

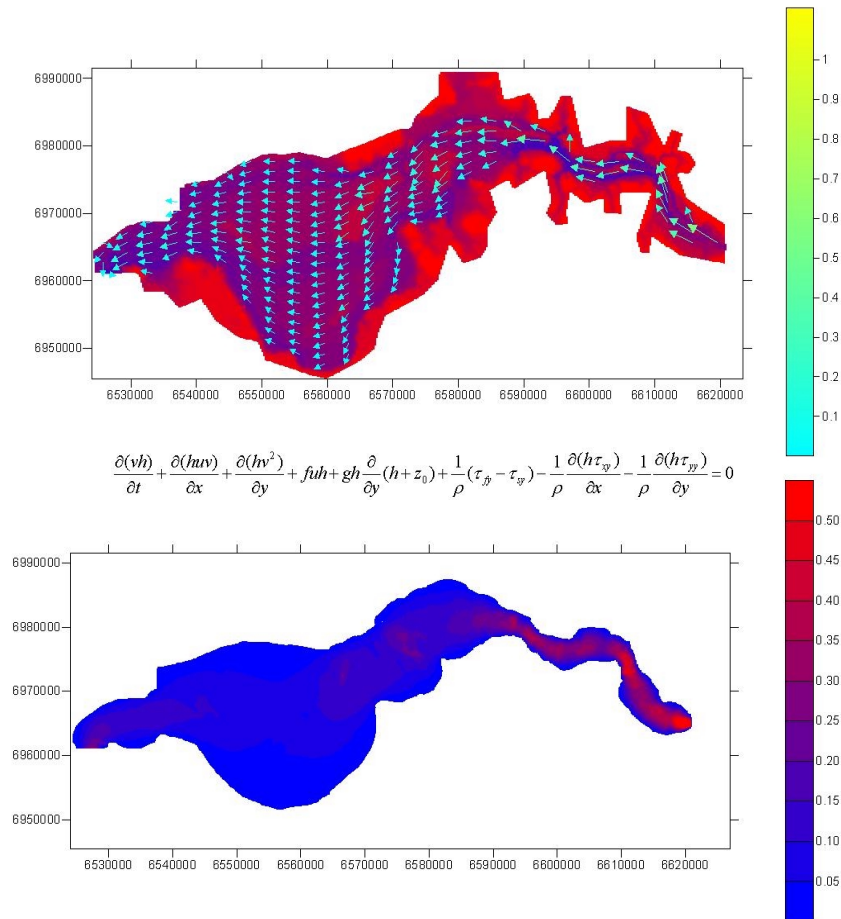


PROYECTOS

“BALANCE DE CONTAMINANTES EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA”

“VELOCIDADES DE CORRIENTE EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ”

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE DE YACYRETÁ



AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE:

Ing. Oscar V. LICO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS:

Dr. Raúl A. LOPARDO

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL:

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Christian U. ALVAREZ TAGLIABUE

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Dr. Pablo A. TARELA

Ing. Patricia R. JAIME

Sr. Julio A. TORCHIO

INFORME PRODUCIDO POR

Christian U. ALVAREZ TAGLIABUE

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

RESUMEN

Se describe la implementación y calibración de un modelo hidrodinámico bidimensional del embalse de Yacyretá, que se denomina *EBY-INA I*. Se utilizan como base los datos provistos por la EBY. El modelo numérico del terreno y el coeficiente de rugosidad de Manning se utilizan como mecanismos de calibración. La calibración se efectúa comparando niveles calculados y medidos en Posadas y perfiles de velocidades calculados y medidos en diversas secciones transversales del embalse. Se obtiene un acuerdo globalmente satisfactorio para caudales desde bajos hasta altos. La relativamente alta dependencia que los resultados muestran al modelo numérico del terreno resalta la importancia de contar con un relevamiento batimétrico de base preciso para todo el embalse, con periódicas actualizaciones. Se plantea como próxima etapa del estudio la efectivización de una nueva campaña de mediciones de velocidad, incorporando perfiles en la zona del embalse propiamente dicho y encarando las mediciones con un criterio de mayor precisión en el dato local.

Descriptorios Temáticos: Modelación matemática, modelación hidrodinámica, simulación numérica, embalse, lago.

Descriptorios Institucionales: Entidad Binacional Yacyretá

Descriptorios Geográficos: Misiones, Posadas, Encarnación, República Argentina, República del Paraguay, Río Paraná.

INDICE

1 INTRODUCCION.....	5
2 IMPLEMENTACION DEL MODELO	7
2.1 REPRESENTACION MATEMATICA	7
2.2 MODELO NUMERICO DEL TERRENO	8
2.3 GEOMETRIA	15
2.4 DISIPACION	15
2.5 FORZANTE	15
2.6 CONDICIONANTE	17
3 CALIBRACION DEL MODELO.....	19
3.1 CRITERIO DE CALIBRACION.....	19
3.2 MECANISMOS DE CALIBRACION.....	21
3.3 ESCENARIOS DE CALIBRACION.....	21
3.4 RESULTADOS	22
3.5 VALIDACION	33
4 EXPLOTACION DEL MODELO	34
4.1 SITUACION PRESENTE	34
4.2 SITUACION FUTURA.....	36
5 CONCLUSIONES	38
ANEXO I	39
REFERENCIAS.....	41

1 INTRODUCCION

Como para todo embalse, la calidad del agua es una de las cuestiones fundamentales a atender en el embalse de Yacyretá. Interesa tanto un diagnóstico bajo las condiciones actuales de operación como un pronóstico para la situación futura, con el nivel del embalse elevado a la cota final o a valores intermedios.

Las sustancias contaminantes que llegan hasta las aguas del embalse, ya sean de origen natural o relacionadas a la actividad antrópica, son transportadas por las corrientes y difundidas por la turbulencia. Eventualmente, también pueden sufrir reacciones químicas, bioquímicas o biológicas que las transformen. Lo ideal es poder representar adecuadamente cada uno de estos procesos mediante modelos matemáticos, de modo de obtener las respuestas cuantitativas del sistema a esas solicitaciones.

En primer lugar debe modelarse la hidrodinámica, ya que las corrientes son el mecanismo primario de transporte en el embalse. Al mismo tiempo, resulta fundamental determinar si se pueden producir estratificaciones térmicas y bajo qué condiciones, ya que ello condiciona significativamente la hidrodinámica y también los procesos de transformación. Luego se debe modelar el transporte de los sólidos suspendidos, ya que ellos son uno de los vehículos primarios de transporte de algunos contaminantes con alta capacidad de adsorción. A continuación deben modelarse las reacciones principales para cada contaminante en particular.

En el presente proyecto se encara la línea de análisis recién esbozada, a través de la implementación de modelos numéricos que simulan los procesos descritos. En particular, se utilizan modelos hidrodinámicos, hidrotérmicos y de transporte de sedimentos y contaminantes. Cada uno de estos modelos es sometido primero a un proceso de calibración en base a la información de campo disponible. Luego se explotan para producir resultados que contribuyan a la diagnosis y la prognosis de los fenómenos involucrados.

El objetivo final del proyecto es procesar esos resultados de modo de generar información que resulte de utilidad para el tomador de decisiones estratégicas.

Este programa de estudios ha sido acordado con la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) a través de las siguientes Actas Complementarias del Convenio Marco entre la EBY y el INA firmado con fecha 19/Feb/2002:

- Acta N° 1 (firmada el 20/May/2002): Se plantea formular un primer modelo hidrodinámico y un análisis preliminar de contaminantes prioritarios.
- Acta N° 3 (firmada el 13/Set/2002): Se plantea obtener un modelo hidrodinámico calibrado en base a niveles de agua y velocidades de corriente.
- Acta N° 4 (firmada el 13/Set/2002): Se plantea efectuar un análisis de la calidad del agua del embalse y de los subembalses urbanos.

Las actividades del Acta N° 1 se financian como proyecto interno del INA, mientras que las de las actas N° 3 y 4 son financiadas por la EBY.

En este Informe se describe la implementación y calibración del modelo hidrodinámico bidimensional del embalse en base a la información disponible actualmente. Las tareas desarrolladas se inscriben dentro de las tareas comprometidas en las actas N° 1 y 3.

2 IMPLEMENTACION DEL MODELO

2.1 REPRESENTACION MATEMATICA

El embalse de Yacyretá (Figuras 2.1.1 y 2.1.2) tiene una extensión del orden de los 100 km. Su ancho en el vaso principal es del orden de los 30 km, disminuyendo a alrededor de los 10 km en la zona de transición hacia la zona de régimen fluvial. A su cota actual de 76 m (sobre el cero del IGM), las profundidades máximas son de alrededor de los 15 m, las cuales llegarán entonces hasta los 22 m cuando opere a cota 83 m. La comparación entre las dimensiones horizontales y las verticales del flujo lleva rápidamente a la conclusión que la dinámica del sistema cae en la categoría de aguas poco profundas. Entonces, en ausencia de estratificación térmica intensa (como de hecho sucede y sucederá, tal como se discute en Morillo & Tarela 2002), puede utilizarse una descripción integrada en la vertical, o sea, el movimiento puede ser descrito por las conocidas ecuaciones para aguas poco profundas (Abbott 1979).



