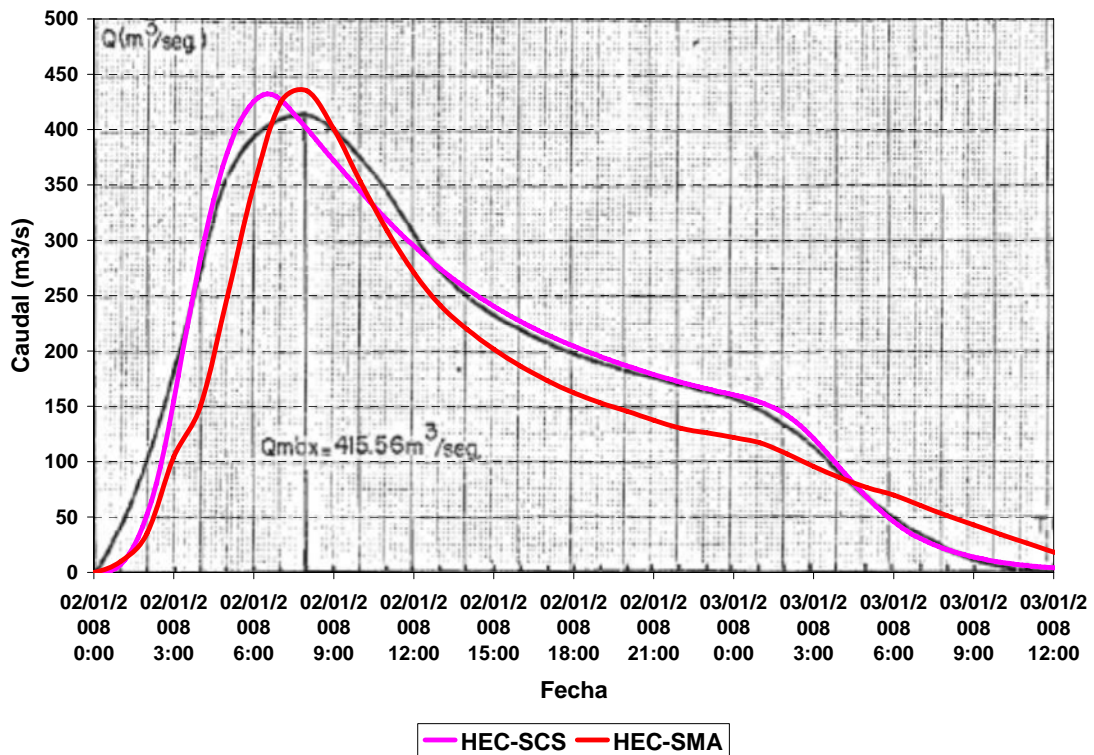
Figura 2.3.1: Comparación de hidrogramas de CIDY con los obtenidos con el HEC-SCS.



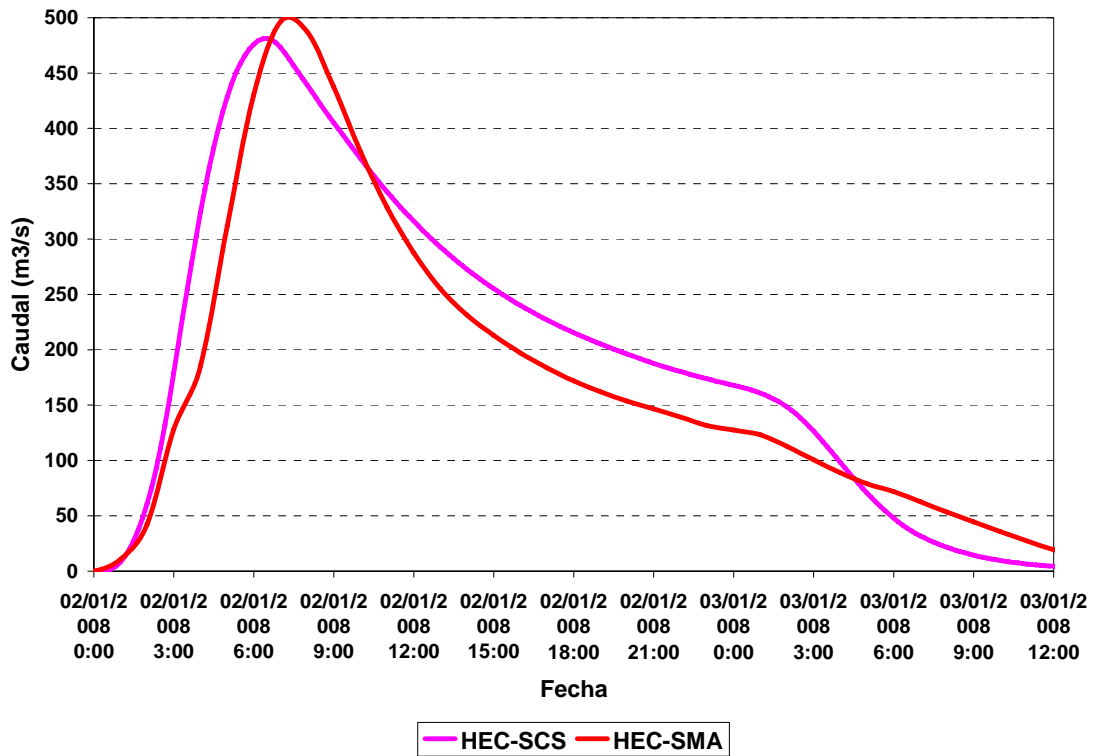
a)  $Tr = 5$  años



b)  $Tr = 10$  años



c)  $Tr = 25$  años

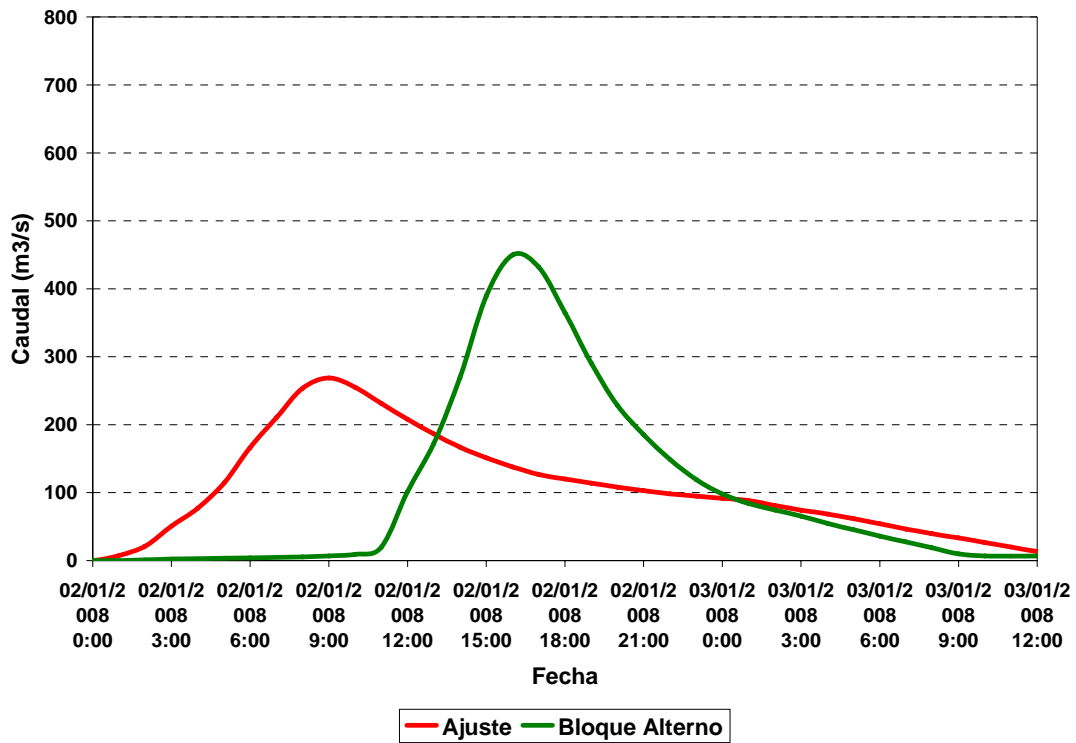


d)  $Tr = 50$  años

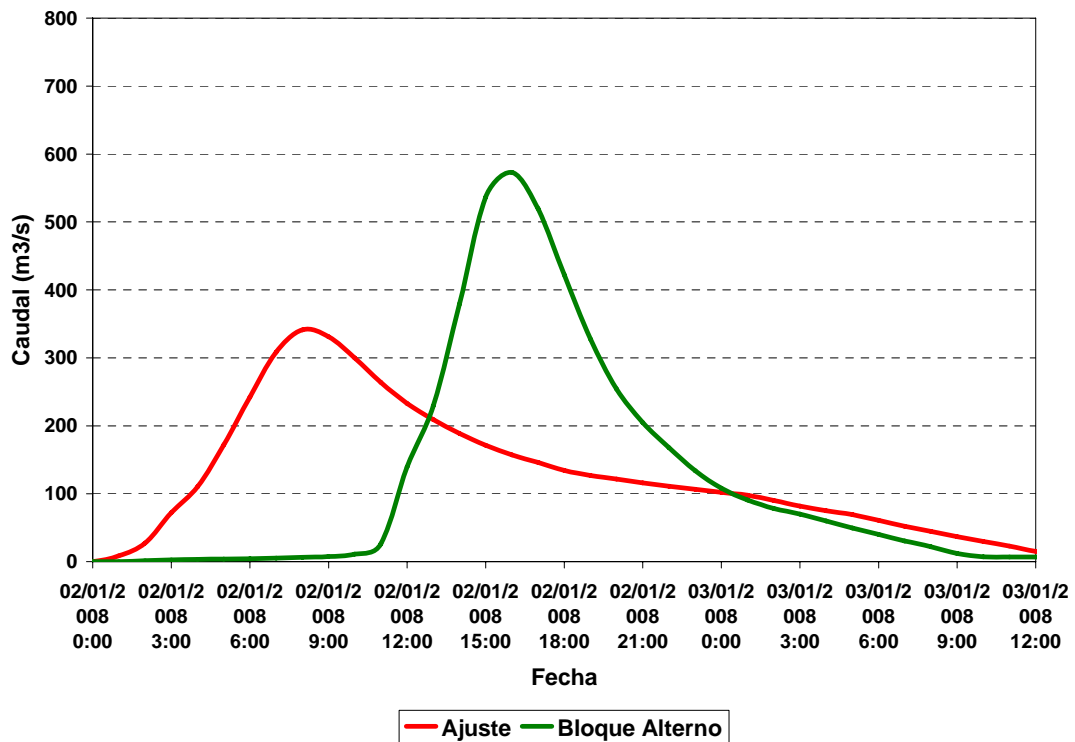
Figura 2.3.2: Comparación de hidrogramas de CIDY con los obtenidos con el HEC-SMA.

Tabla 2.3.1: Comparación de caudales pico.

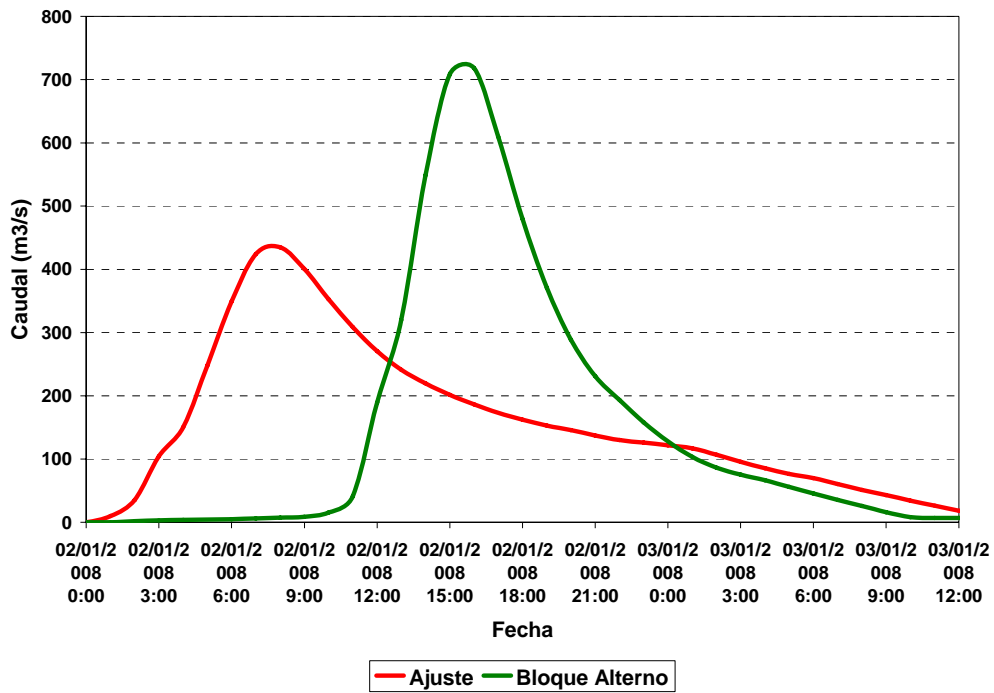
$Tr$ (años)	CIDY	HEC-SCS	HEC-SMA	SMA vs. SCS
5	289	293	269	-8.3%
10	345	355	341	-3.9%
25	416	432	435	+0.6%
50		481	496	+3.1%



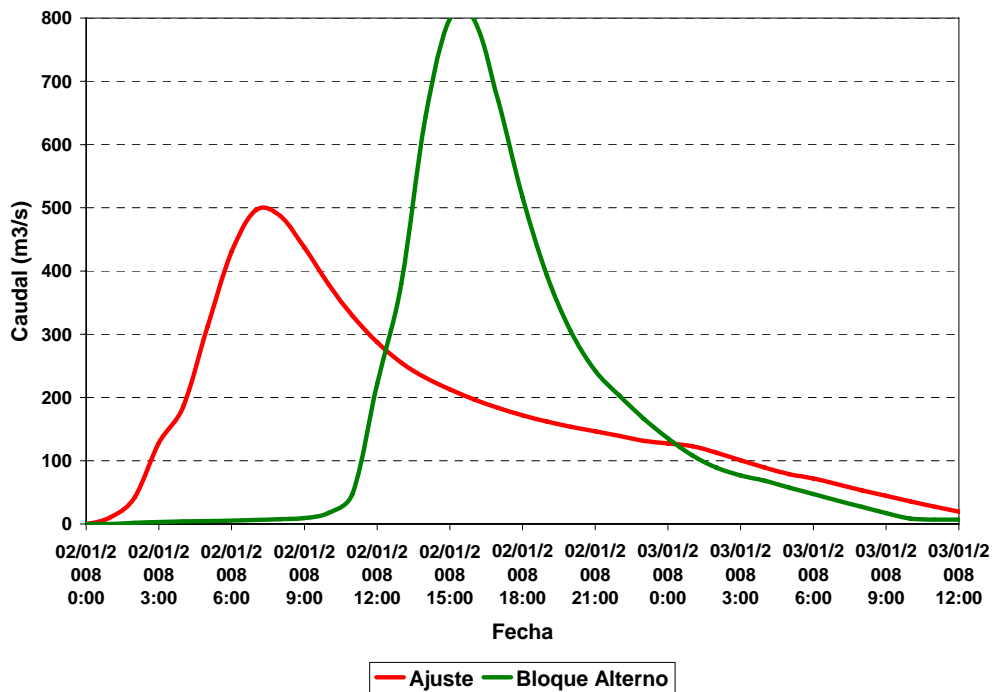
a)  $Tr = 5$  años



b)  $Tr = 10$  años



c)  $Tr = 25$  años



d)  $Tr = 50$  años

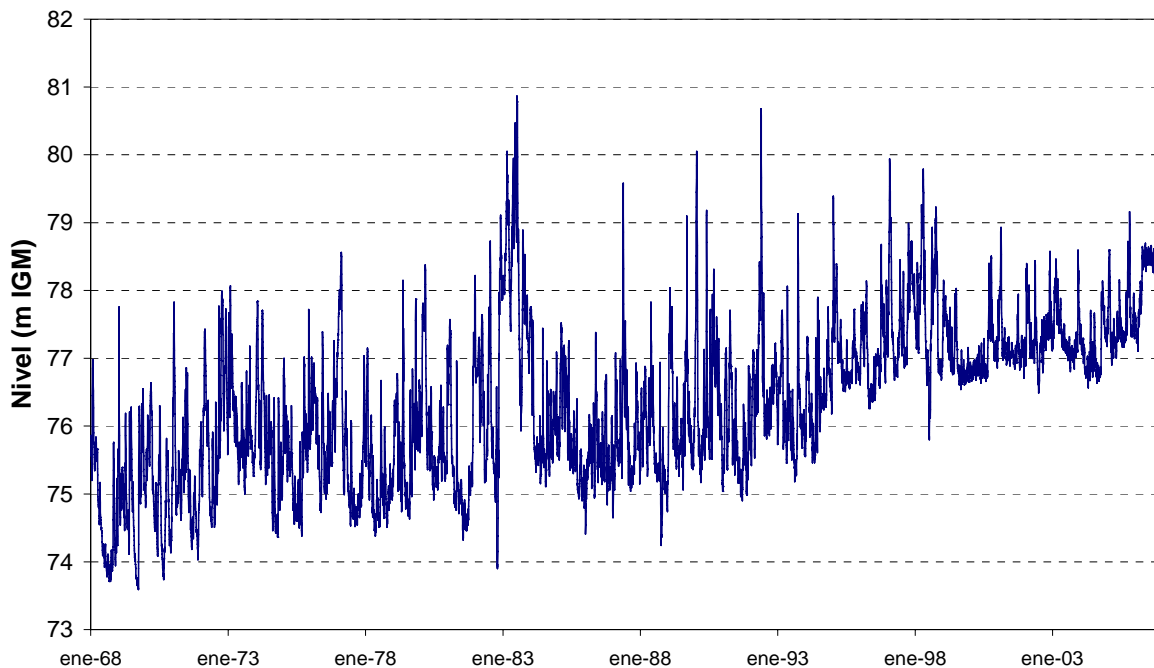
Figura 2.3.3: Comparación de hidrogramas obtenidos con el HEC-SMA para distintas distribuciones temporales de lluvia.