Figura 2.1.1 Ubicación regional del embalse de Yacyretá

La resolución numérica de esas ecuaciones se encuentra implementada en distintos software, algunos de uso público y otros de dominio privado. En el presente estudio se utilizó el software

HIDROBID II, desarrollado en el INA (Menéndez 1990), basado en el método de las diferencias finitas y cuyas características técnicas se presentan en el Anexo I.



Figura 2.1.2 Embalse de Yacyretá

La implementación del modelo hidrodinámico del embalse, en base al software elegido, requiere la especificación del modelo numérico del terreno y la geometría, la caracterización de los mecanismos de disipación de energía y el establecimiento de los forzantes que provocan el movimiento del agua y de los condicionantes que le impiden fluir libremente. En las secciones siguientes se identifican y describen estos aspectos para el problema particular del embalse de Yacyretá.

2.2 MODELO NUMERICO DEL TERRENO

En una primera etapa se dispuso de una base de datos topobatimétricos históricos provista por la EBY, consistente en curvas de nivel para la altimetría y curvas de nivel y puntos acotados para la batimetría, proporcionados en archivo magnético. Los datos son el resultado de la composición de diversas fuentes y presentan algunos baches de información, según se muestra en la figura 2.2.1, en coordenadas de Gauss-Krüger. Fueron provistos en varios archivos por separado, por lo que hubo que realizar un trabajo de composición y edición. Debido a que existen algunos desajustes entre los datos de altimetría y batimetría, se debió realizar una compatibilización entre ambos conjuntos. El criterio fue priorizar la altimetría, por ser la información más confiable.

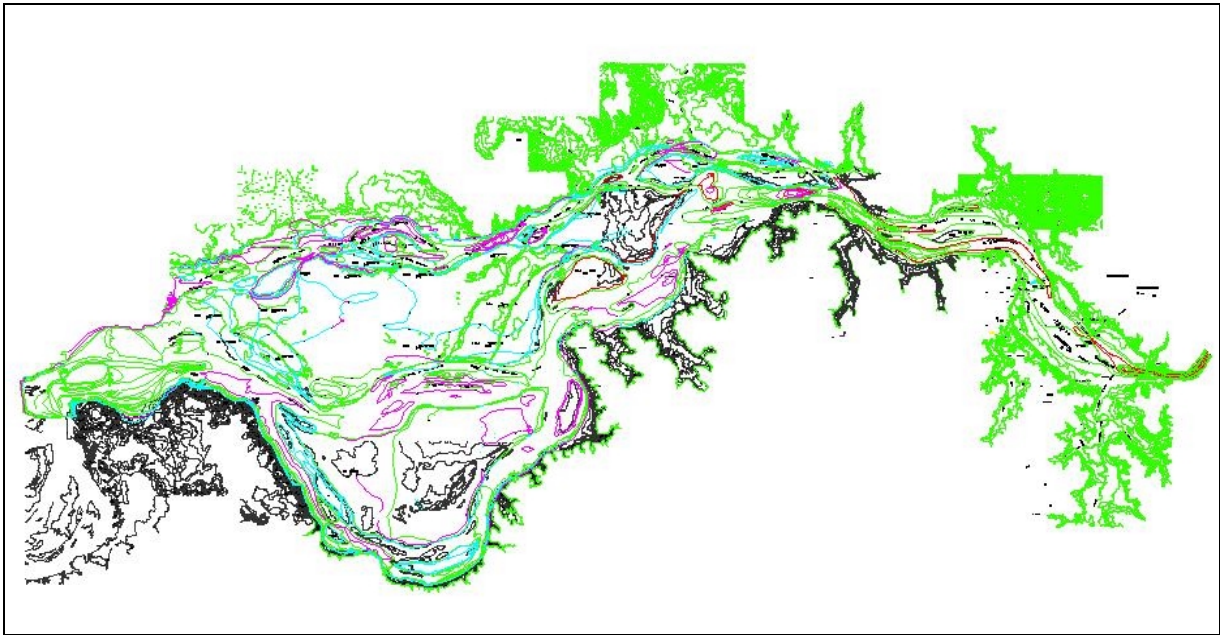


Figura 2.2.1 Base de datos altimétricos históricos

En una segunda etapa se recibió la base topobatemétrica utilizada por el Modelo Hidrodinámico Bidimensional de la EBY, implementado en base al software *HYDROSIM* (EBY/INRS-ETE 2002). Esta base, mostrada en la figura 2.2.2, consiste en valores puntuales correspondientes a más de cincuenta mil nodos. Fue construida a partir de la base de datos históricos, pero luego fue ajustada en forma criteriosa para obtener una buena performance del modelo en cuanto a la predicción de niveles. También fue provista la base de datos de más de treinta mil nodos correspondientes a la malla de cálculo de elementos finitos utilizada en ese modelo, la cual se muestra en la figura 2.2.3.

Finalmente, en una tercera etapa se accedió a los relevamientos actualizados de 12 secciones transversales efectuados por EVARSA para la EBY durante el estudio de sedimentación del embalse (NHC y otros 2002). La ubicación de estos cortes se muestra en la figura 2.2.4, mientras que la figura 2.2.5 presenta los cortes. Nótese que cubren la zona fluvial (cortes 8 a 12), de transición (cortes 3 a 7) y de descarga (cortes 1 y 2), pero que no proveen información sobre el embalse propiamente dicho.

En la primera etapa se utilizaron los datos históricos para construir el modelo numérico del terreno. Mediante un utilitario de computación, se obtuvo una malla regular con una cota de elevación en cada nodo, la cual surge de una interpolación usando una técnica “kriging”. Las celdas de la malla son cuadrangulares, de 250 m en la dirección este (coordenada *X* de Gauss-Krüger) y de 100 m en la dirección norte (coordenada *Y*). De esta manera, la malla de discretización para cubrir desde Garupá hasta la presa está compuesta por 399 celdas en la dirección *X* y 461 celdas en la dirección *Y*. La Figura 2.2.6 presenta la batimetría así obtenida.

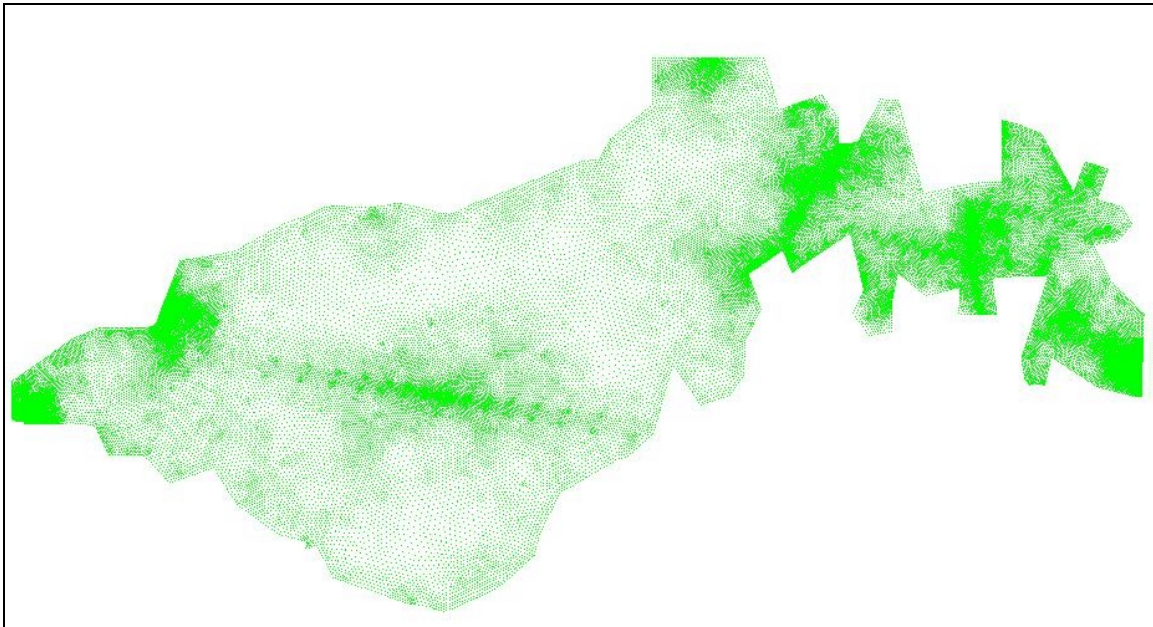


Figura 2.2.2 Base de datos altimétricos INRS-EBY.

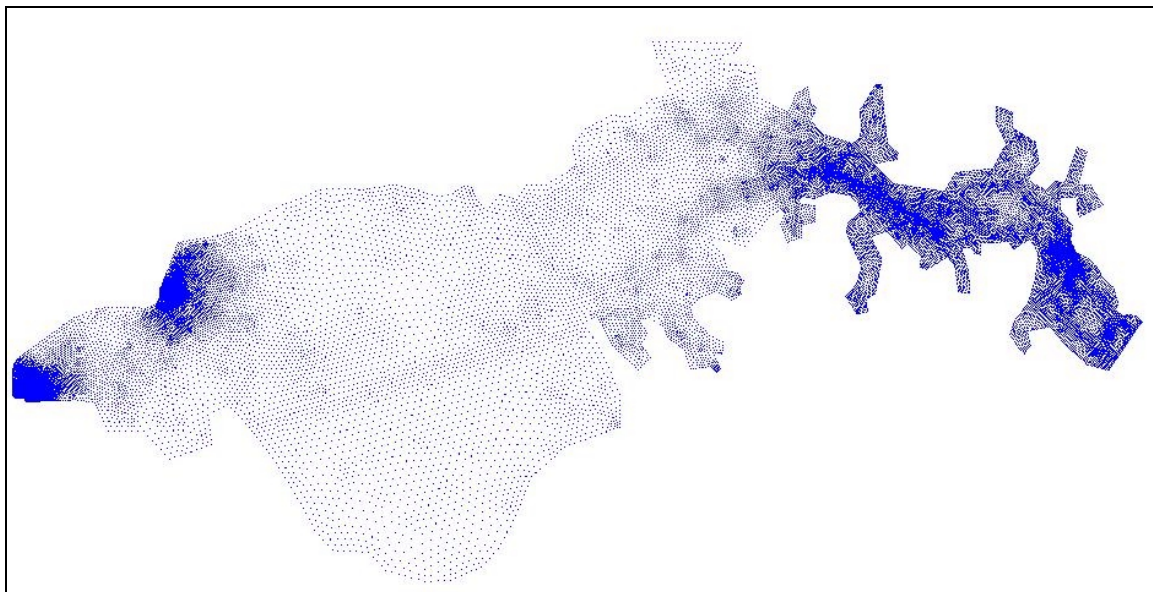


Figura 2.2.3 Base de datos altimétricos de la malla de elementos finitos del modelo hidrodinámico de la EBY.

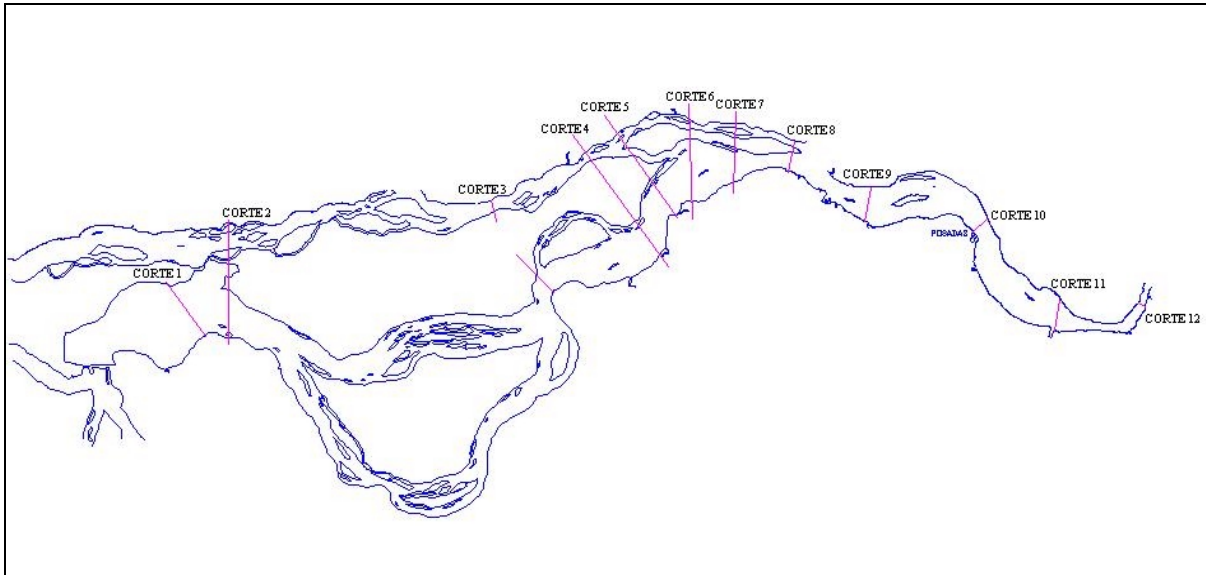
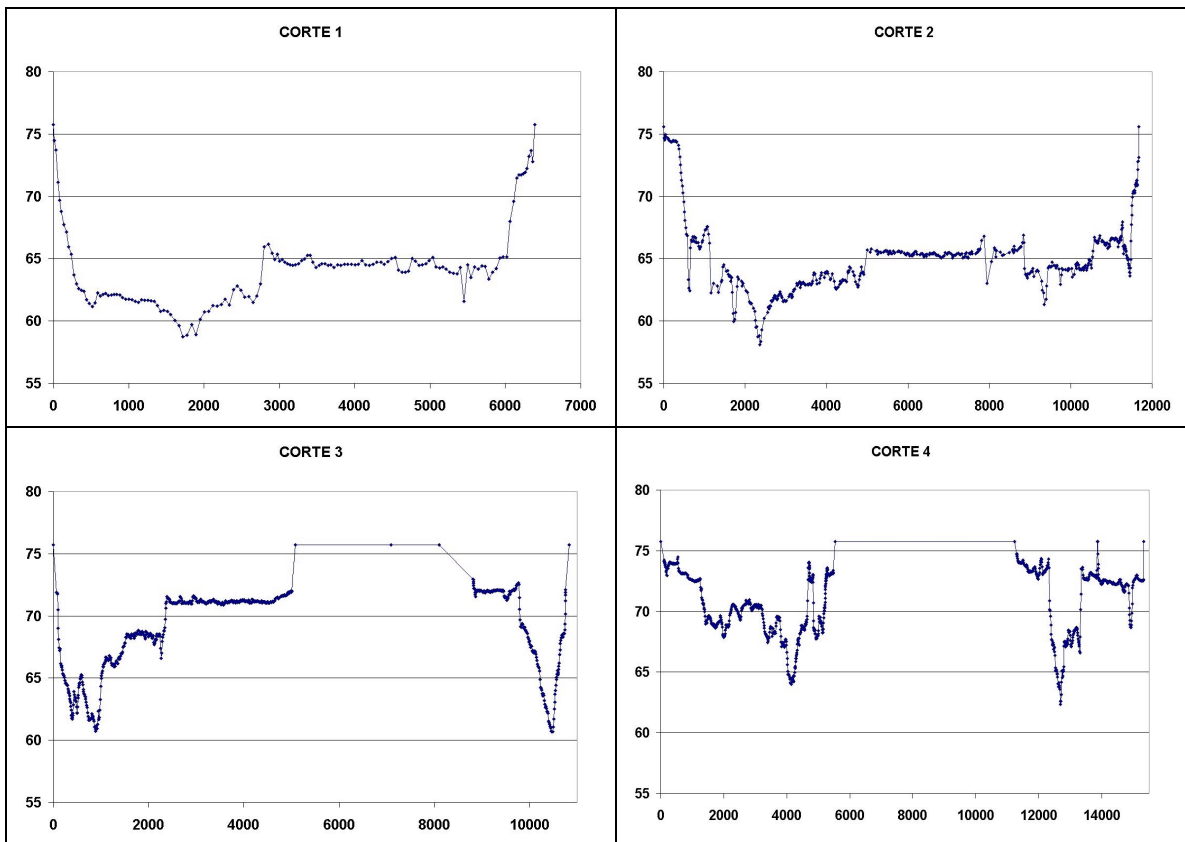
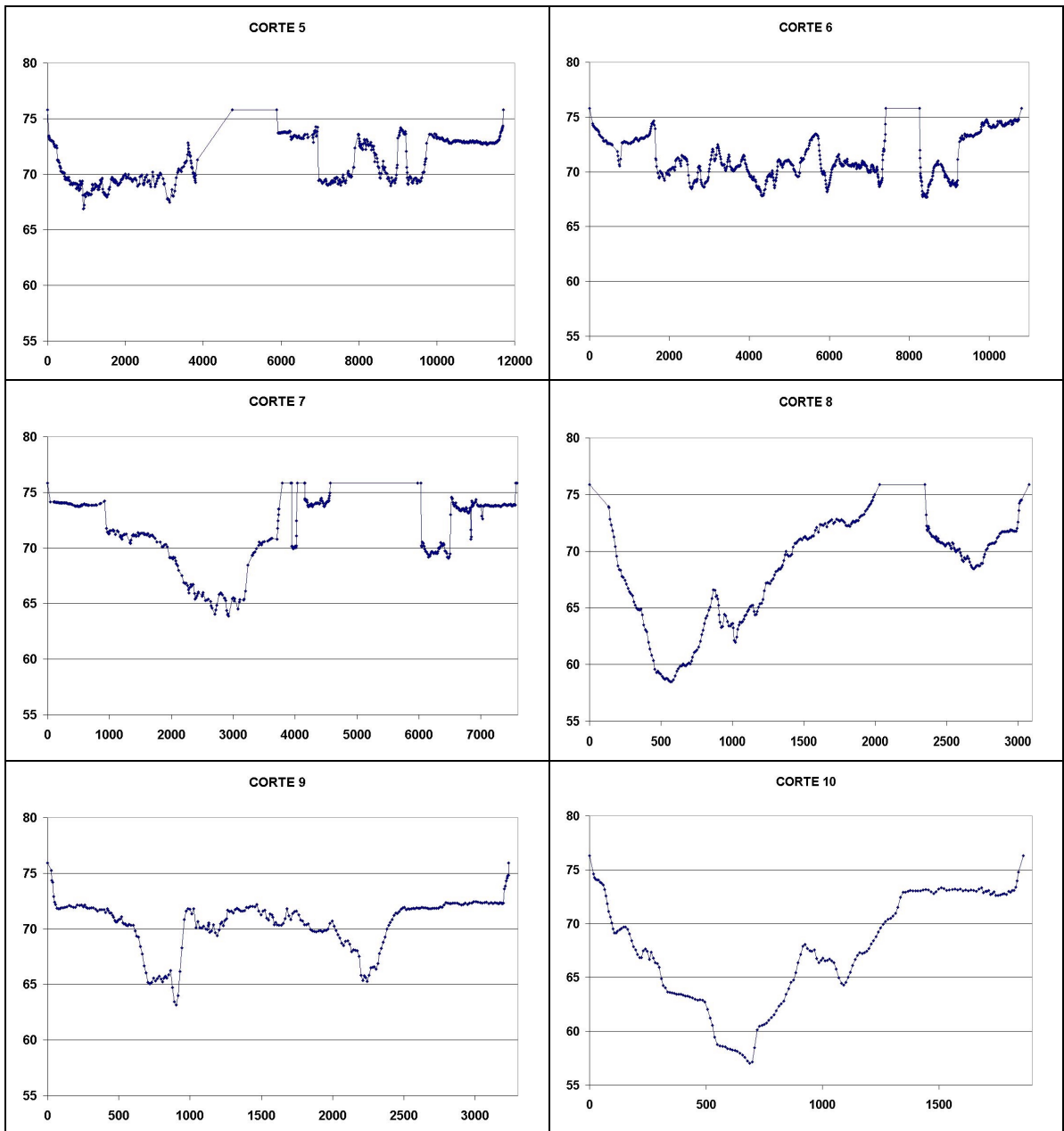