### 3 APLICACIÓN DEL MODELO

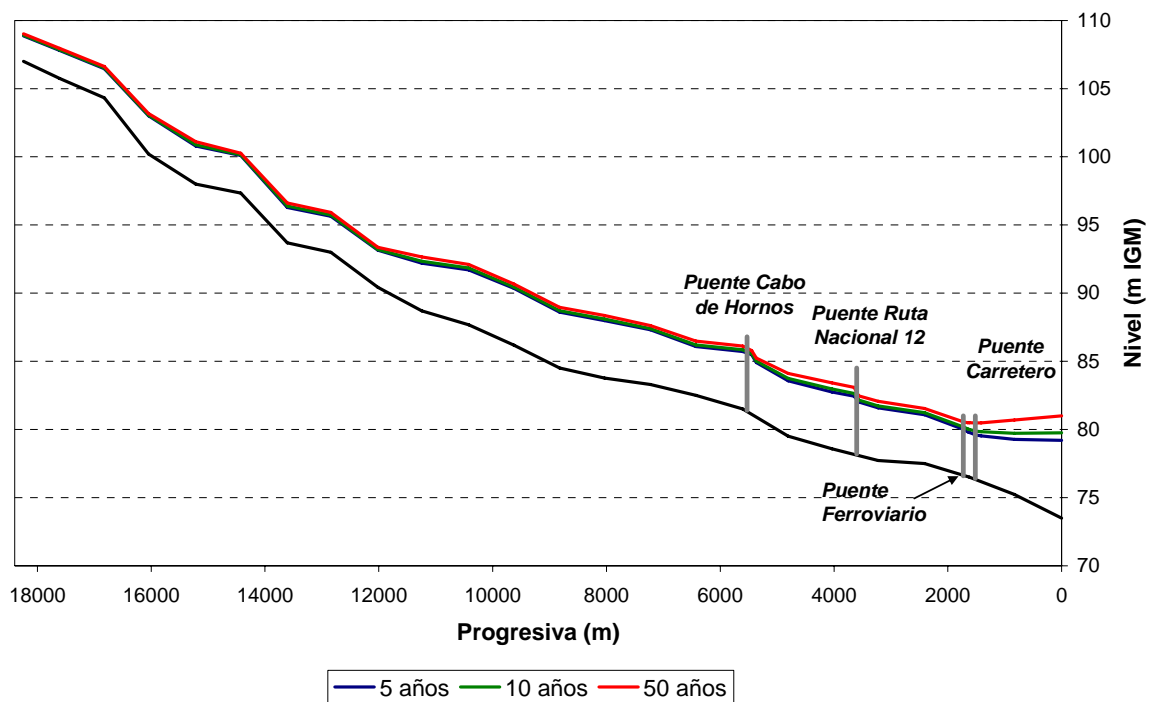
#### 3.1 CONDICIONES HISTÓRICAS

Se efectuó una aplicación del modelo hidráulico para simular la evolución histórica del escurrimiento del A° Zaimán, sobre la ventana de tiempo 1968-2006. En la Figura 3.1.1 se muestra el registro de niveles del río Paraná en Posadas, que se utiliza como condición de borde de aguas abajo. Se distingue la elevación del nivel por el llenado del embalse de la presa de Yacyretá en el año 1994 (para operar a cota nominal de 76 m IGM), y el posterior incremento del nivel del embalse a cota nominal de 78 m IGM.

Se obtuvieron envolventes de niveles máximos de inundación correspondientes a distintas recurrencias. Para ello se procedió como sigue: se identificaron 24 secciones a lo largo del A° Zaimán, separadas entre sí 800 m; en cada una de ellas se efectuó un análisis de recurrencia de caudales medios diarios; con los niveles correspondientes a caudales medios diarios de distinta recurrencia, se construyeron las envolventes de nivel máximo correspondiente a cada recurrencia. En rigor, la serie no es homogénea en el tiempo, debido a las intervenciones antrópicas (llenados del embalse) de tipo determinístico, por lo que no correspondería hacer este tipo de análisis de recurrencia; de todos modos, los resultados se consideran útiles como referencia para análisis posteriores. Estos resultados se muestran en la Figura 3.1.2 para períodos de retorno de 5, 10 y 50 años. El aumento relativo de nivel en dirección a la desembocadura, en el tramo adyacente a la misma, que se observa para la recurrencia de 50 años, está relacionado con el hecho de que allí se cruzan las estadísticas de dos fenómenos distintos de crecidas: las del propio Zaimán y las del río Paraná; no se trata entonces de la envolvente de máximos de una crecida sino máximos correspondientes a distintos eventos.



*Figura 3.1.1: Nivel del río Paraná en Posadas.*



*Figura 3.1.2: Envolventes de niveles máximos para distintas recurrencias*

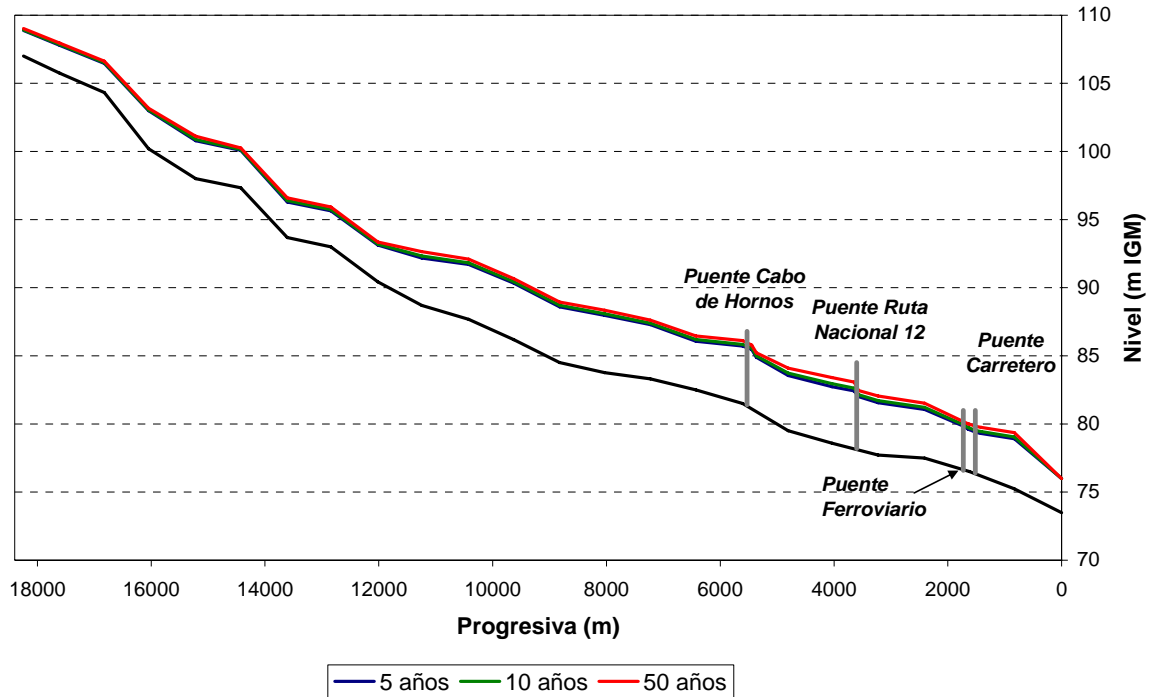
### 3.2 EFECTO DEL EMBALSE SOBRE CRECIDAS INTERANUALES

El modelo se aplicó para analizar la influencia del embalse sobre las crecidas de recurrencia plurianual, para distintas condiciones de operación del embalse. Específicamente, se consideraron tres situaciones de nivel del embalse: 76 m (situación original), 78 m (situación actual) y 83 m (situación futura). Se trabajó con los forzantes hidrológicos (precipitación y evapotranspiración potencial) correspondientes a la ventana de tiempos 1968-2006. Dado que la cota del embalse fue fijada en el nivel de operación correspondiente a cada situación, no se tienen en cuenta aquí las crecidas del río Paraná que podrían, eventualmente, incrementar levemente esa cota.

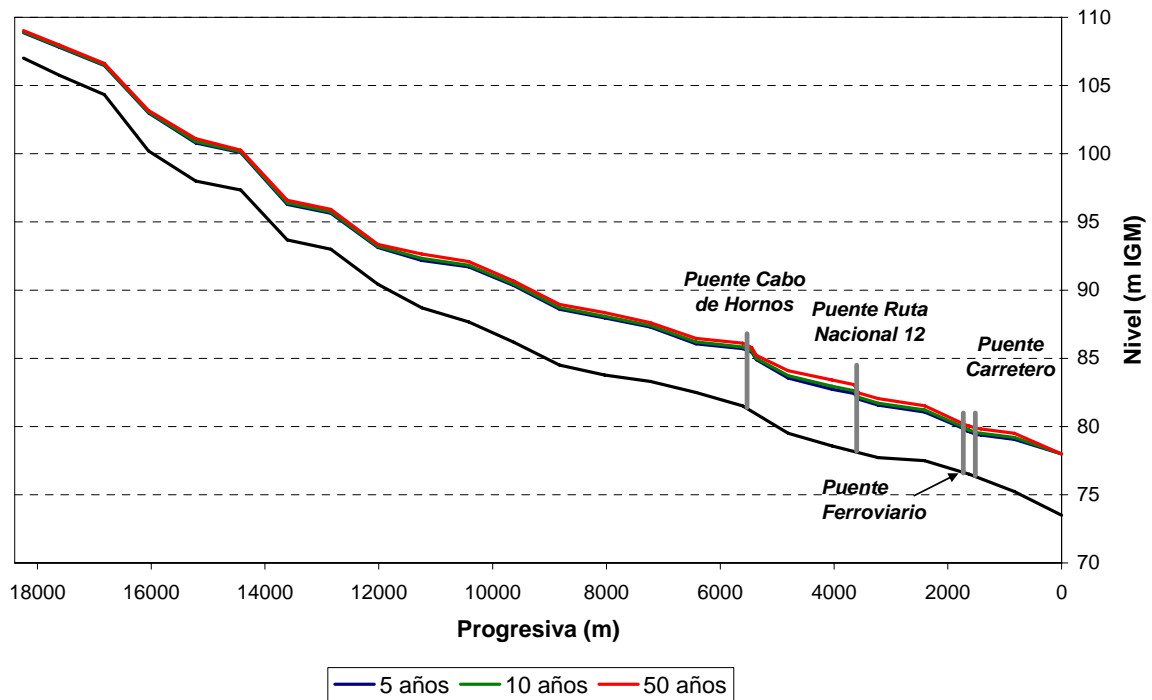
Para construir las envolventes de niveles máximos de inundación correspondientes a distintas recurrencias se procedió tal como fue explicado en la sección anterior para las condiciones históricas, sólo que esta vez el análisis es más riguroso porque no existen variaciones determinísticas. La Figura 3.2.1 muestra esas curvas para períodos de retorno de 5, 10 y 50 años, mientras que la Figura 3.2.2 hace lo mismo pero sólo para el tramo inferior. Surgen las siguientes observaciones:

- Los efectos de remanso para cotas 76 m (Figuras 3.2.1a y 3.2.2a) y 78 m (Figuras 3.2.1b y 3.2.2b) están confinados dentro de una distancia de 800 m de la desembocadura, tal cual indica la caída brusca que se produce en el último tramo de análisis, y reafirma el hecho de que las distribuciones coinciden para ambas cotas desde los 800 m hacia aguas arriba.

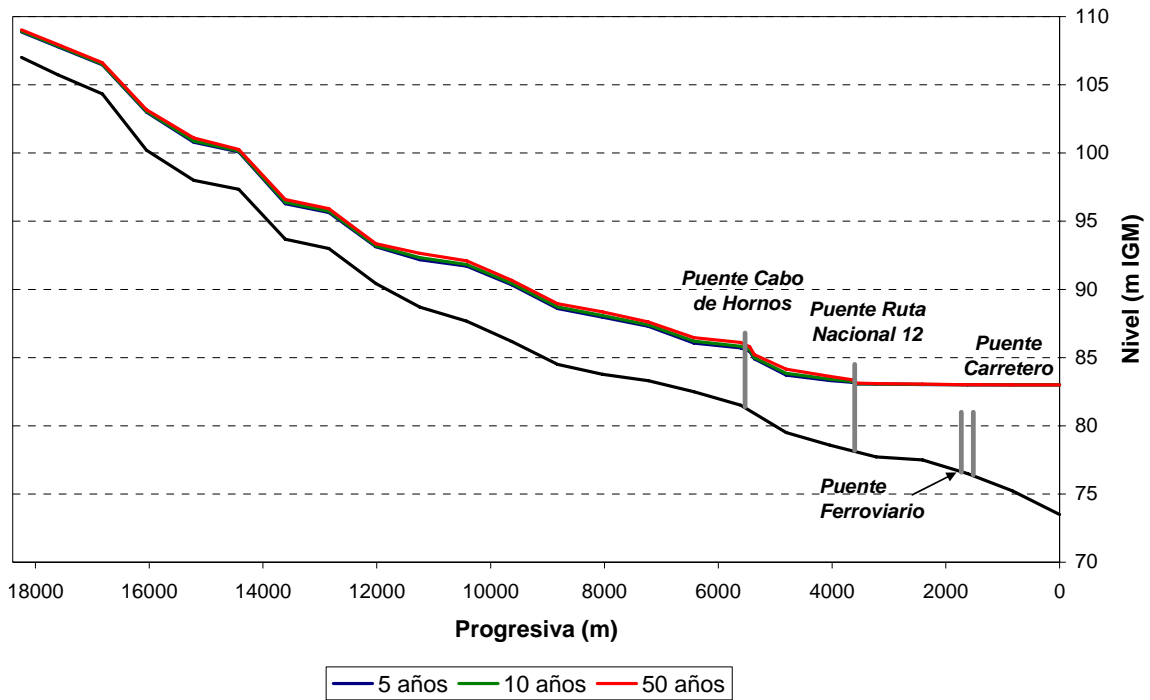
- Por diferencia con los casos anteriores, surge que el remanso por efecto del embalse a cota 83 m no supera los 4800 m, es decir, este tramo incluye el puente de la Ruta 12 pero no el puente de Cabo de Hornos (Figuras 3.2.1c y 3.2.2c).