Figura 2.2.4 Ubicación de los cortes en planta (numerados de oeste a este)





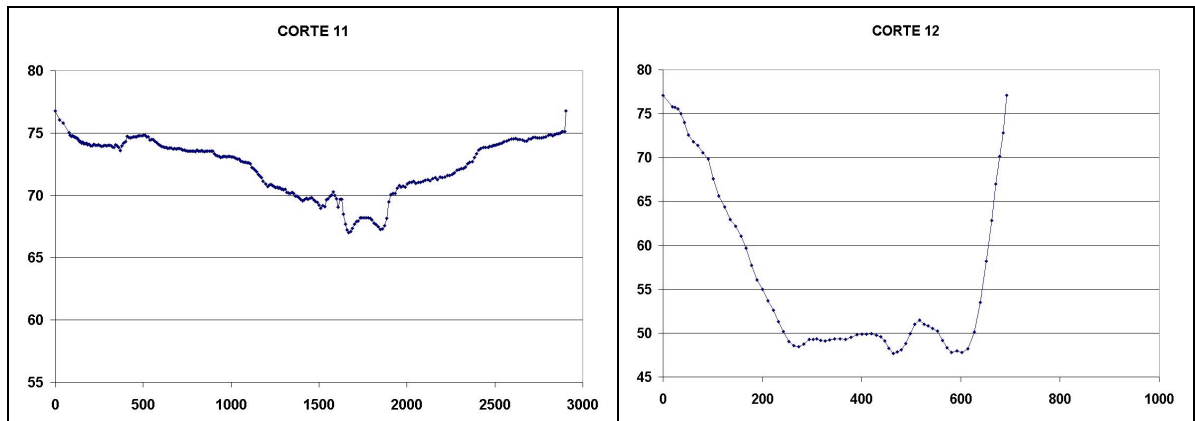


Figura 2.2.5 Secciones transversales del embalse

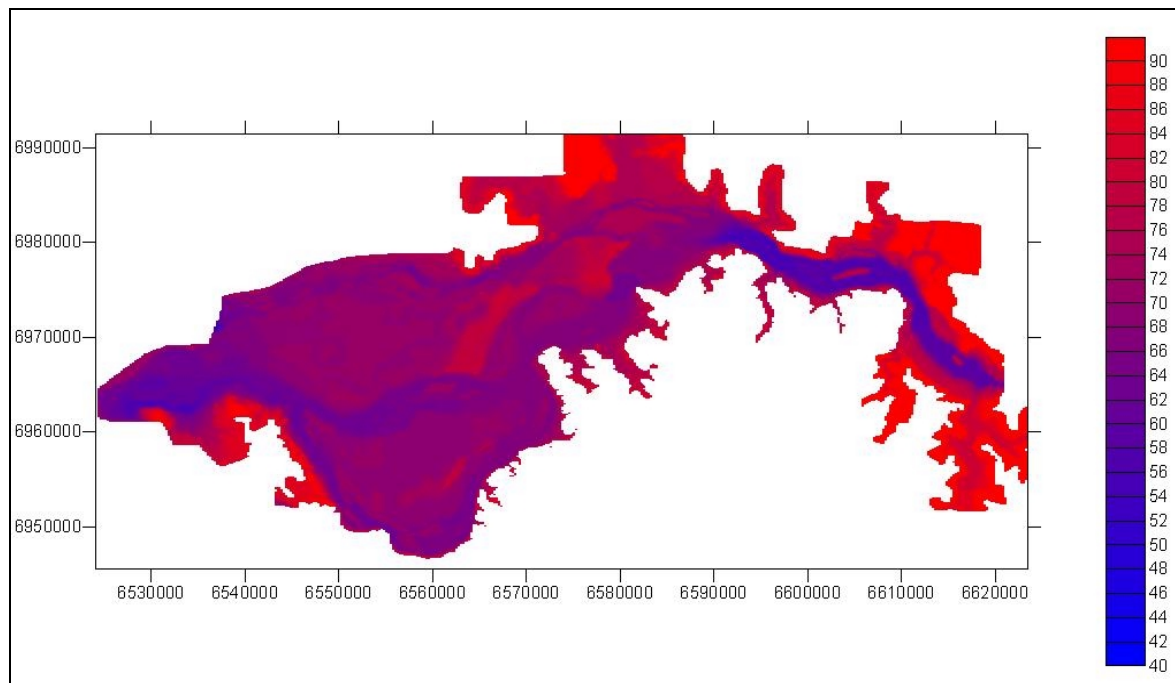


Figura 2.2.6 Modelo numérico del terreno para la primer etapa

En la segunda etapa se partió de la base del modelo de la EBY. El procesamiento de estos datos se efectuó en forma similar a la anterior, resultando en la batimetría mostrada en la Figura 2.2.7.

Para la tercera etapa se utilizó como base la malla construida en la etapa 2, y se efectuaron correcciones manuales para ajustar la batimetría de modo de resultar compatible con la relevada en las secciones transversales. La Figura 2.2.8 presenta esta batimetría.

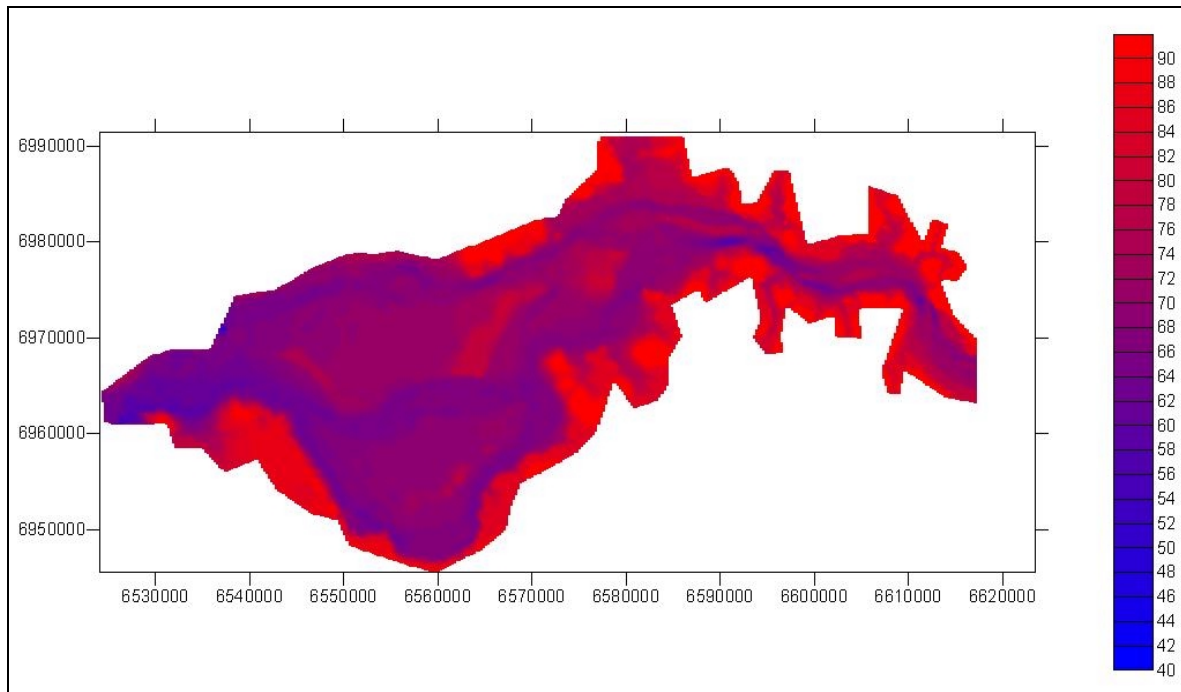


Figura 2.2.7 Modelo numérico del terreno para la segunda etapa

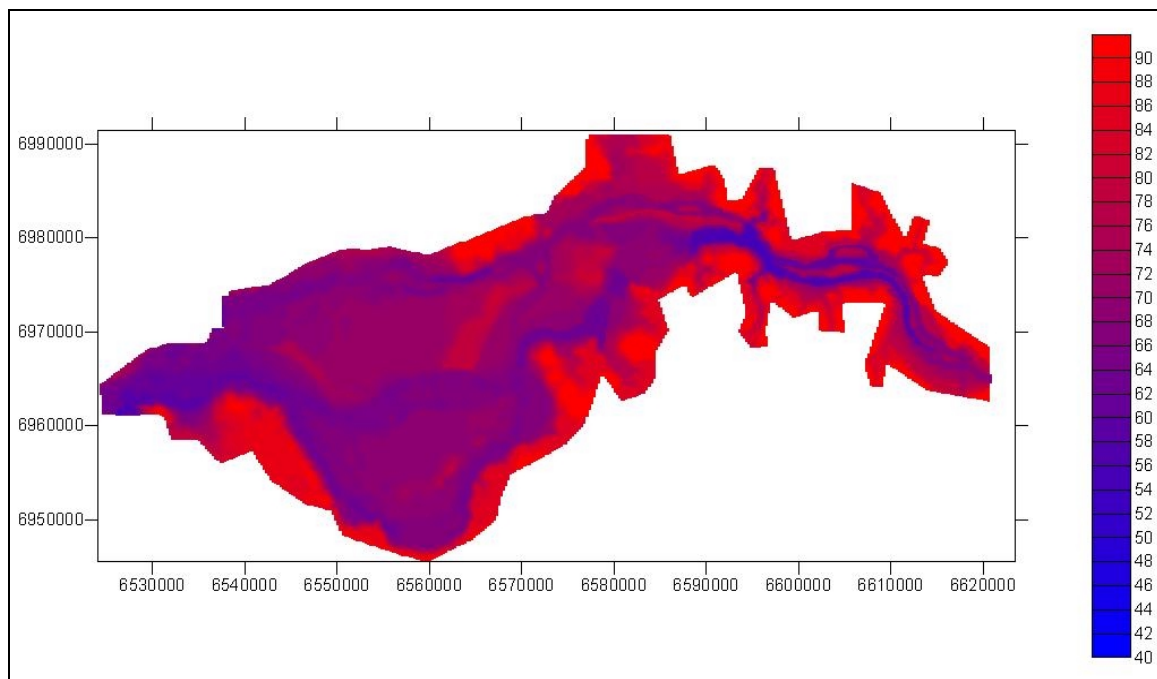


Figura 2.2.8 Modelo numérico del terreno para la tercer etapa

2.3 GEOMETRIA

La geometría del embalse está definida, en parte, naturalmente por la topobatimetría de la zona y, en parte, artificialmente por los cierres provocados por la obra.

Los cierres fueron levantados de imágenes satelitales, y digitalizados para poder ingresarlos como condición de borde geométrica del modelo.

2.4 DISIPACION

El único tipo de disipación considerada es la debida a la acción del fondo, que genera torbellinos de eje horizontal en dirección lateral al flujo principal.

Esta disipación se caracteriza a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Un valor típico de este coeficiente para el fondo del río Paraná es 0,025, que fue el valor utilizado de partida.

2.5 FORZANTE

El forzante dominante del movimiento del agua a través del dominio del modelo es el caudal del río Paraná ingresante en el borde de aguas arriba. La acción del viento sobre la superficie del agua resulta secundaria (esto fue verificado con el propio modelo).

La EBY proveyó la serie diaria de caudales ingresantes al embalse para el período que se extiende desde el 01/Ene/1991 hasta el 17/Dic/2002. Esta se muestra en la figura 2.5.1. Se observa claramente la crecida extraordinaria del año 1998, seguida de un período relativamente seco.

Con esta serie se efectuó un análisis estadístico básico, cuyos resultados se muestran en la figura 2.5.2. Se observa que el caudal medio es de alrededor de 15.000 m³/s y la desviación estándar de alrededor de 5.000 m³/s.

La serie de caudales ingresantes fue utilizada como condición de borde de aguas arriba del modelo.