a) Cota 76 m IGM

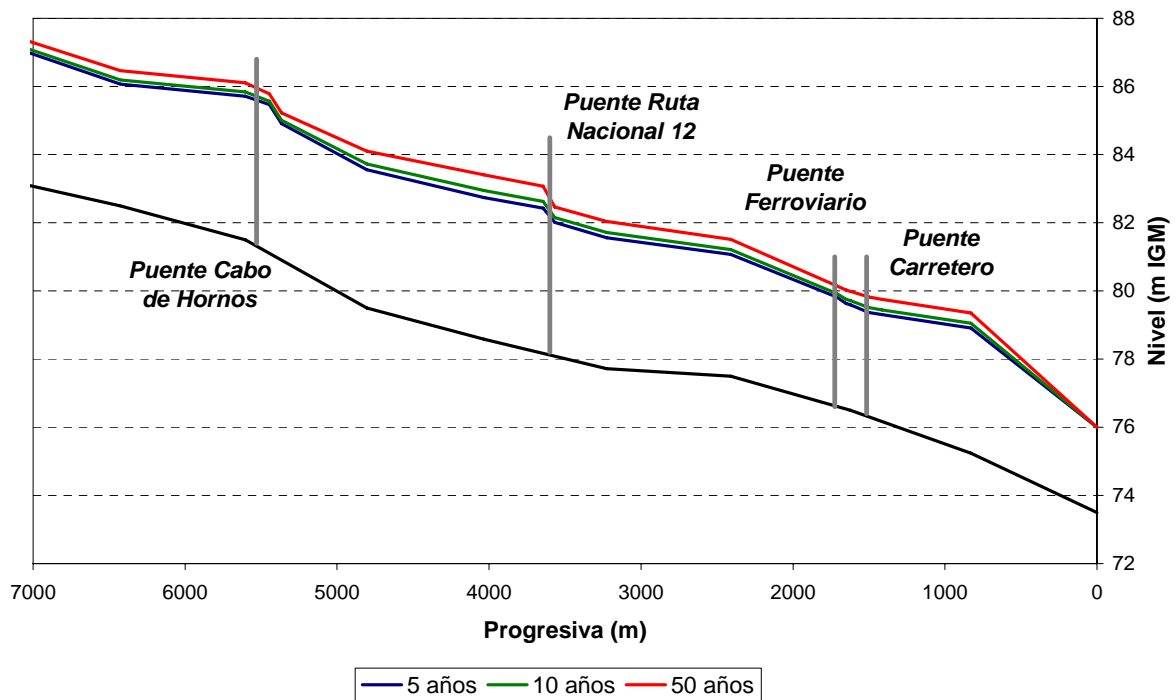


b) Cota 78 m IGM

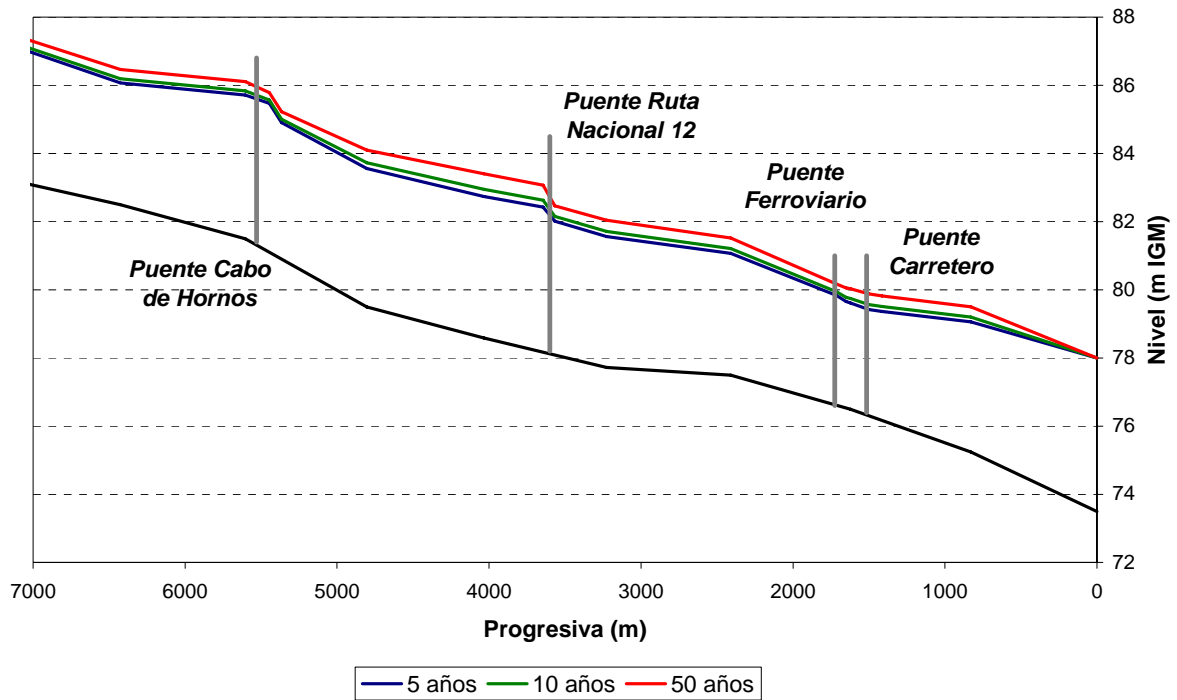


c) Cota 83 m IGM

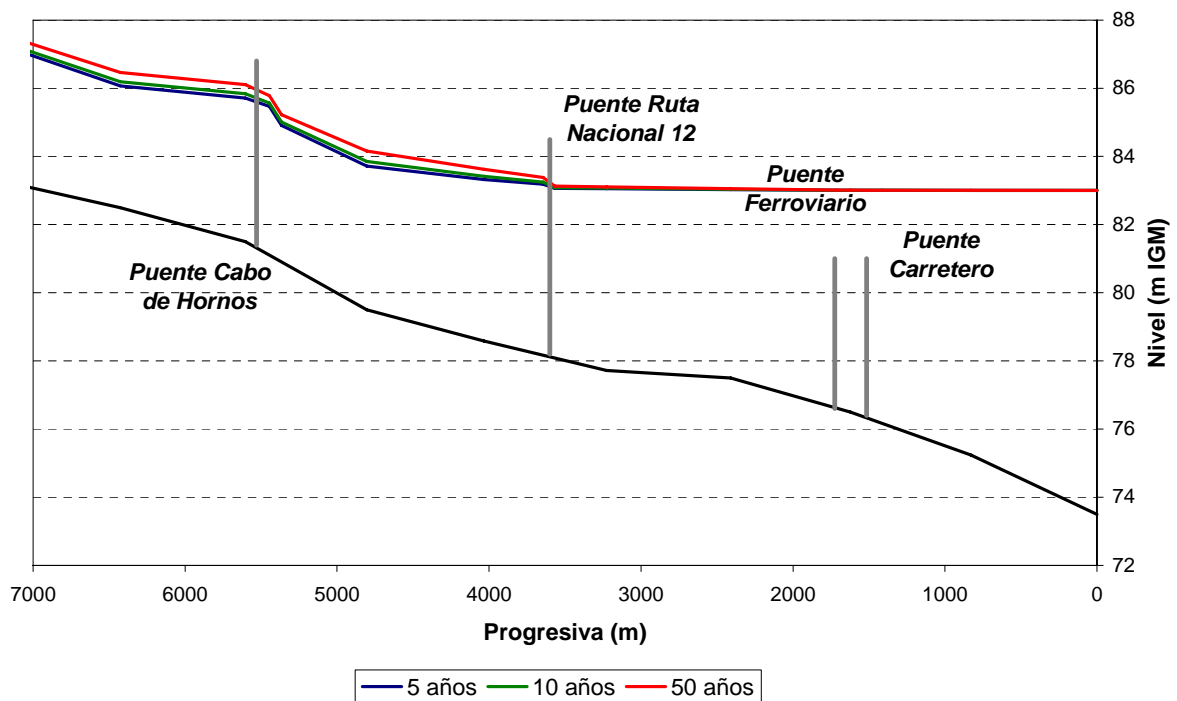
Figura 3.2.1: Envolventes de niveles máximos para distintas recurrencias y diferentes cotas de embalse.



a) Cota 76 m IGM



b) Cota 78 m IGM



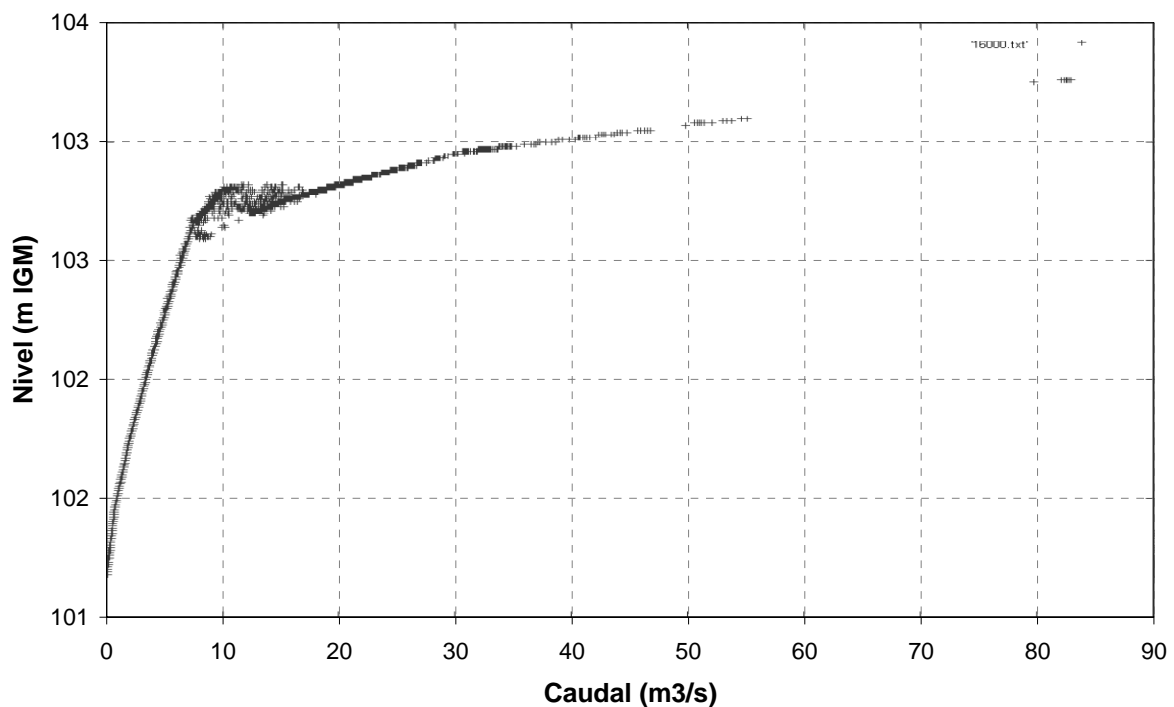
c) Cota 83 m IGM

Figura 3.2.2: Envoltentes de niveles máximos sobre el tramo inferior del A° Zaimán para distintas recurrencias y diferentes cotas de embalse.

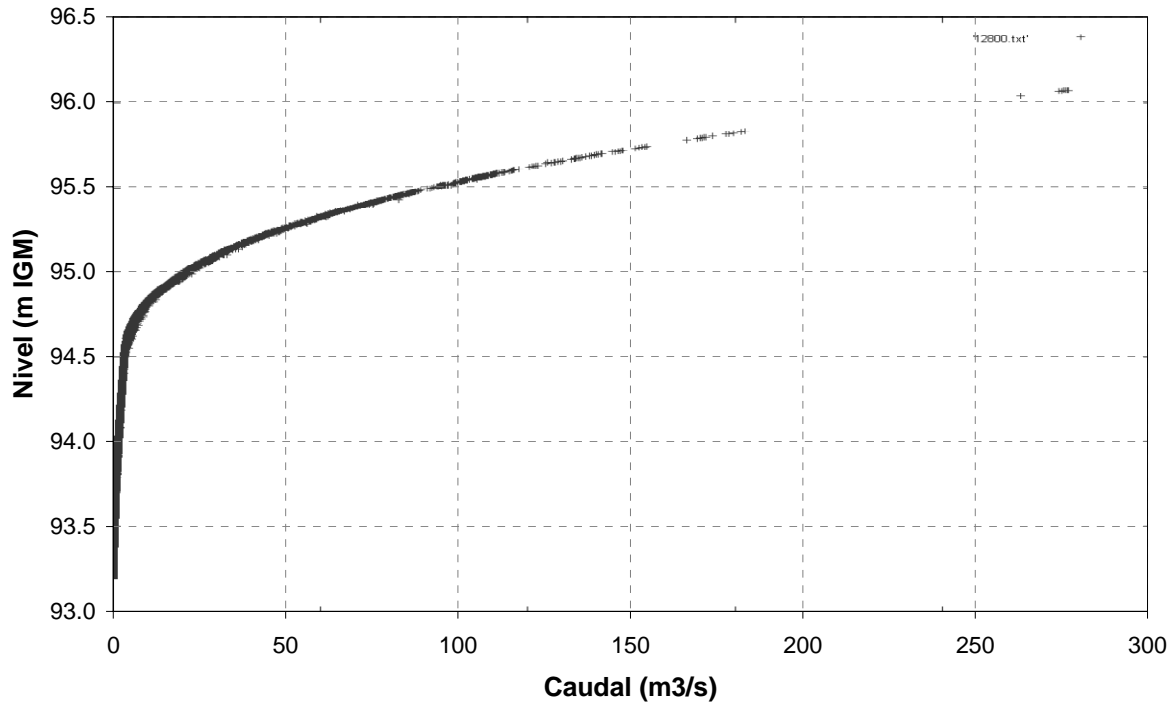
En la Figura 3.2.1 resulta llamativa la escasa diferencia entre las envolventes para distintos períodos de retorno. Esto es indicativo de un amplio valle de inundación, que torna pequeñas las variaciones de nivel aún para variaciones significativas de caudal, tal cual ilustra la Figura 3.2.3, que presenta las relaciones caudal-nivel ('curvas H-Q') para dos progresivas, tal como surgen del modelo. Se observa que las curvas muestran muy bajas pendientes para los caudales mayores al de desborde.

Como complemento, la Figura 3.2.4 muestra las envolventes de máximos de los caudales medios diarios (que son los únicos caudales significativos que pueden obtenerse a partir de datos de precipitaciones diarias) correspondientes a crecidas de distinta recurrencia, que son comunes para las tres cotas de embalse. Allí se indican las secciones donde se produce el aporte desde las subcuencas al A° Zaimán, lo que explica los incrementos de caudal que se producen hacia aguas abajo.

Finalmente, la Figura 3.2.5 presenta los mapas de riesgo de inundación, que surgen de plasmar las envolventes de la Figura 3.2.1 sobre el MDT. Allí se distingue la escala de resolución del MDT, de 90 m.



a) Progresiva 16000 m



b) Progresiva 12800 m

Figura 3.2.3: Relaciones nivel-caudal.

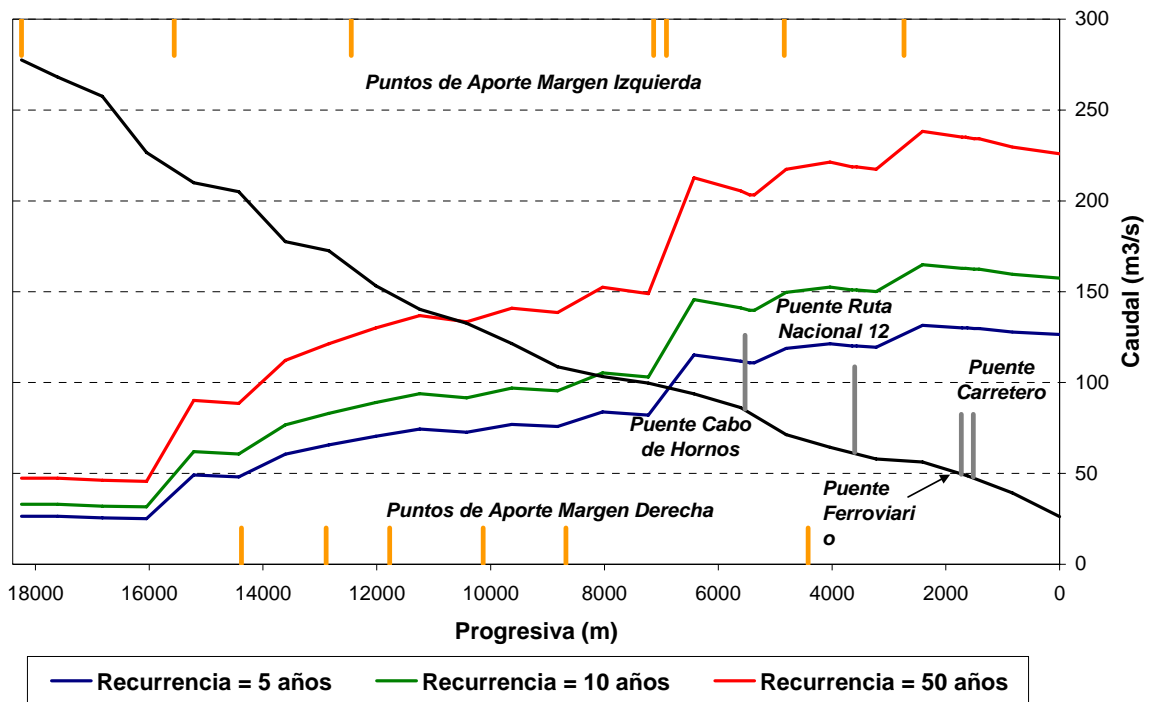
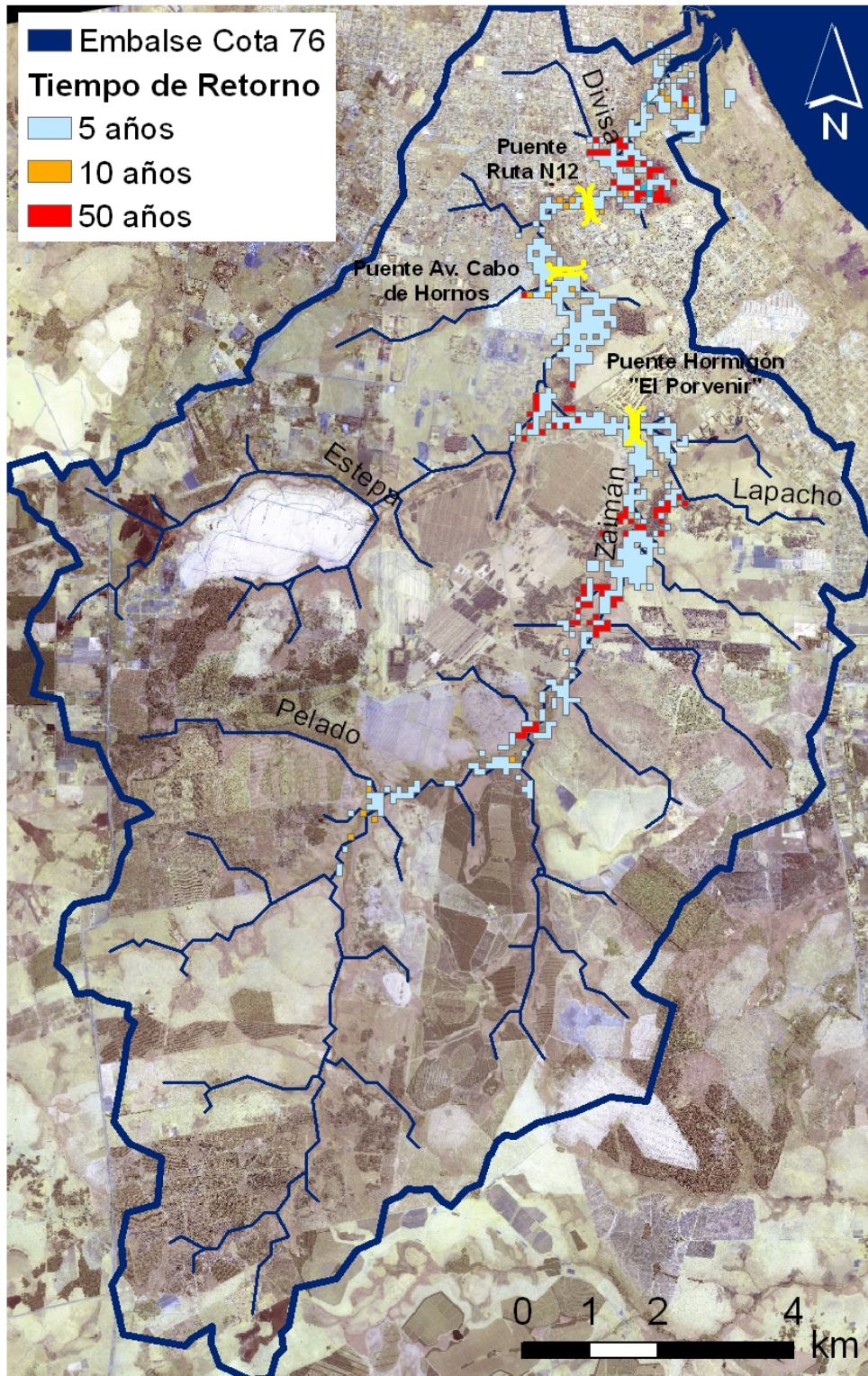
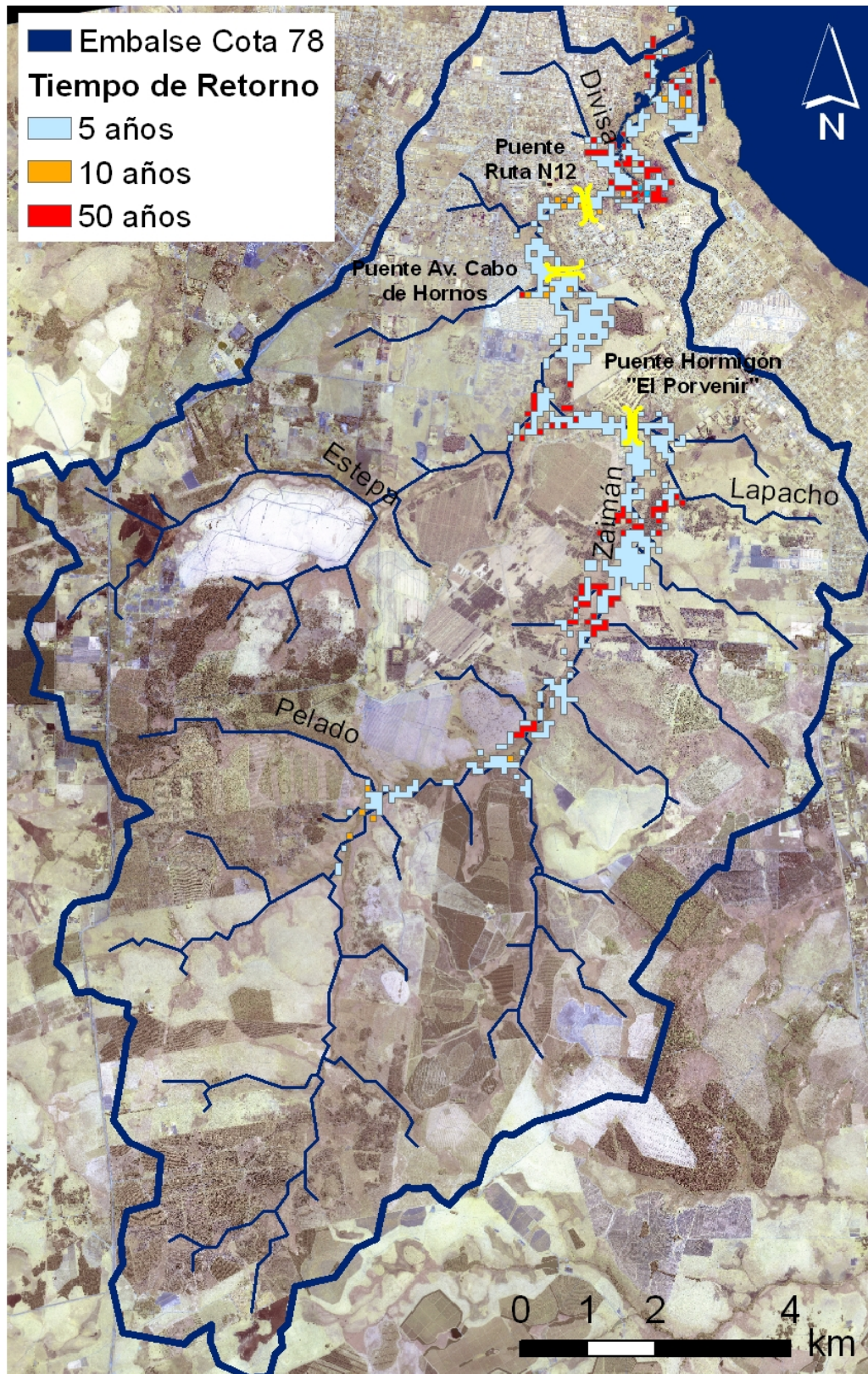