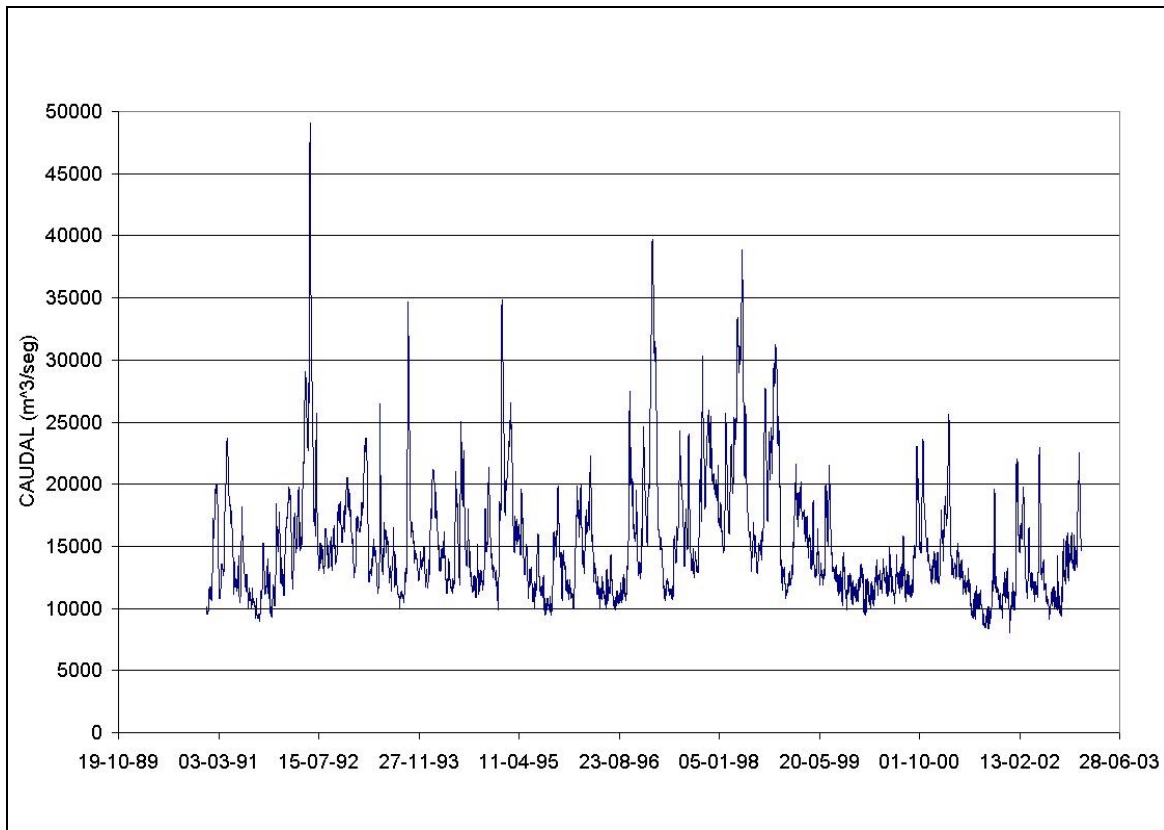


Figura 2.5.1 Serie temporal de caudales ingresantes al embalse

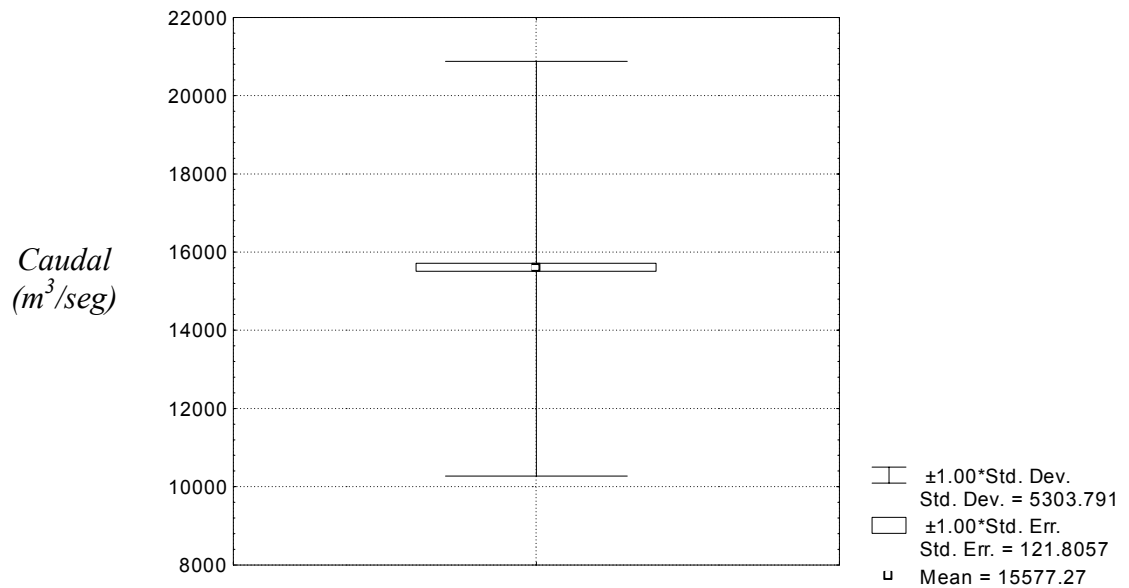


Figura 2.5.2 Estadística de caudales ingresantes al embalse

2.6 CONDICIONANTE

El libre escurrimiento del agua está impedido por la obra, que condiciona el nivel aguas abajo del modelo, produciendo un efecto de remanso.

Se dispuso de la serie diaria de niveles y caudales en ambas salidas: el Brazo Principal (BP) y el Brazo Aña-Cuá (BAC), las cuales se inician básicamente desde el inicio del llenado del embalse (01/Ene/1993). La figura 2.6.1 presenta la partición de caudales entre ambos brazos. Se observa que desde el año 2002 el caudal erogado por el Brazo Aña-Cuá es mantenido prácticamente constante a 1500 m³/s, que es el caudal ecológico establecido, ya que allí no existe central de generación.. Por su parte, en la figura 2.6.2 se muestra la serie temporal de niveles en el Brazo Principal. Allí se nota que el nivel varía muy poco alrededor de una cota algo inferior a 76 m, con el objetivo de maximizar la capacidad de generación eléctrica.

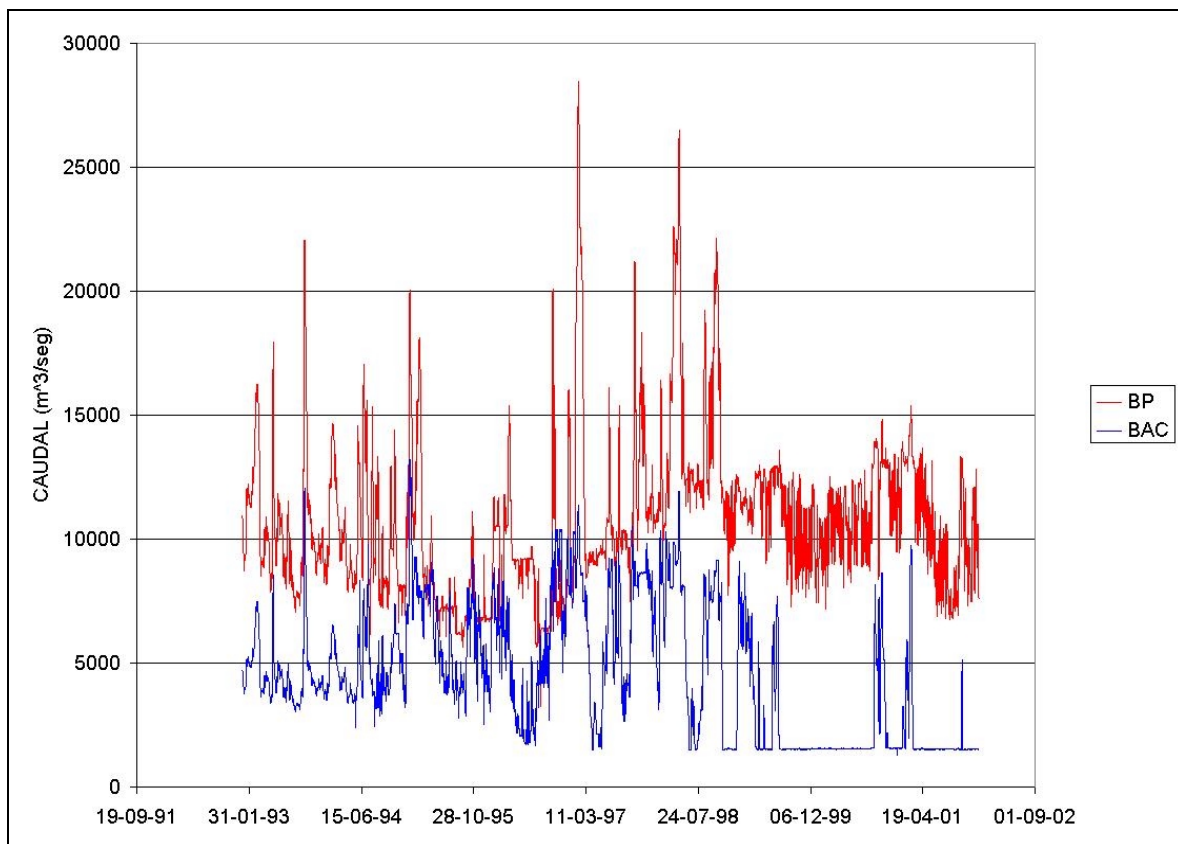


Figura 2.6.1 Serie temporal de caudales evacuados por ambos vertederos

El caudal saliente por el Vertedero del Brazo Aña-Cuá y el nivel en el brazo principal del río son, precisamente, los condicionantes del escurrimiento del agua en el dominio del modelo, por lo cual se utilizaron como condiciones de borde de aguas abajo del modelo.

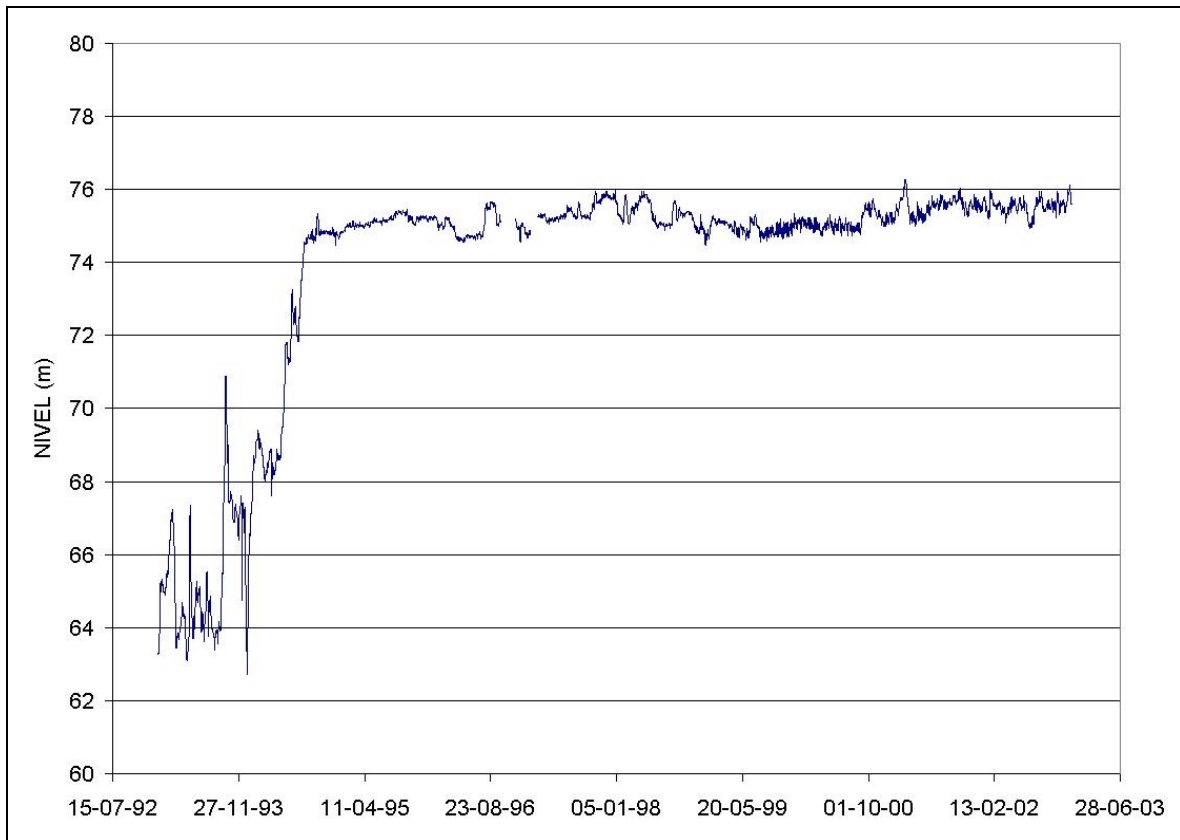


Figura 2.6.2 Serie temporal de niveles medidos en el Brazo Principal

3 CALIBRACION DEL MODELO

3.1 CRITERIO DE CALIBRACIÓN

Calibrar el modelo hidrodinámico significa poder predecir la respuesta del sistema a la acción de los forzantes con relativa precisión, para condiciones en las cuales se dispone de datos suficientes para caracterizar tanto a los forzantes como a esa respuesta, de modo de poder comparar las predicciones con las mediciones.

En el presente caso, se dispuso de dos ítems de información para calibrar el modelo, ambos provistos por la EBY:

- a) La serie de niveles diarios en la ciudad de Posadas, que caracteriza el efecto de remanso.
- b) Mediciones de perfiles de velocidades en las secciones transversales indicadas en la figura 2.2.4, para caudales similares del río, efectuados en oportunidad del estudio de sedimentación (NHC y otros 2002).

La figura 3.1.1 presenta la serie de niveles diarios en Posadas.

En la figura 3.1.2 (a) se muestra un perfil de velocidades medias verticales tal como fue provisto. De la simple observación surge claramente que hay una gran variación en las direcciones. En algunos casos, las direcciones y sentidos resultan claramente errados. Se presume que ello se debe a la forma expeditiva de realizar mediciones de velocidad, en forma dinámica, con el objetivo de obtener un aforo más que una distribución localmente precisa de velocidades de corriente.

Para usar esta información se procedió a filtrar los perfiles según un criterio de dirección promedio: se calculó la dirección promedio de cada perfil de velocidades y la diferencia local con esa dirección promedio, filtrándose aquellas mediciones que se apartan de la dirección promedio en más de un cierto ángulo especificado. Las figuras 3.1.2 (b), (c) y (d) muestra los perfiles obtenidos tomando como ángulo límite 5°, 10° y 15°, respectivamente. Vale aclarar que este criterio resulta operativo en las zonas donde el escurrimiento tiende a ser unidireccional. En las zonas donde el flujo es más definitivamente bidireccional (expansiones y contracciones) debió efectuarse una partición del perfil en varias zonas, a cada una de las cuales se le aplicó el criterio.

Para la calibración se seleccionaron días particulares para los cuales se dispuso de toda la información hidrométrica. Se especificaron la descarga por el brazo secundario y el nivel en el brazo principal correspondientes a ese día como condiciones de borde aguas abajo.

Dado el carácter cinemático del flujo y la corta extensión del modelo en relación con la longitud de las ondas de crecida del río, es lícito utilizar una aproximación de flujo cuasi-estacionario, por lo que cada corrida fue efectuada en régimen estacionario.

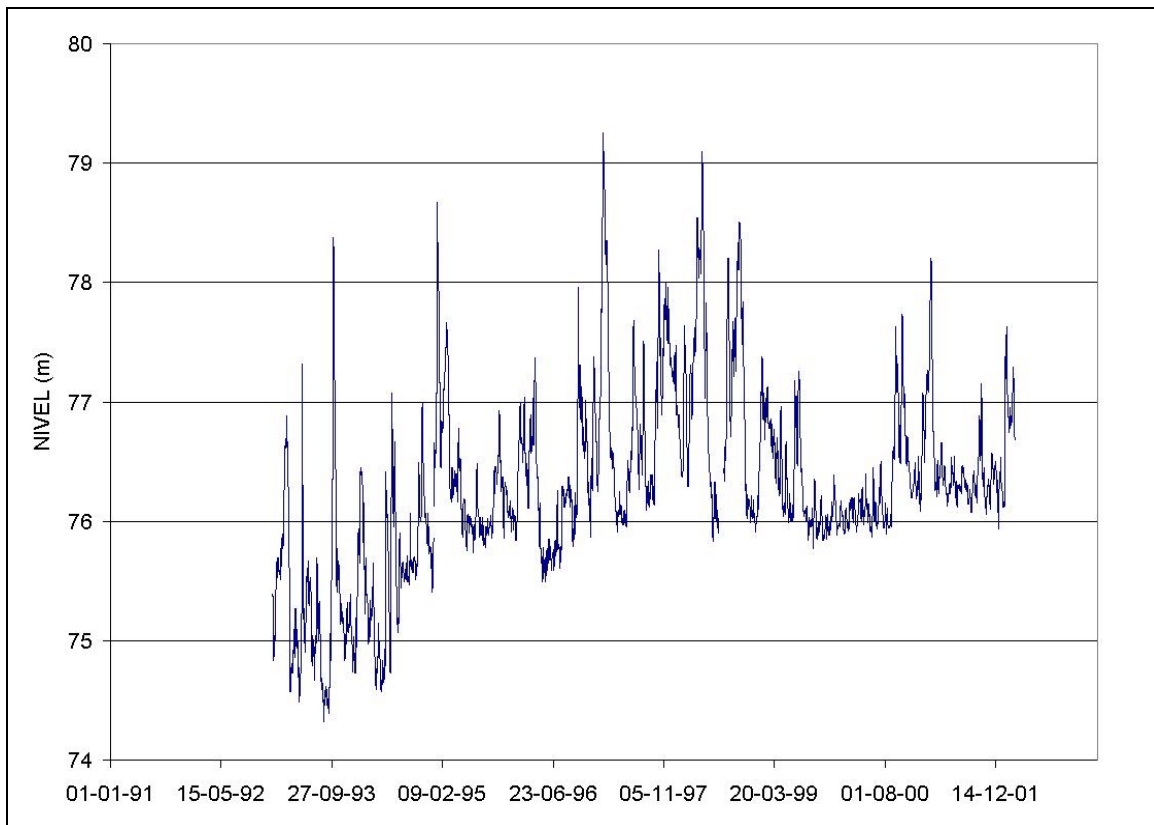


Figura 3.1.1 Serie temporal de niveles medidos en Posadas

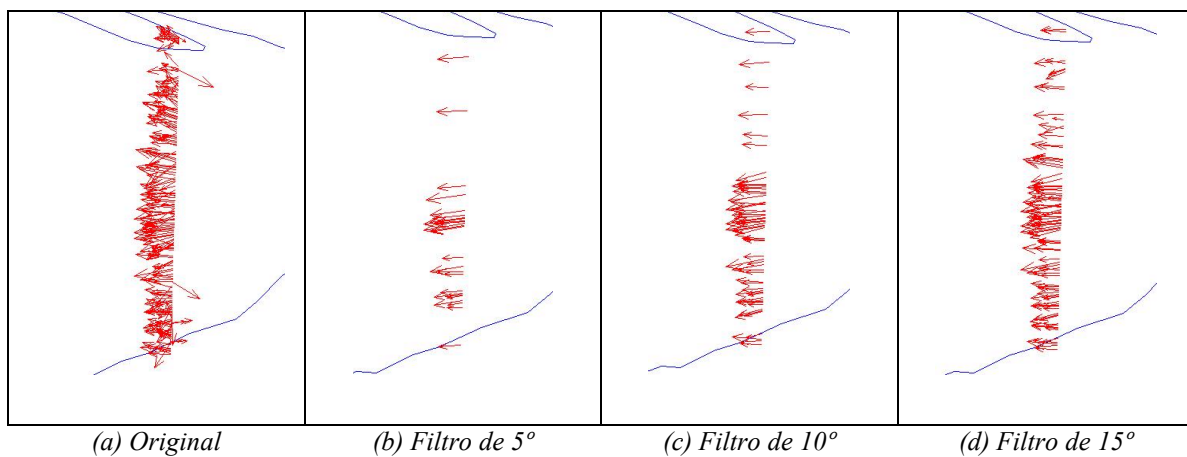


Figura 3.1.2 Perfil de velocidades en la sección corte siete del brazo principal

3.2 MECANISMOS DE CALIBRACION

Se dispuso de dos mecanismos de calibración:

- i. La rugosidad del fondo, eventualmente zonificada.
- ii. La batimetría del fondo, ya que la base de datos no la representa con precisión, al menos en su estado actual.