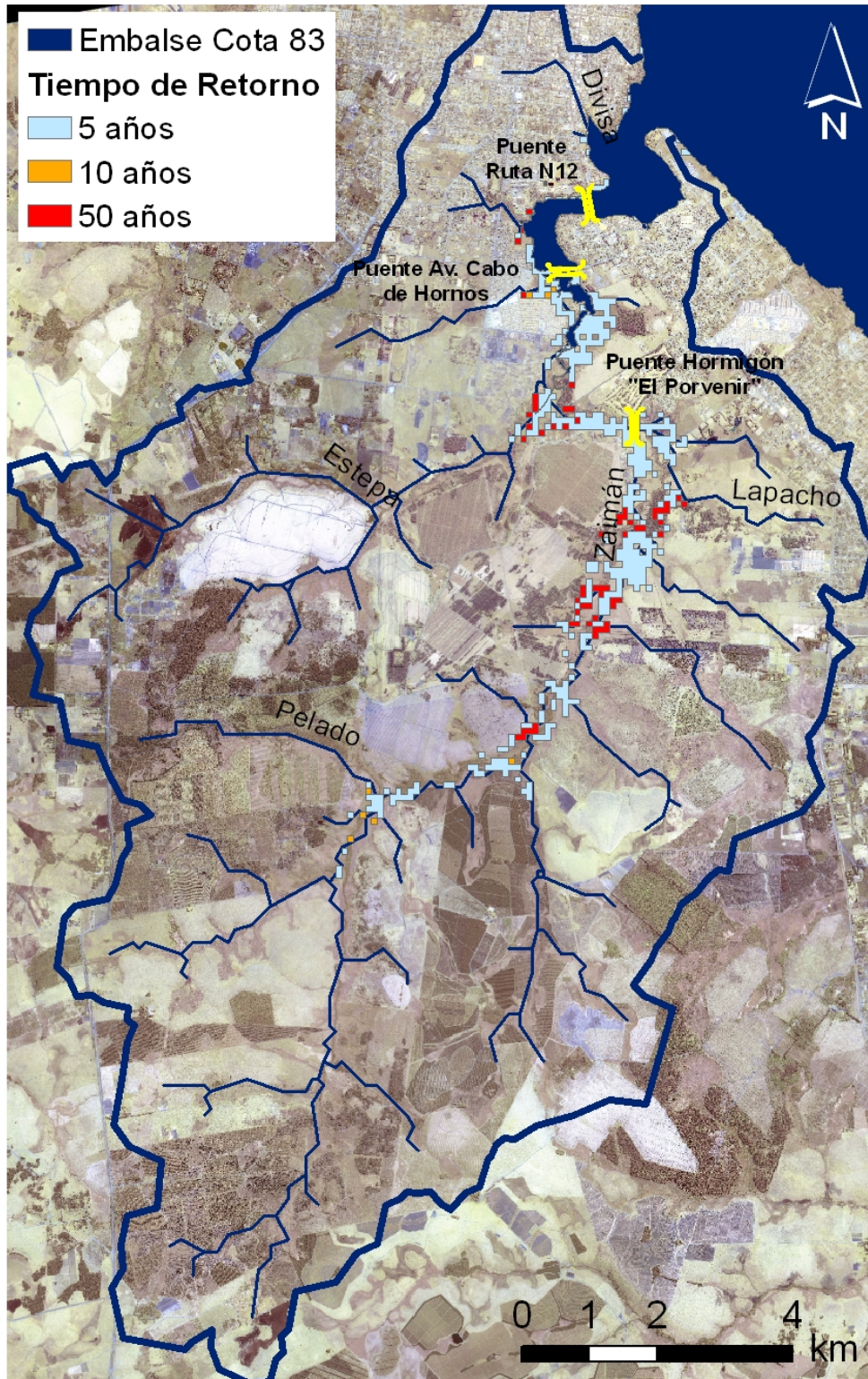
Figura 3.2.4: Envoltentes de máximos de caudales medios diarios, para distintas recurrencias.



a) Cota 76 m IGM



b) Cota 78 m IGM



c) Cota 83 m IGM

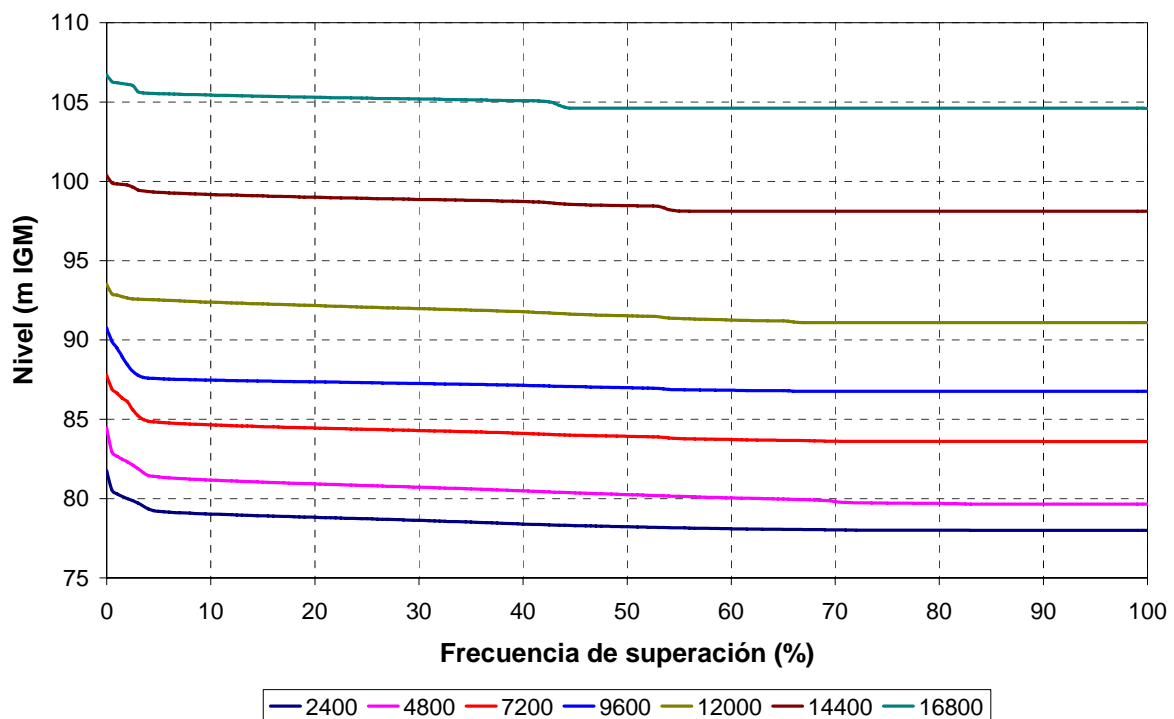
**Figura 3.2.5:** Mapas de riesgo de inundación para distintas recurrencias y diferentes cotas de embalse.

### 3.3 EFECTO DEL EMBALSE PARA CONDICIONES NORMALES

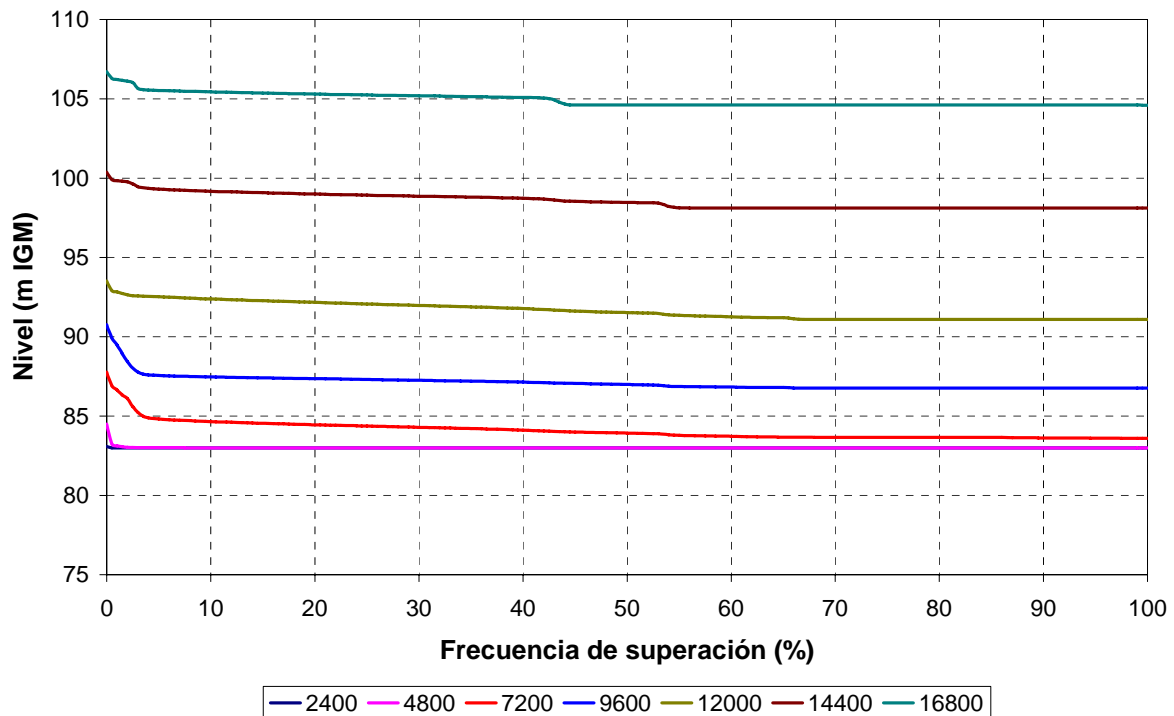
En la sección anterior se presentaron las estadísticas de las crecidas interanuales. Como complemento a la caracterización hidrológica del A° Zaimán, se muestran aquí las curvas de frecuencia de niveles obtenidas del modelo, que resultan representativas de lo que acontece en escalas de tiempo intranuales.

La Figura 3.3.1 muestra curvas de frecuencia de superación para cotas 78 y 83 m. De la comparación entre ambas se concluye que el efecto de remanso con el embalse a cota 83 m puede llegar hasta alrededor de 7 km de la desembocadura para condiciones normales.

Como un indicador global de la intrusión que significa este efecto de remanso, téngase en cuenta que el ‘subembalse’ así generado ocupa un área de aproximadamente 389 ha, la cual, comparada con las 14.700 ha de la cuenca del Zaimán, representa una superficie de sólo el 2,6%.



a) Cota 78 m IGM



b) Cota 83 m IGM

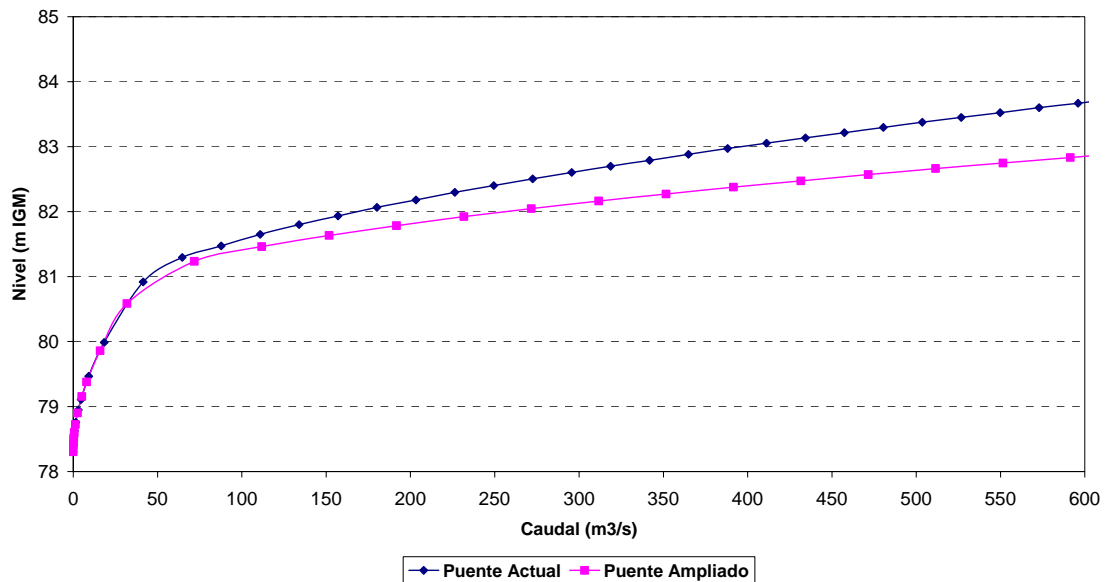
Figura 3.4.1: Curvas de frecuencia de niveles para distintas cotas de embalse.

### 3.4 EFECTO DEL PUENTE DE RUTA 12

A pedido del Comitente, se utilizó el modelo para efectuar un análisis del efecto de obstrucción que ejerce el puente de la Ruta 12 durante las crecidas del A° Zaimán. Se simuló el año 1983, que incluye un evento de gran envergadura (27 de febrero). Se ensayaron tres escenarios:

- Sin puente
- Con el puente actual, que tiene una luz de 70 m
- Con el puente ampliado, con una luz total de 140 m, conservando los mismos valores para el fondo de viga, la rasante, el ancho de pilas y el espaciamiento entre pilas.

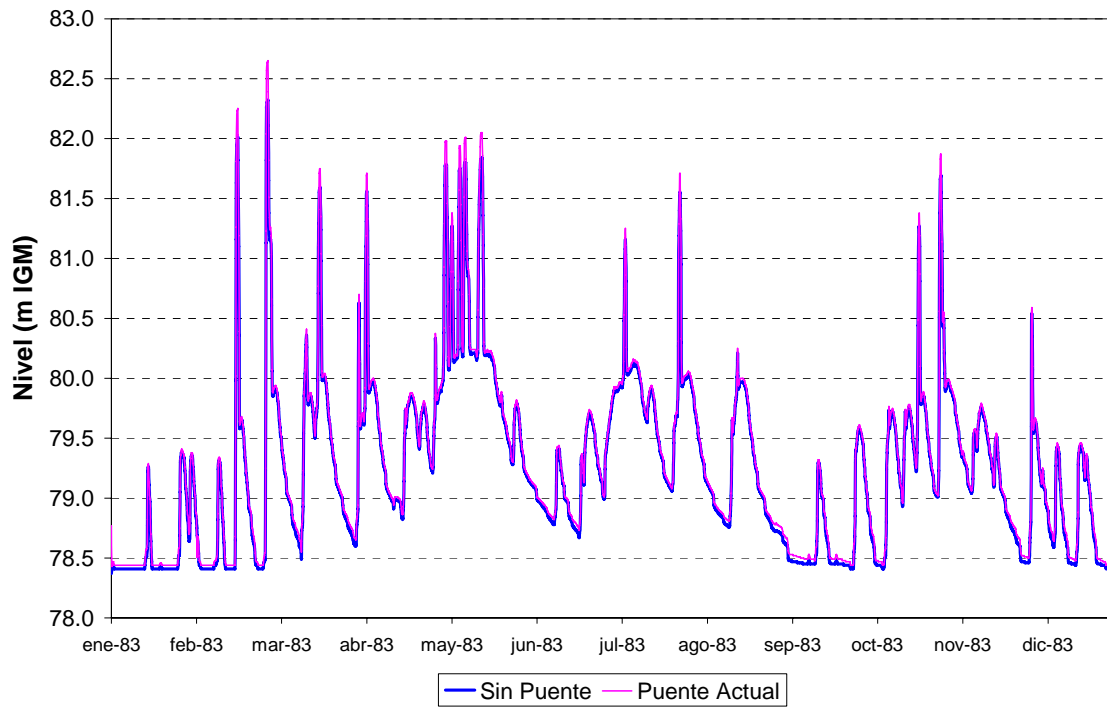
En la Figura 3.4.1 se muestran las relaciones caudal-nivel para el puente actual y para el ampliado, donde se aprecia la mayor capacidad de descarga de este último, diferencia tanto más significativa cuanto mayor es el caudal.



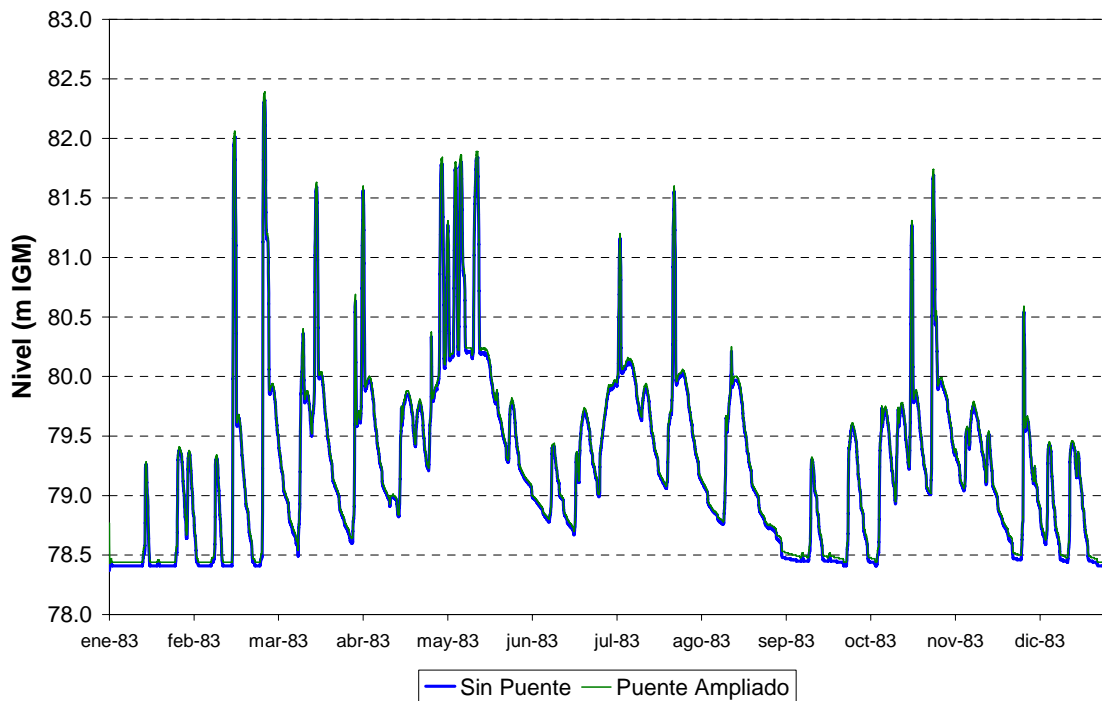
**Figura 3.4.1:** Relación caudal-nivel para los puentes.

La Figura 3.4.2 presenta la evolución del nivel en la sección de aguas arriba del puente para los tres escenarios. Se observa que la presencia del puente actual produce un aumento en los niveles pico (Figura 3.4.2a), el cual resulta mucho menor para el caso del puente ampliado (Figura 3.4.2b). La diferencia entre los casos con puente y la situación sin puente (al cm de precisión) se grafica en la Figura 3.4.3. Se observa que la sobrelevación por el puente actual puede llegar a 15/20 cm para los picos intranuales, con un máximo de casi 35 cm para el evento extraordinario del 27 de febrero. Con el puente ampliado, esas sobrelevaciones no superan los 7 cm.

A título ilustrativo, la Figura 3.4.4 muestra el perfil longitudinal del pelo de agua para el evento del 27 de febrero.



a) Puente Actual vs. ausencia de puente



b) Puente Ampliado vs. ausencia de puente

**Figura 3.4.2:** Comparación de niveles aguas arriba de la sección del puente de la Ruta 12 para distintas situaciones del puente.

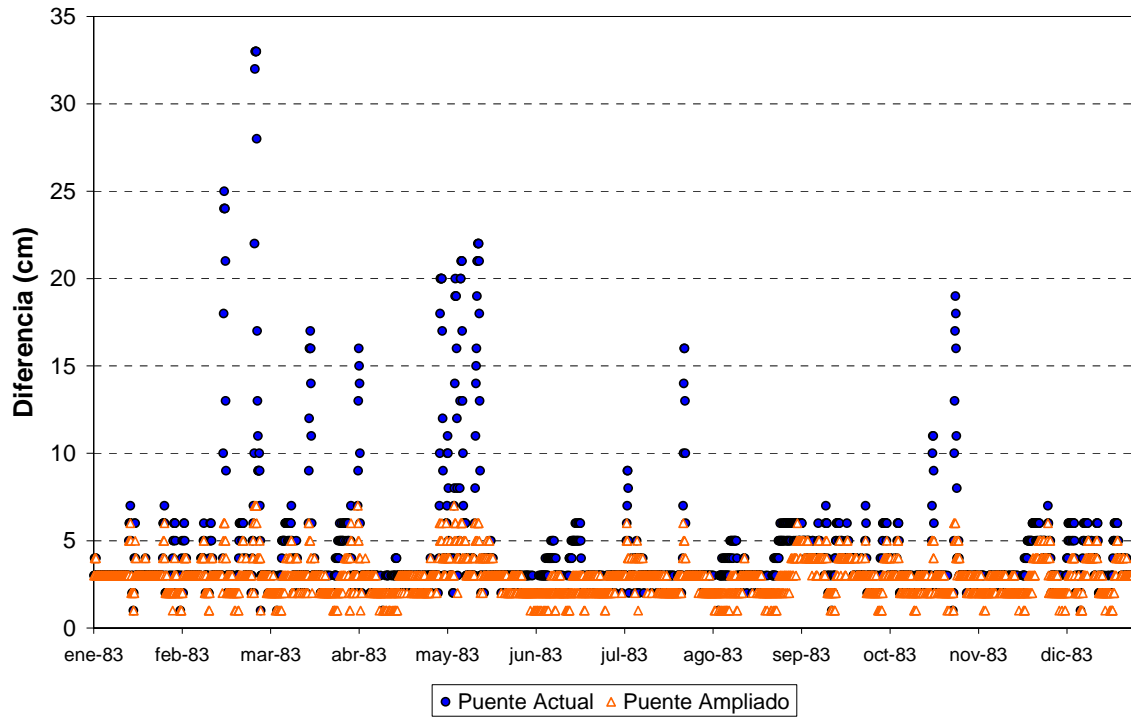


Figura 3.4.3: Diferencia de niveles aguas arriba de la sección del puente de la Ruta 12 para los casos con puente respecto de la situación sin puente.

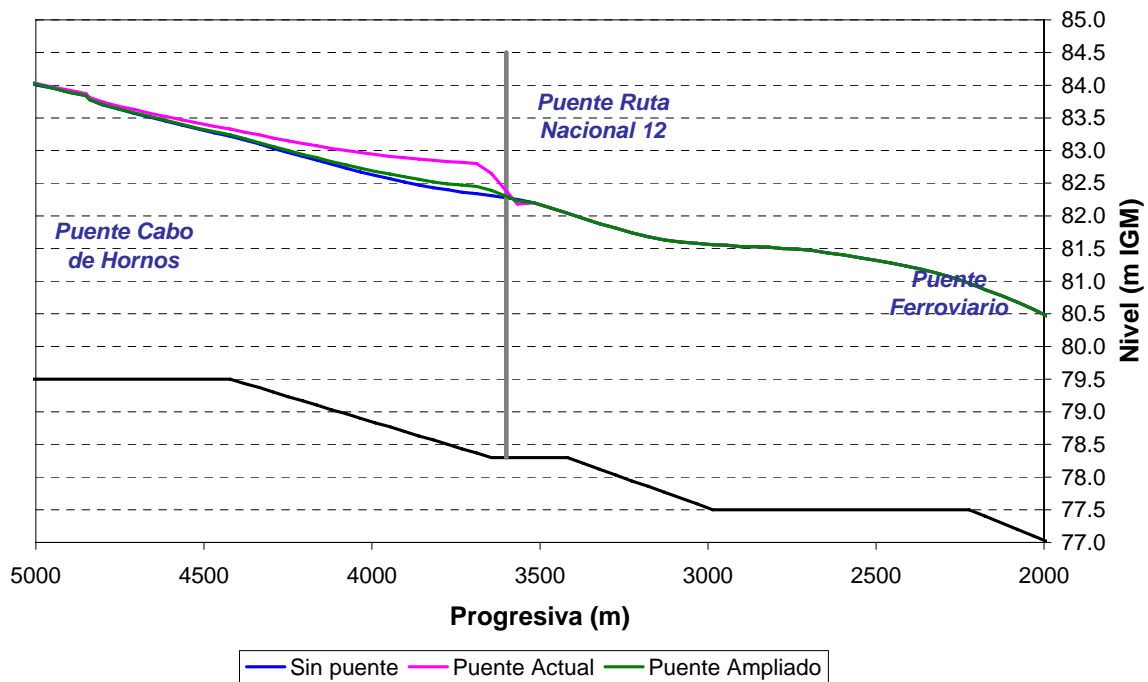


Figura 3.4.4: Perfil del pelo de agua para el evento del 27 de febrero de 1983.

### 3.5 SUBCUENCA VILLA DOLORES

En el modelo hidrológico de la cuenca del A° Zaimán, la denominada subcuenca ‘Villa Dolores’ (N° 3) abarca las zonas de aporte de ambas márgenes, tal como se observa en la Figura 3.5.1.

Para analizar las consecuencias del desarrollo urbano sobre la margen izquierda, que fue pedido por el Comitente, se procedió a subdividirla en sus dos partes, de modo de poder discriminar la producción de caudal de la primera. En la Figura 3.5.2 se muestra una imagen de la subcuenca de margen izquierda, mientras que en la Figura 3.5.3 se indica su delimitación, que conforma un área de 7,5 km<sup>2</sup>.

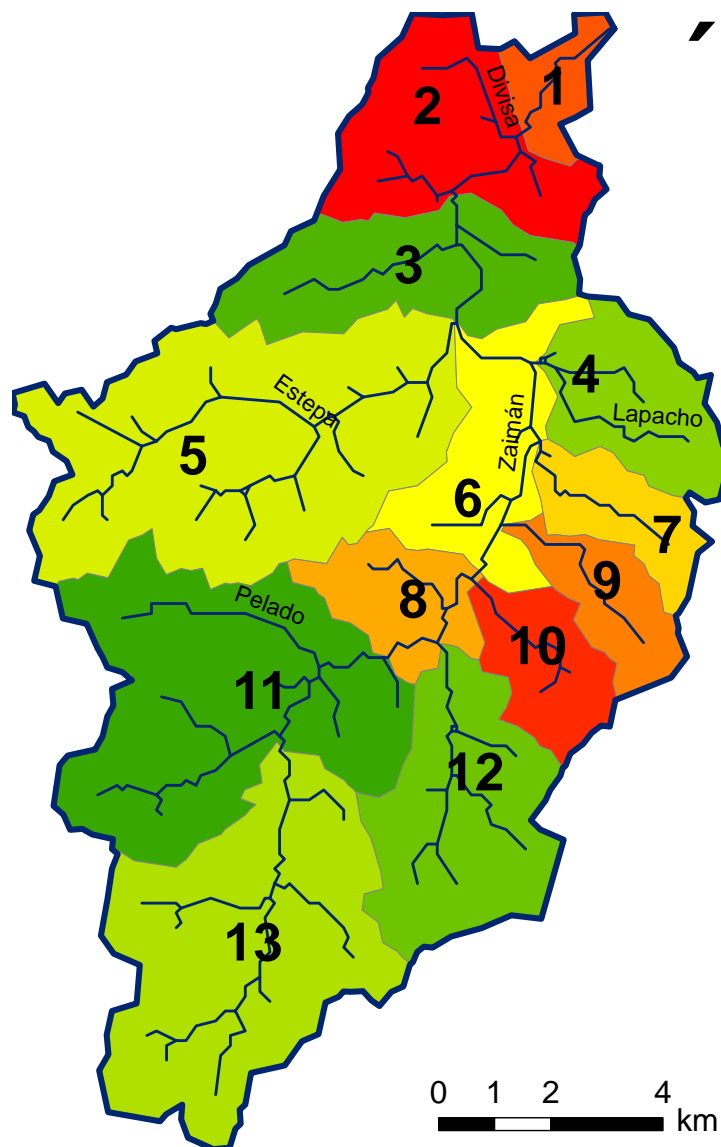
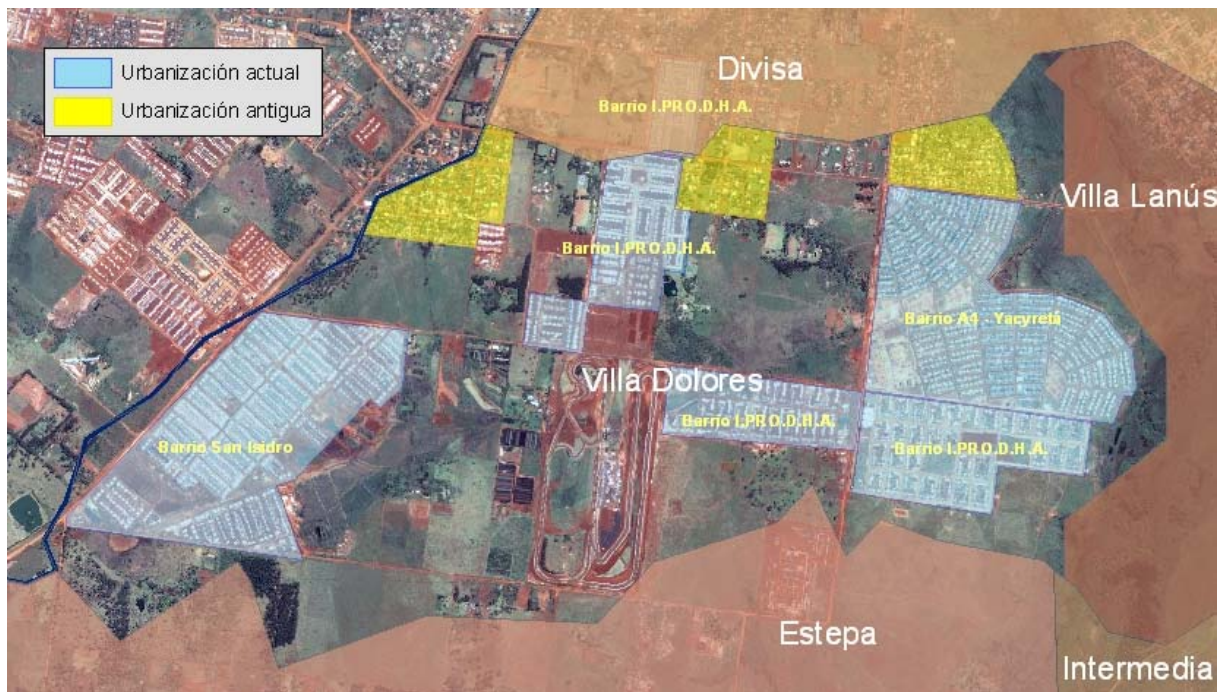


Figura 3.5.1: Subcuencas modeladas



*Figura 3.5.2: Imagen de subcuenca Villa Dolores – margen izquierda.*



*Figura 3.5.3: Subcuenca Villa Dolores.*

En la misma Figura 3.5.3 se identifican zonas correspondientes a la urbanización antigua y la urbanización actual (conformada por los barrios I.PRO.D.H.A, San Isidro y A4- Yacyretá). La Tabla 3.5.1 muestra los porcentajes de urbanización y de impermeabilidad correspondiente a las dos situaciones, de urbanización creciente.

**Tabla 3.5.1:** Fracción urbanizada e impermeabilizada para distintas situaciones de urbanización

Urbanización	Area (km <sup>2</sup> )	Area urbanizada (%)	Area impermeable (%)
Antigua	0,5	6	2
Actual	2,9	39	12

Ahora bien, el tiempo de concentración de la subcuenca Villa Dolores es de 80 minutos, de modo que no es posible llevar adelante el análisis con la serie de precipitaciones diarias utilizada hasta aquí. Para este fin, el Sector Hidrología del Departamento Técnico de la EBY proveyó datos de su base de datos operativa, estación Zaimán, para el período enero 2006 a setiembre de 2008. La secuencia con que captura datos esa instalación está optimizada: lo hace cada 3 horas cuando la precipitación es menor a 10 mm en ese lapso, o cada 10 mm de lluvia si esto se acumula en menos de 3 horas. A estos datos la EBY le efectuó una corrección de volúmenes totales, de modo de hacerlos compatibles con el pluviómetro totalizador del INTA, lo que se extendió hasta marzo de 2007.

La comparación se efectuó sobre el período de tiempo de enero a diciembre de 2006, usando un paso de tiempo de 10 minutos para representar la precipitación. En la Figura 3.5.4 se presentan los resultados sobre la ventana de tiempo completa, mientras que en la Figura 3.5.5 se hace lo mismo para cuatro eventos significativos de precipitación, para apreciar el detalle. Se observa que las diferencias de valores pico son mínimas para la mayoría de los eventos, especialmente los de mayor intensidad. La diferencia entre ambas series de caudales se muestra en la Figura 3.5.6, donde se observa que el máximo aumento de caudal no alcanza los 6 m<sup>3</sup>/s.

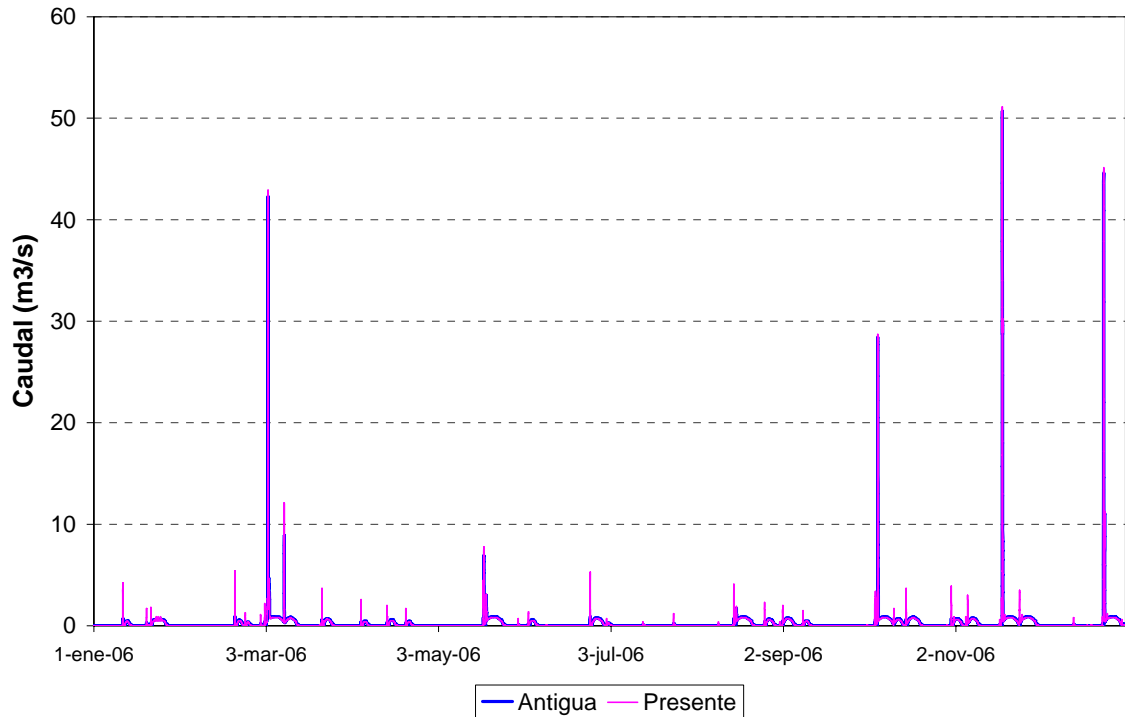
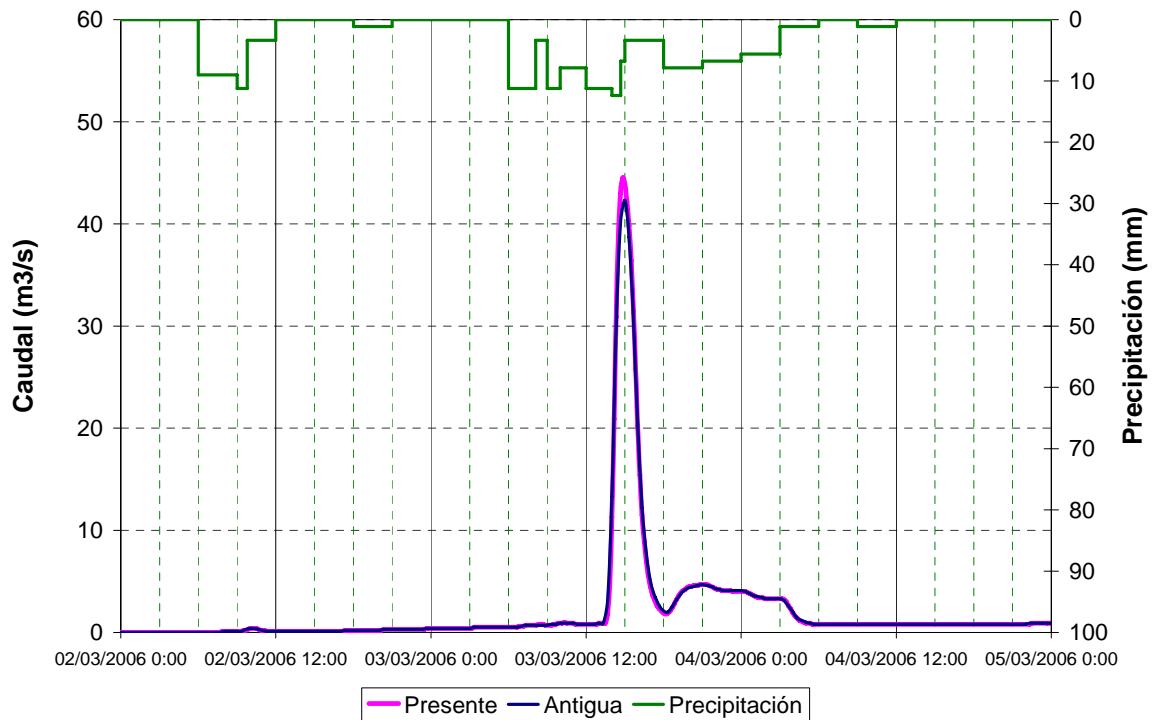
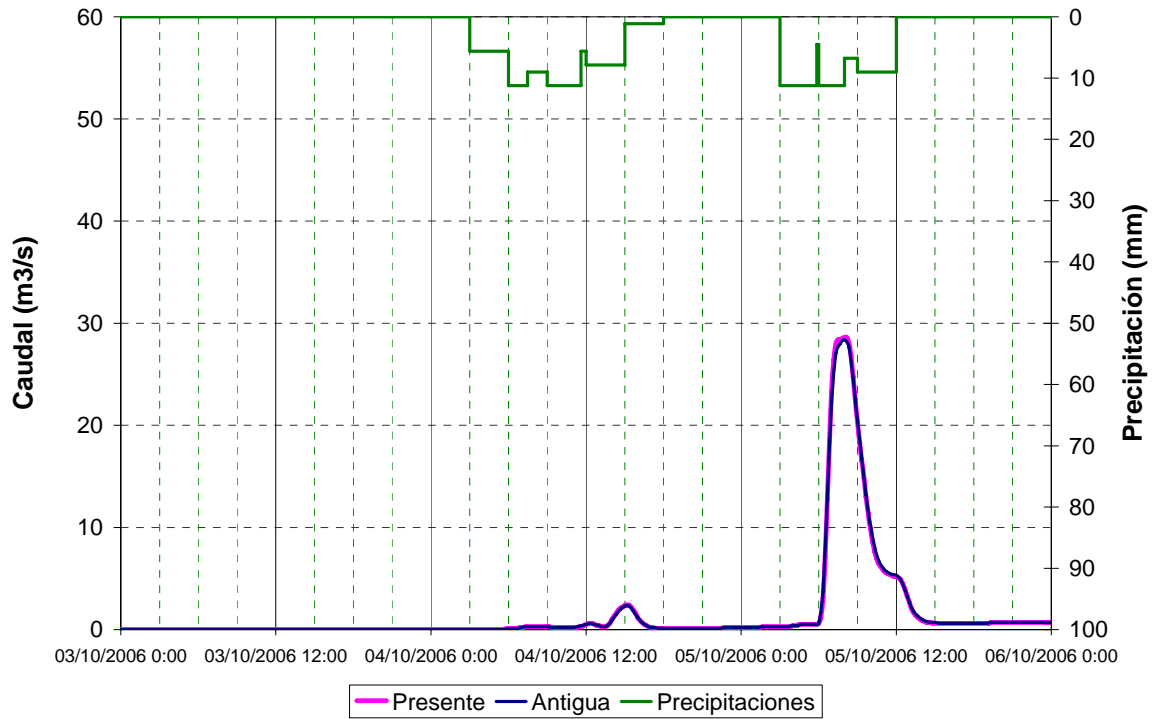


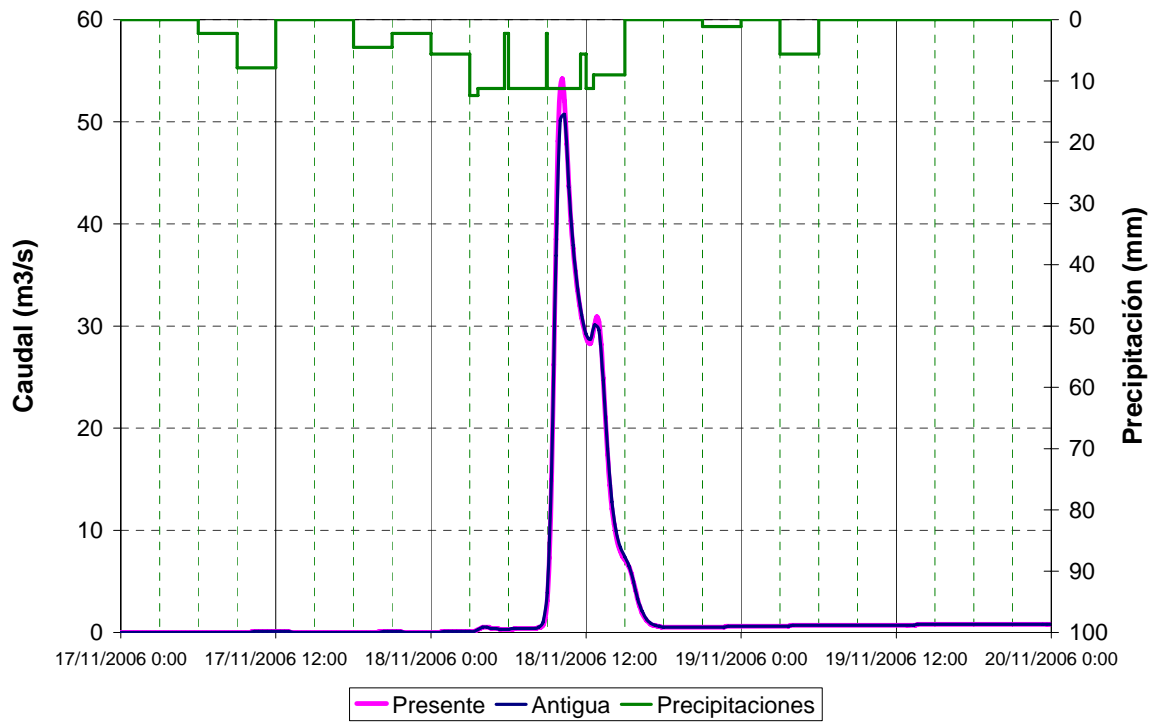
Figura 3.5.4: Evolución del caudal para las dos situaciones de urbanización



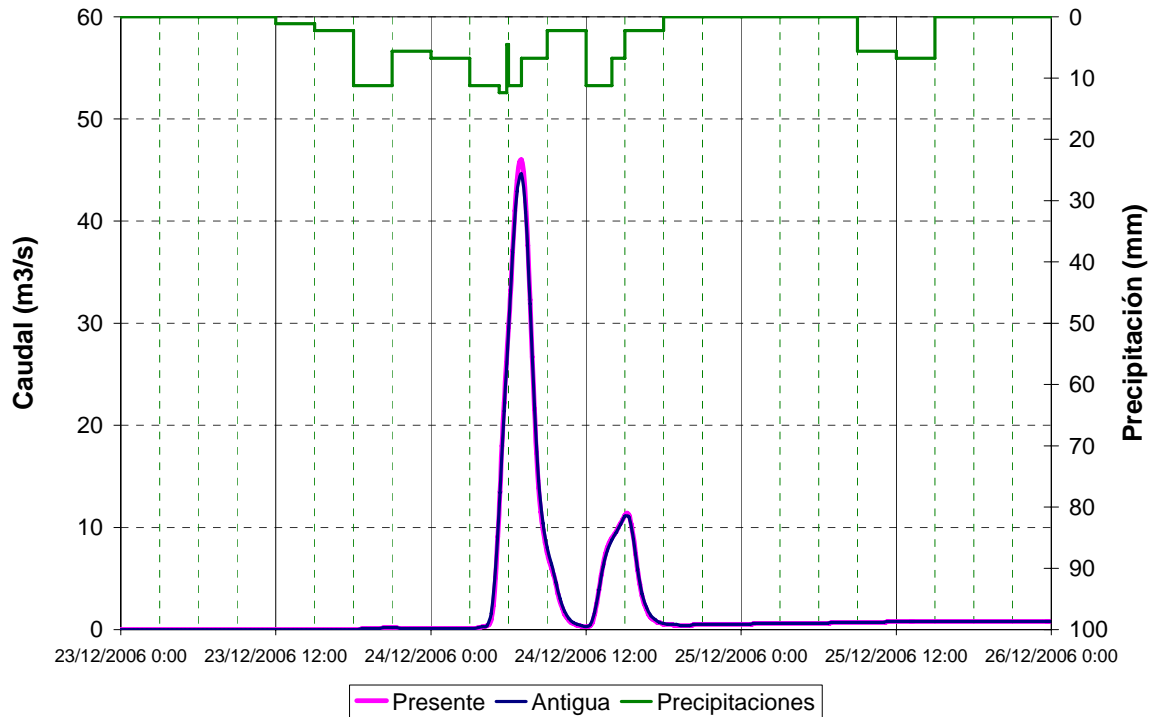
a) Evento del 3 de marzo de 2006



*b) Evento del 5 de octubre de 2006*



*c) Evento del 18 de noviembre de 2006*



d) Evento del 24 de diciembre de 2006

Figura 3.5.5: Comparación del caudal para las dos situaciones de urbanización para distintos eventos

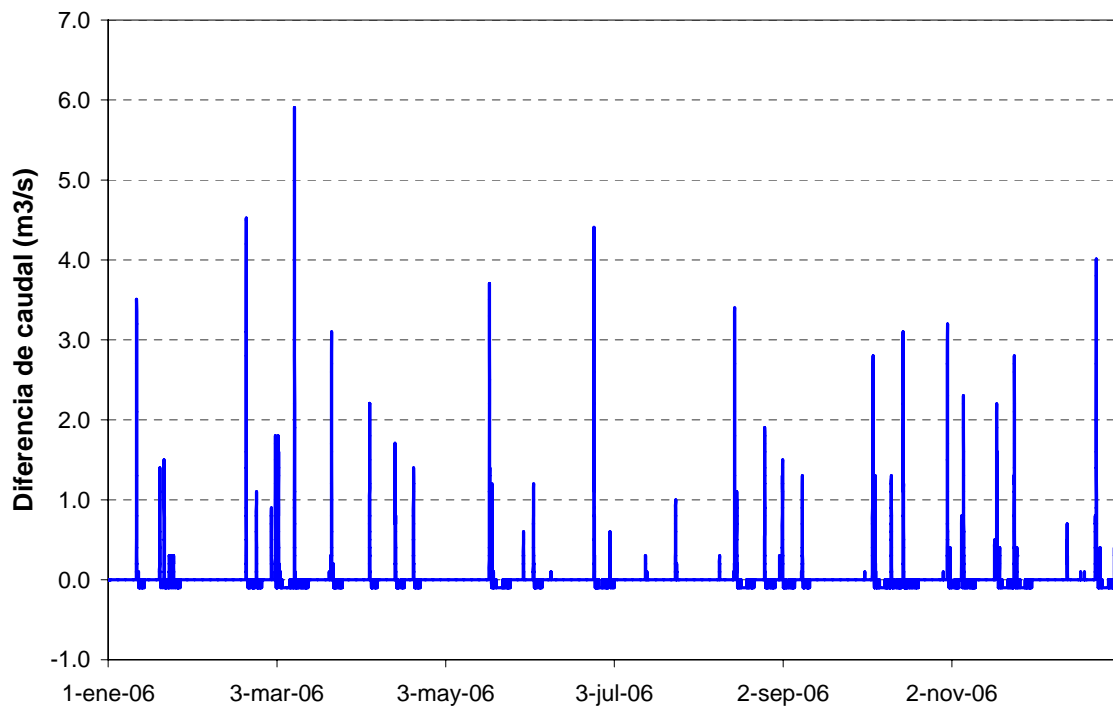
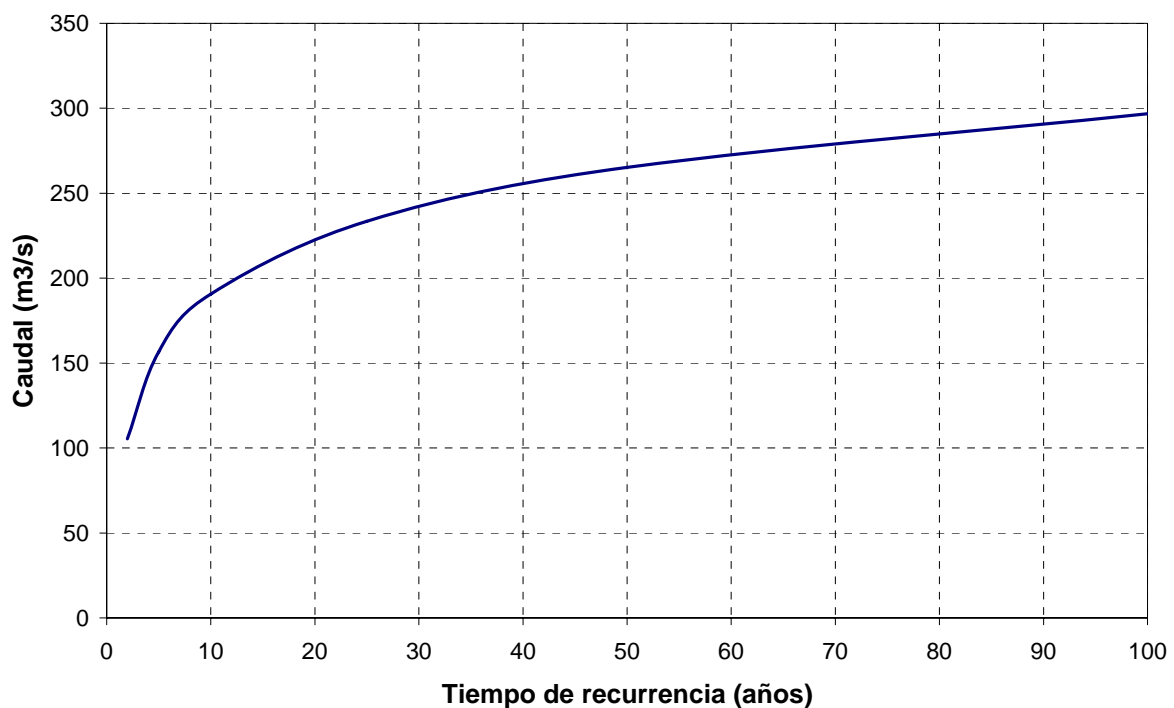


Figura 3.5.6: Diferencia entre el caudal con urbanización presente y antigua.

### 3.6 PRODUCTOS DEL MODELO

A partir del modelo es posible obtener una serie de productos de interés para caracterizar la respuesta hidrológico-hidráulica de la cuenca del A° Zaimán.

En la Figura 3.6.1 se muestra la recurrencia de caudales medios diarios del A° Zaimán en la sección de la Ruta 12, que complementa las distribuciones espaciales mostradas en la Figura 3.2.4 para tres recurrencias. La Tabla 3.6.1 presenta los valores asociados a algunos tiempos de retorno de referencia.



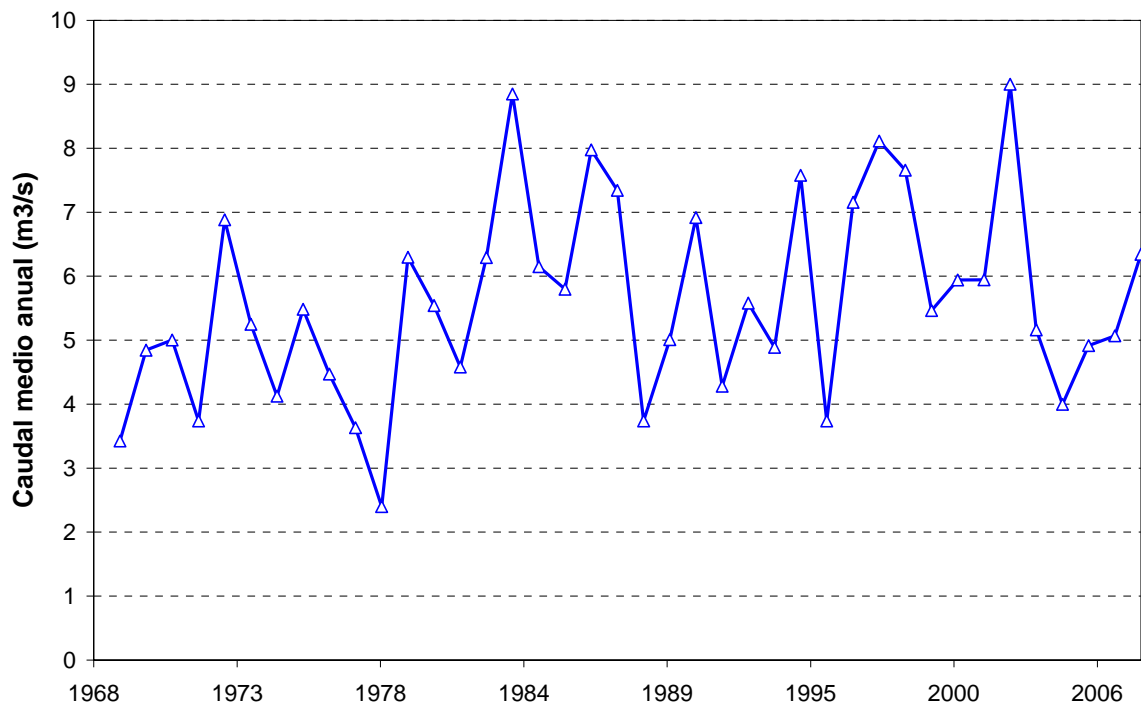
*Figura 3.6.1: Recurrencia de caudales medios diarios en Ruta 12.*

*Tabla 3.6.1: Caudales medios diarios asociados a distintos períodos de retorno*

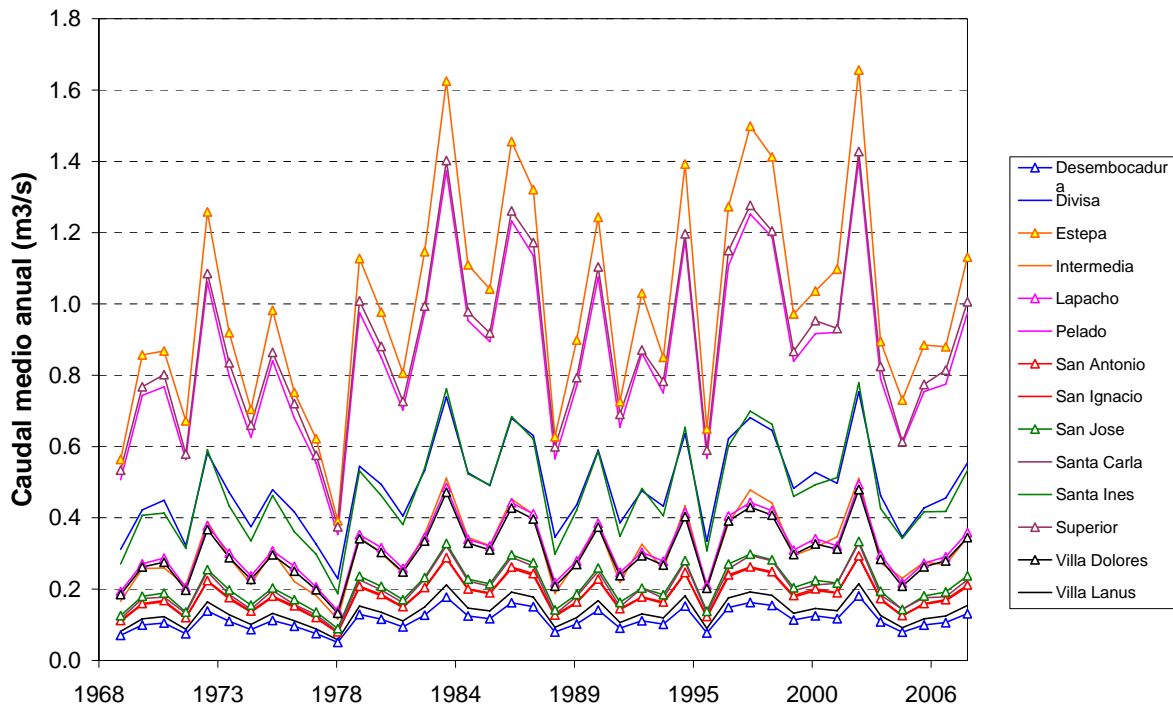
Período de retorno (años)	Caudal (m³/s)
2	105
5	155
10	190
25	235
50	265
100	295

La Figura 3.6.2 presenta los caudales medios anuales del A° Zaimán en la Ruta 12 (Figura 3.6.2a) y de cada una de las subcuencas de aporte (Figura 3.6.2b). En términos generales, se observan caudales medios anuales algo mayores en las décadas del 80 y del 90 en relación al resto. La variación de la magnitud del caudal de subcuenca a subcuenca depende directamente del área de la subcuenca, tal como se observa en la Figura 3.6.2c, que representa el caudal promedio (sobre todos los años de simulación) por subcuenca y el área correspondiente.

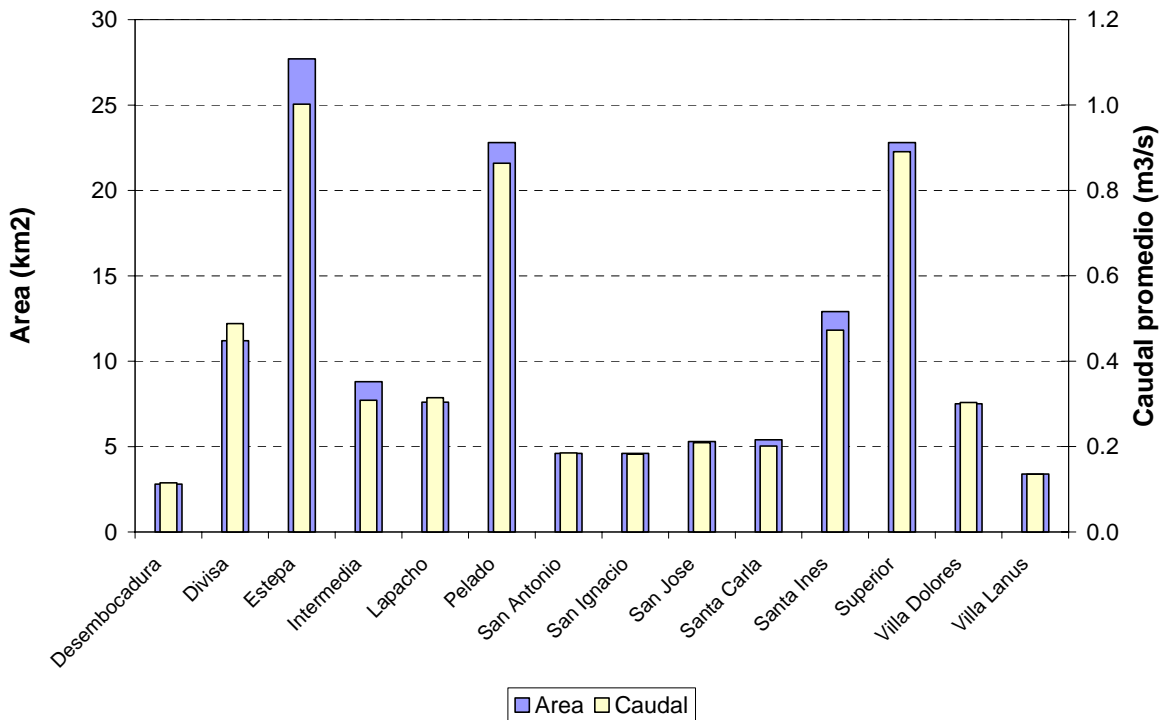
Como complemento en la Figura 3.6.3 se muestran los caudales medios mensuales del A° Zaimán en la Ruta 12 (Figura 3.6.3a) y sus promedios sobre toda la ventana de simulación (Figura 3.6.3b). De estos últimos se observa que el caudal máximo mensual tiende a producirse en noviembre/diciembre, mientras que el mínimo se da en agosto/setiembre.



a) A° Zaimán en Ruta 12

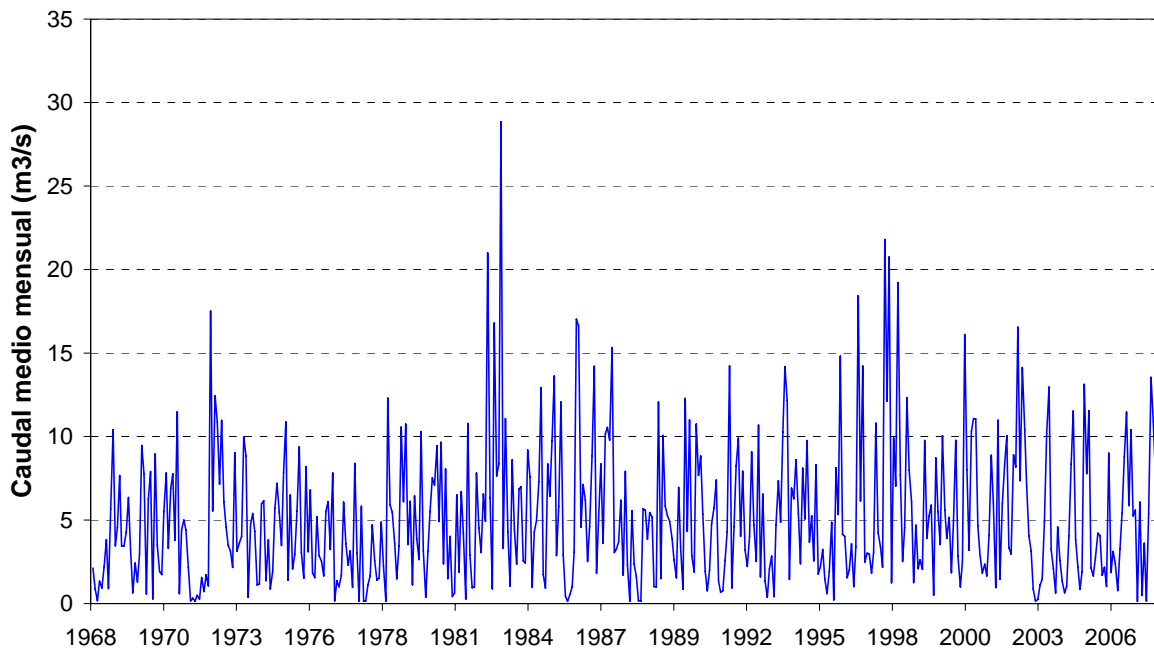


b) Subcuencas

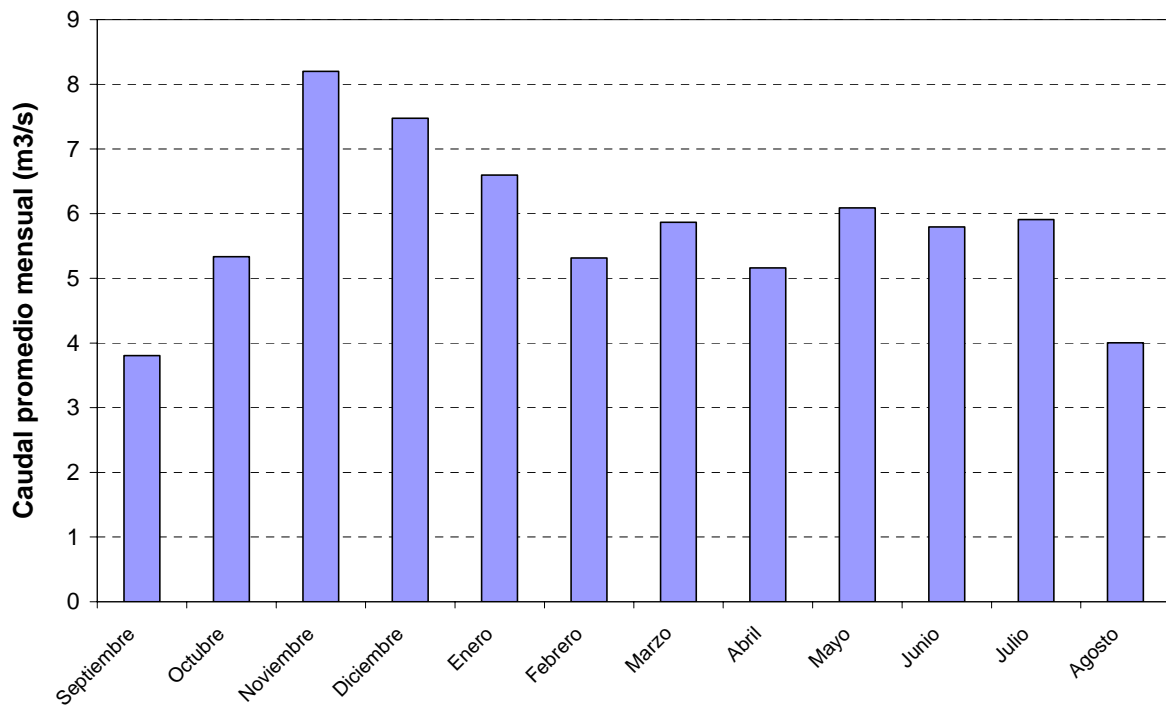


c) Promedio por subcuenca

Figura 3.6.2: Caudales medios anuales



a) A° Zaimán en Ruta 12

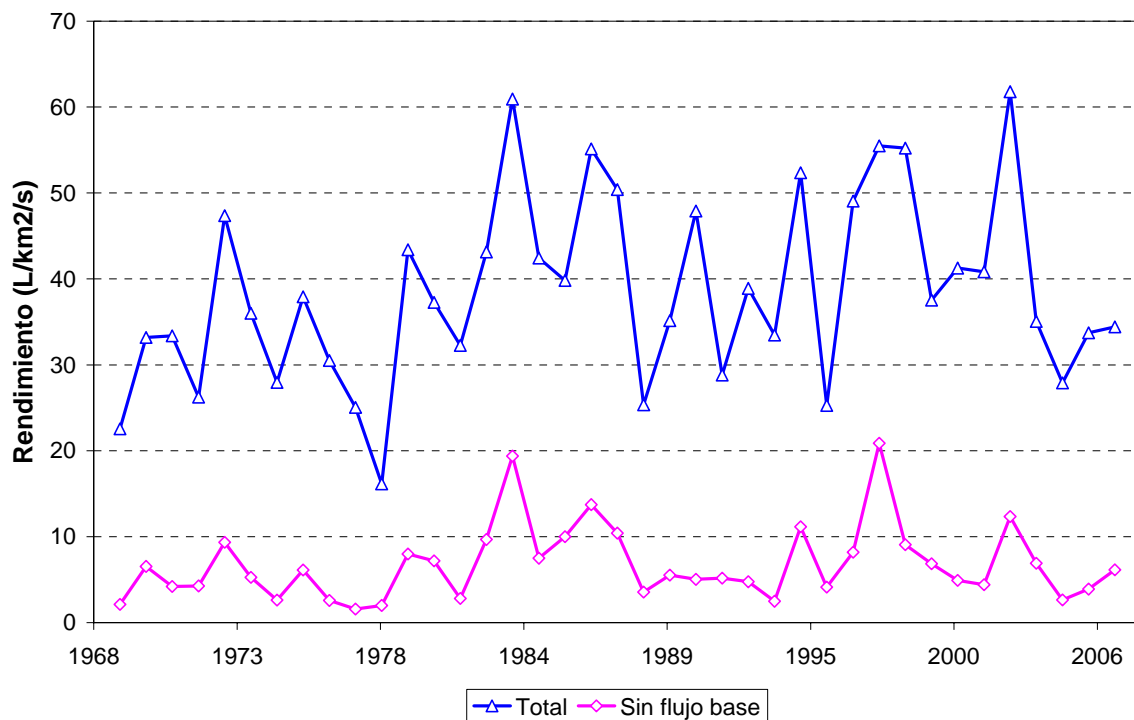


b) Promedio

Figura 3.6.3: Caudales medios mensuales

La Figura 3.6.4 presenta los rendimientos (relación de caudal a área de la cuenca) medios anuales para toda la cuenca del Zaimán (Figura 3.6.4a, identificados como 'Total') y para cada subcuenca (Figura 3.6.4b). Si bien muestran una modulación muy similar a la del caudal medio anual (Figura 3.6.2), su variación de subcuenca a subcuenca es relativamente débil (Figura 3.6.4b). Los valores promedio se muestran en la Figura 3.6.4c. Se observa que no bajan de 35 L/km<sup>2</sup>/s, y que no alcanzan los 45 L/km<sup>2</sup>/s. Estos resultan mayores, entre un 50 y un 100%, a los reportados en análisis hidrológicos antecedentes, que la ubican entre 21 y 24 L/km<sup>2</sup>/s<sup>5</sup>. A título de complemento, en la Figura 3.6.4a también se incluye el rendimiento sin considerar el flujo de base. Se observa que oscila principalmente en el rango de 2 a 10 L/km<sup>2</sup>/s, pudiendo llegar excepcionalmente a 20 L/km<sup>2</sup>/s.

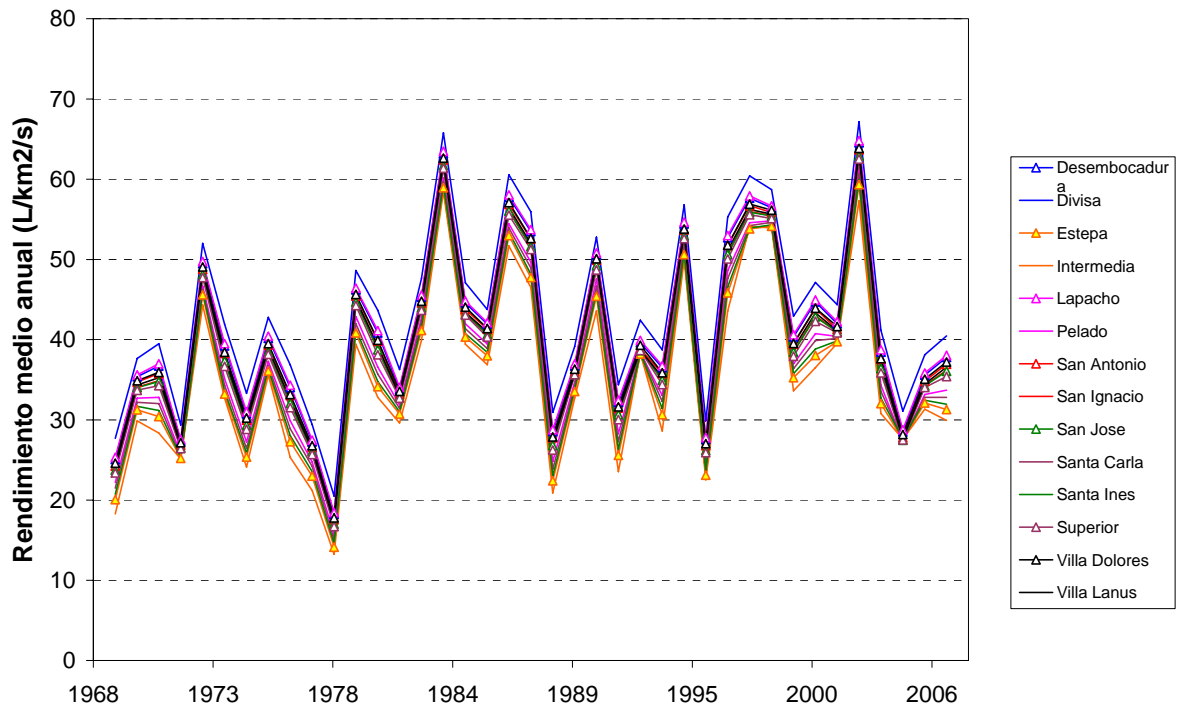
Finalmente, en la Figura 3.6.5 se presenta el coeficiente de escorrentía medio anual de la cuenca. Se observa que varía entre aproximadamente 0,6 y 0,7, lo cual es compatible con análisis antecedentes<sup>6</sup>. Su valor promedio es 0,65.



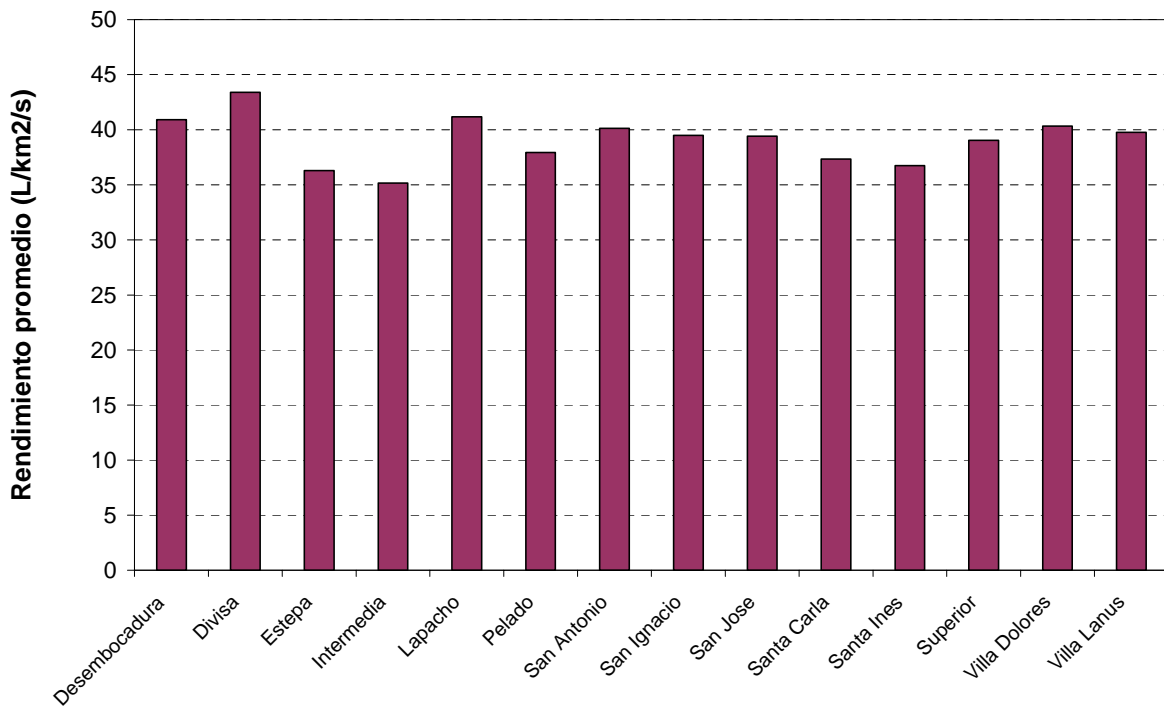
a) Cuenca

<sup>5</sup> EBY, comunicación personal

<sup>6</sup> EBY, comunicación personal



b) Subcuencas



c) Promedio por subcuenca

Figura 3.6.4: Rendimiento

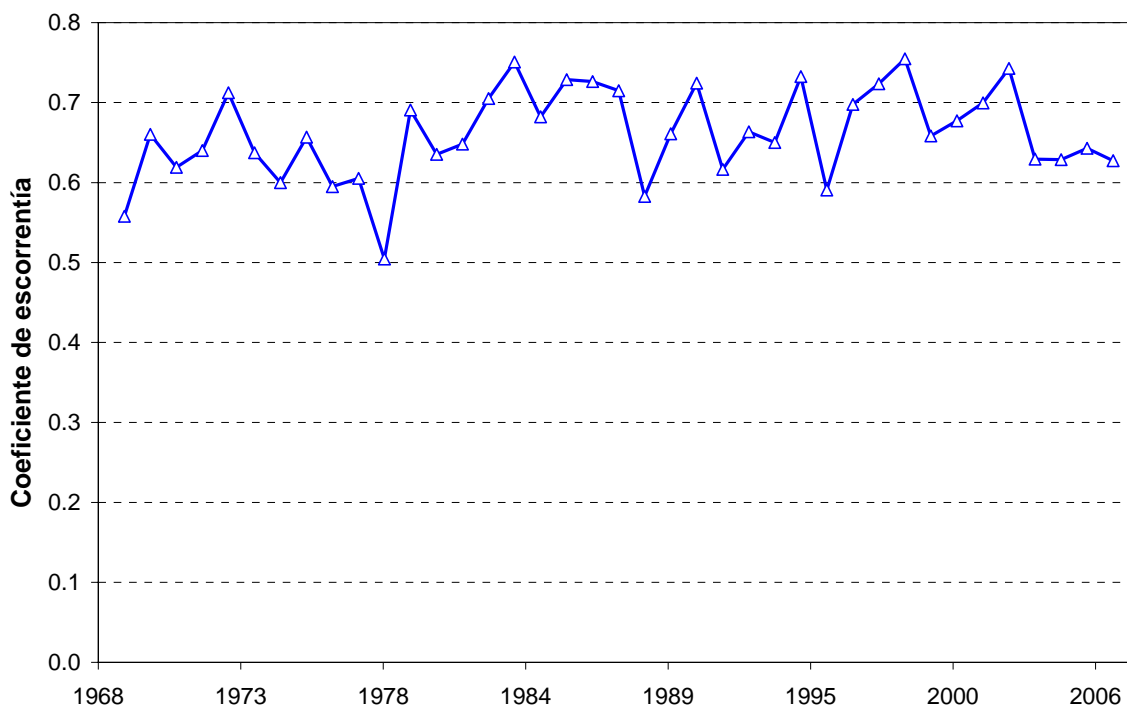


Figura 3.6.5: Coeficiente de escorrentía medio anual de la cuenca del Zaimán

### 3.7 EVENTO EXTRAORDINARIO

A pedido de la EBY, se aplicó el modelo para simular la sucesión de eventos extraordinarios ocurridos a finales de octubre de 2008 (comenzando el 26). El Sector Hidrología del Departamento Técnico de la EBY proveyó datos de su base de datos operativa, estación Zaimán, para el período 01 de setiembre al 06 de noviembre de 2008, cada 3 horas, para ser utilizados como forzante (Figura 3.7.1). Además, la EBY facilitó los registros de niveles en el Puente de Hormigón El Porvenir.

En la Figura 3.7.2 se comparan los niveles medidos y los calculados. Se observa que el modelo representa correctamente la tendencia de evolución, incluso con una precisión suficiente como para detectar la superación del nivel de viga del puente.

La Figura 3.7.3 presenta el caudal de acuerdo al modelo. Se observa que este indica un pico máximo de 420 m<sup>3</sup>/s, asociado al primer evento de precipitación. El correspondiente pico en la Ruta 12 es de 550 m<sup>3</sup>/s.

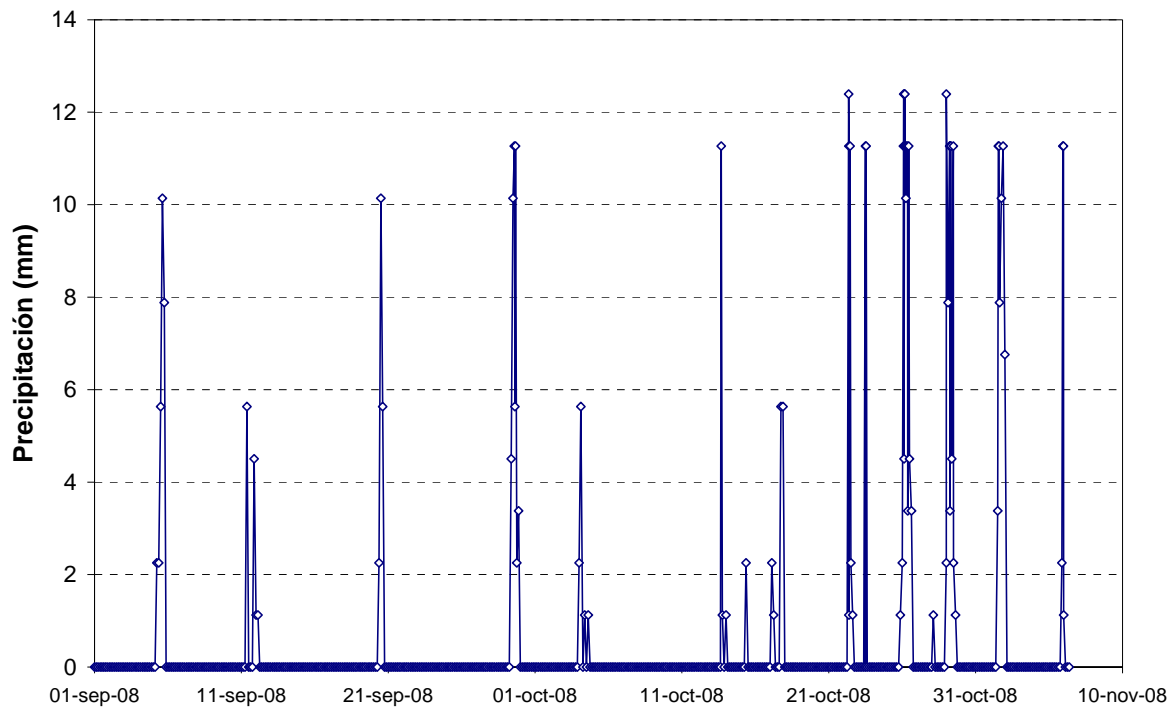


Figura 3.7.1: Precipitación en intervalos de 3 horas.

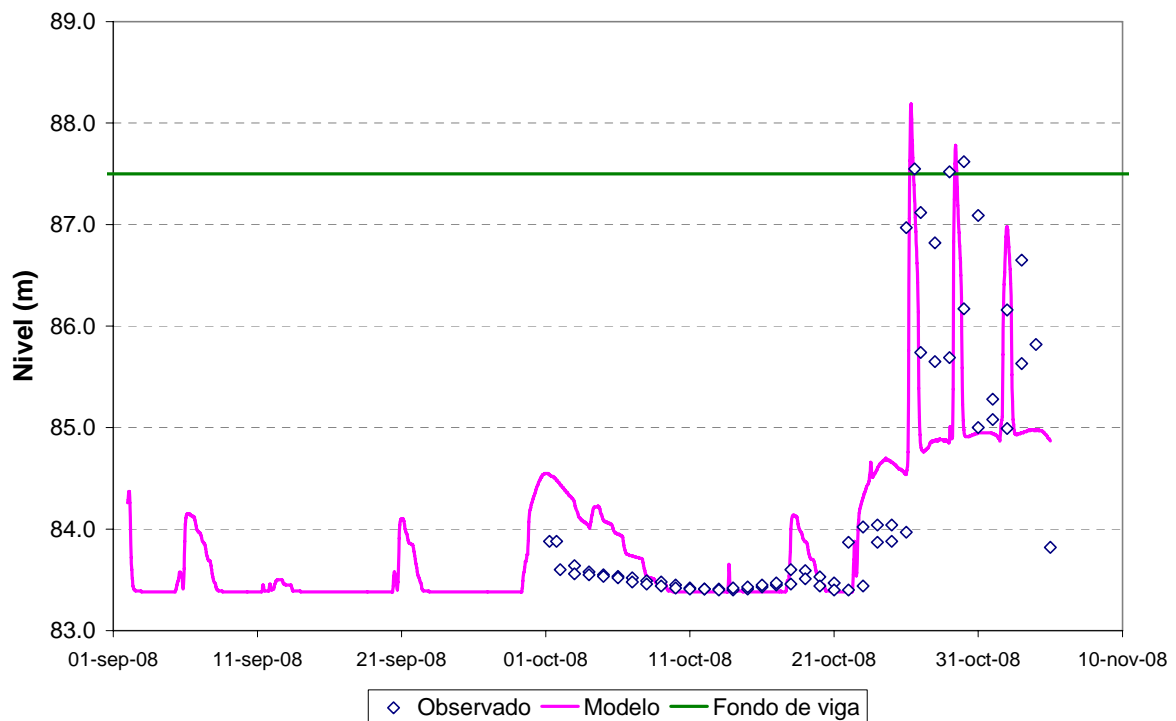
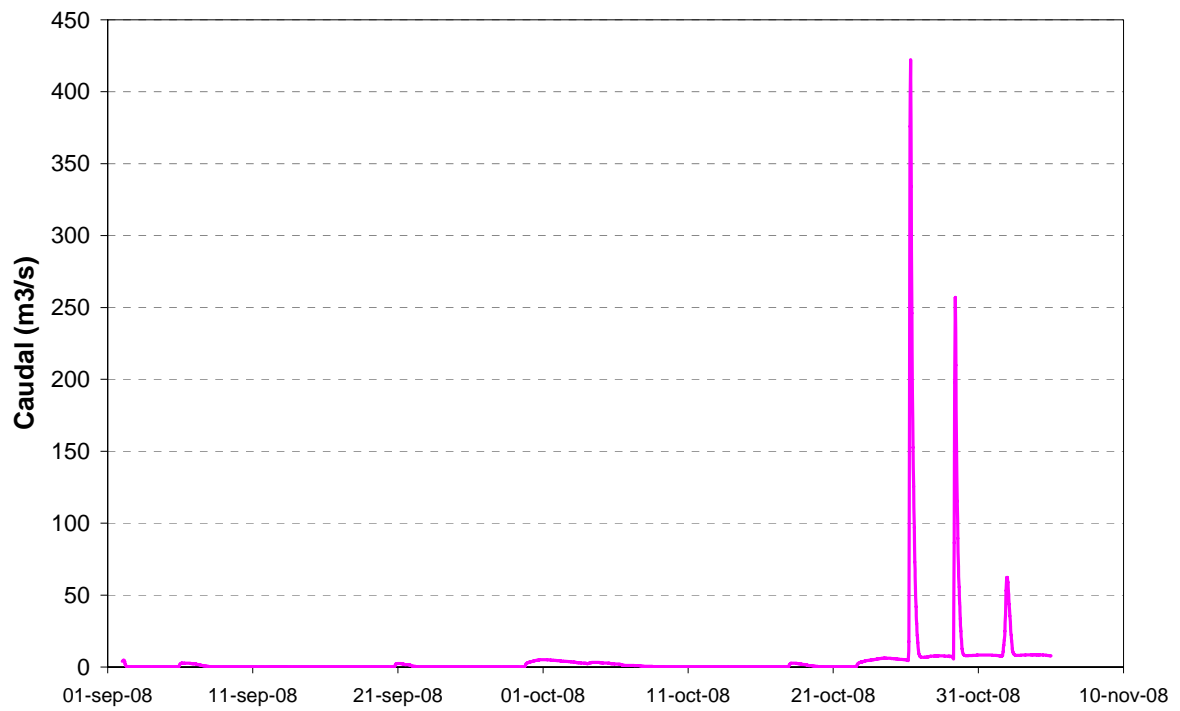


Figura 3.7.2: Nivel de agua en el Puente de Hormigón El Porvenir para los eventos de fines de octubre de 2008.



**Figura 3.7.3:** Caudal en el Puente de Hormigón El Porvenir para los eventos de fines de octubre de 2008.

#### 4 CONCLUSIONES

Las conclusiones principales que se desprenden de los estudios con el modelo hidrológico-hidráulico del A° Zaimán son las siguientes:

- Se dispone de un modelo hidrológico-hidráulico del A° Zaimán con la calibración ajustada para representar mejor los niveles mínimos en la sección de la Ruta 12 y en la sección de la desembocadura al río Paraná. Al verificarlo con datos de niveles y un aforo registrados en el Puente de Hormigón El Porvenir, el modelo muestra una recesión algo más prolongada que lo que indica las mediciones, lo que se adjudica, en parte, a que se trabaja con precipitaciones de paso diario.
- La modelación con precipitaciones de paso diario sólo puede proveer caudales medios diarios. Para poder reproducir los picos diarios es necesario trabajar con series de precipitaciones de paso suficiente como para resolver la distribución temporal de la lluvia durante el día.
- El modelo fue también ajustado para reproducir picos instantáneos compatibles con los estudios antecedentes. Hay que destacar que la respuesta en caudales del sistema es muy sensible a la distribución temporal de la lluvia, lo cual indica un relativamente alto grado de incertidumbre en esos caudales instantáneos.
- Los efectos de remanso para cotas del embalse de 76 y 78 m están confinados dentro de una distancia de 800 m de la desembocadura.
- El efecto de remanso con el embalse a cota 83 m puede llegar hasta alrededor de 7 km de la desembocadura para condiciones normales. Sin embargo, para grandes crecidas (recurrencia mayor o igual a 5 años, en términos de caudales medios diarios) el remanso no supera los 4800 m, es decir, queda incluido el puente de la Ruta 12 pero no el puente de Cabo de Hornos.
- Como un indicador global de la intrusión que significa el efecto de remanso a cota 83 m, se tiene que el 'subembalse' generado representa una superficie de sólo el 2,6% del área total de la cuenca del Zaimán.
- El amplio valle de inundación torna pequeñas las variaciones de nivel resultantes de caudales medios diarios de distintos períodos de retorno.
- Se dispone de mapas de riesgo de inundación para todo el A° Zaimán.
- El actual puente de la Ruta 12 genera una sobrelevación en la sección de aguas arriba del orden de 15/20 cm para los picos intranuales, alcanzando casi 35 cm para el evento de febrero de 1983. Con el puente ampliado duplicando la luz, esas sobrelevaciones no superan los 7 cm.
- El modelo muestra que los aumentos de los caudales de pico (instantáneos) son mínimos por el crecimiento de la urbanización en la zona de margen izquierda de la subcuenca 'Villa Dolores' (N° 3), con un máximo incremento que no supera los 6 m<sup>3</sup>/s, cuando los picos mismos pueden ser del orden de 50 m<sup>3</sup>/s.
- Los caudales medios diarios se encuentran en el rango de 100 a 300 m<sup>3</sup>/s para recurrencias de entre 2 y 100 años.

- Los rendimientos medios anuales para las subcuencas no bajan de 35 L/km<sup>2</sup>/s y no alcanzan los 45 L/km<sup>2</sup>/s, los cuales resultan entre un 50 y un 100% mayores a los reportados en análisis hidrológicos antecedentes.
- El coeficiente de escorrentía varía, de subcuenca a subcuenca, entre aproximadamente 0,6 y 0,7, con un valor promedio de 0,65, valores que resultan compatibles con análisis hidrológicos antecedentes.

Además, del estudio surgen las siguientes recomendaciones:

- La generación continua de datos hidrometeorológicos, y su consiguiente procesamiento y asimilación con el modelo hidrológico-hidráulico desarrollado, constituye una tarea de primera importancia para poder operar con eficacia sobre la cuenca del A° Zaimán.
- En particular, resulta altamente recomendable la ejecución de aforos en secciones relevantes, de modo de precisar con mayor certidumbre la relación entre lluvias y caudales máximos en el A° Zaimán.
- Para que el modelo desarrollado, y transferido a la EBY, pueda ser utilizado como una herramienta de gestión, es necesario mantenerlo operativo. Entonces, más allá del apoyo que pueda brindar el INA a través de convenios de cooperación, es necesario que la EBY dedique tiempo de personal propio en forma continua a su operación, ya que se trata de herramientas que requieren conservar un nivel de entrenamiento apropiado, y recibir un mantenimiento y actualización continuas.