La variación de la batimetría del fondo se llevó a cabo de modo de tender a una consistencia con los perfiles de velocidades medidos, en cuanto a intensidad y forma del perfil. Al mismo tiempo, se debió tener en cuenta que el aumento del área de flujo disminuye la impedancia del sistema y, en consecuencia, se traduce en una disminución del nivel de agua y viceversa.

Por su parte, variando la rugosidad puede controlarse la pendiente general del escurrimiento, produciendo un reacomodamiento de toda la superficie libre.

3.3 ESCENARIOS DE CALIBRACION

Como primeros tres escenarios de calibración, denominados E01, E02 y E03, se seleccionaron tres días particulares para los cuales se dieron aproximadamente el caudal medio (15.000 m³/s), un caudal bajo (alrededor de 10.000 m³/s, obtenido como el valor medio menos la desviación estándar) y uno alto (alrededor de 20.000 m³/s, obtenido como el valor medio más la desviación estándar). El resto de los escenarios corresponden a los días en que se efectuaron las mediciones de los perfiles de velocidades: E04 para el Corte 1; E05 para los Cortes 10, 11 y 12; E06 para los Cortes 3 y 4; E07 para los Cortes 5 y 6; E08 para los Cortes 7, 8 y 9; E09 para el Corte 2. El Corte 12 está ubicado fuera de los límites de la simulación, es decir aguas arriba de Garupá.

En la Tabla 3.3.1 se indican los datos hidrométricos correspondientes a los escenarios.

Tabla 3.3.1 Escenarios de calibración

Escenario	Fecha	Caudal Ingresante (m ³ /s)	Caudal BAC (m ³ /s)	Nivel BP (m ³ /s)
E01	07/Ago/2001	10.007	1.533	75,63
E02	11/Feb/2002	15.111	2.223	75,63
E03	31/Ene/2002	19.795	6.980	75,74
E04	19/Sep/2001	9.015	1.534	75,66
E05	20/Sep/2001	9.438	1.535	75,67
E06	31/Oct/2001	10.752	1.504	75,03
E07	01/Nov/2001	11.203	1.499	75,25
E08	02/Nov/2001	11.077	1.500	75,29
E09	08/May/2002	11.833	1.535	75,60

3.4 RESULTADOS

Para la calibración no fue necesario zonificar el coeficiente de rugosidad de Manning, adoptándose finalmente un valor uniforme de 0,020. En la figura 3.4.1 se muestra la batimetría final resultante del proceso de calibración.

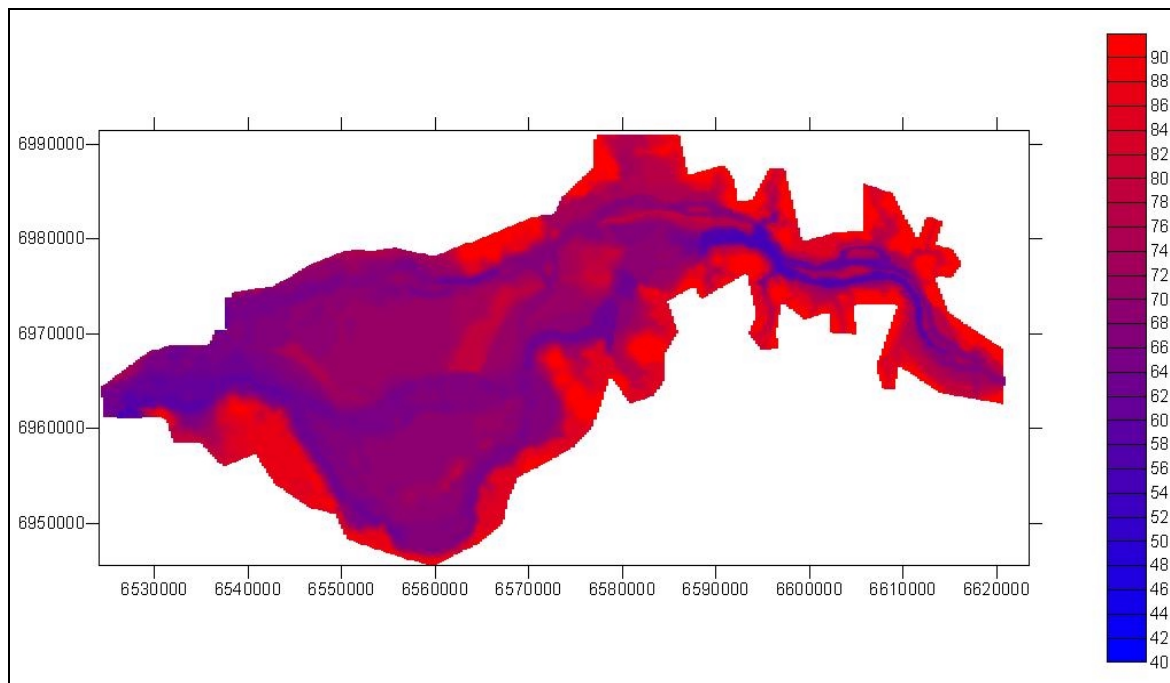


Figura 3.4.1 Batimetría final

La figura 3.4.2 muestra el perfil del pelo de agua de acuerdo al modelo para los tres primeros escenarios, donde se observa el grado de acuerdo con el correspondiente nivel medido en Posadas. Esta diferencia se presenta, además, en la Tabla 3.4.1. Se observa que el modelo tiende a sobreestimar para caudales bajos y a subestimar para caudales medios y altos. No resultó posible corregir estas desviaciones, más allá de lo mostrado, al mismo tiempo.

Tabla 3.4.1 Acuerdo entre niveles medidos y calculados en Posadas

Escenario	Caudal (m ³ /s)	Nivel Medido (m)	Nivel Calculado (m)	Diferencia (cm)
E01	10.000	76,32	76,43	+11
E02	15.000	76,86	76,84	-2
E03	20.000	77,31	77,28	-3

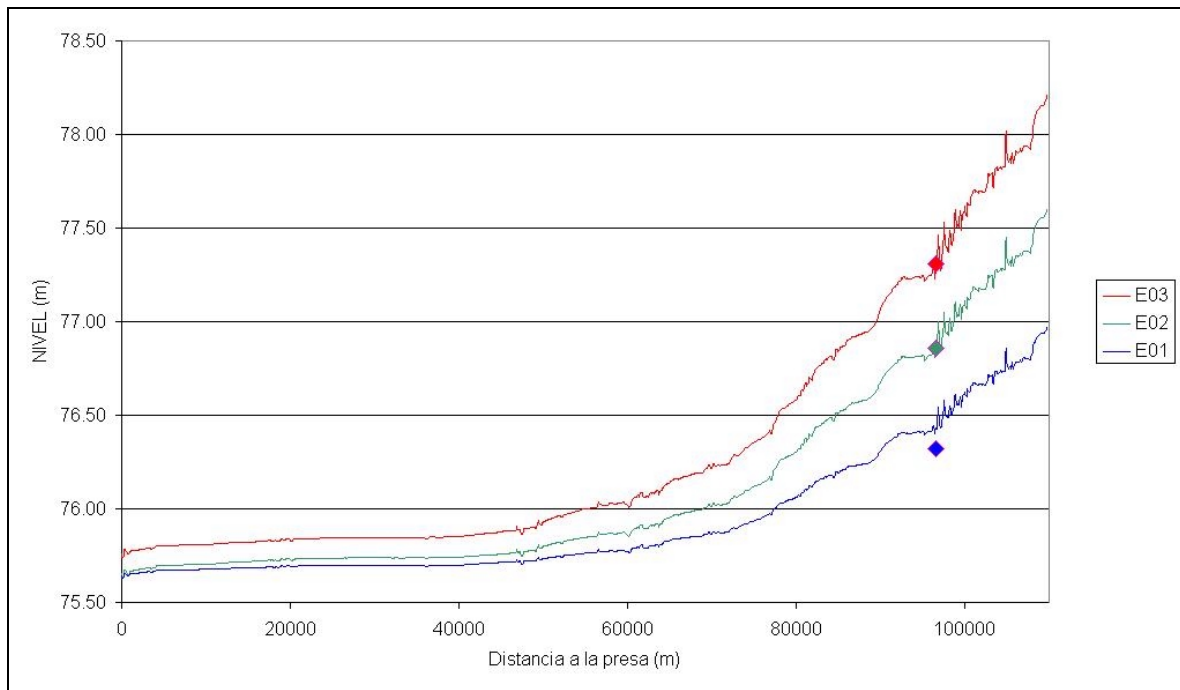


Figura 3.4.2 *Perfiles del pelo de agua para escenarios de calibración*

En las Figuras 3.4.3 a 3.4.13 se presentan los perfiles de velocidades medidos y calculados para los escenarios restantes. Se observa un acuerdo global satisfactorio, tanto en módulo como en dirección, para las zona de descarga (cortes 1 y 2) y de transición (cortes 3 a 7). En la zona fluvial (cortes 8 a 11) el acuerdo también es bueno en términos generales, aunque la modulación de la intensidad es más suave y continua en el modelo que en la medición.

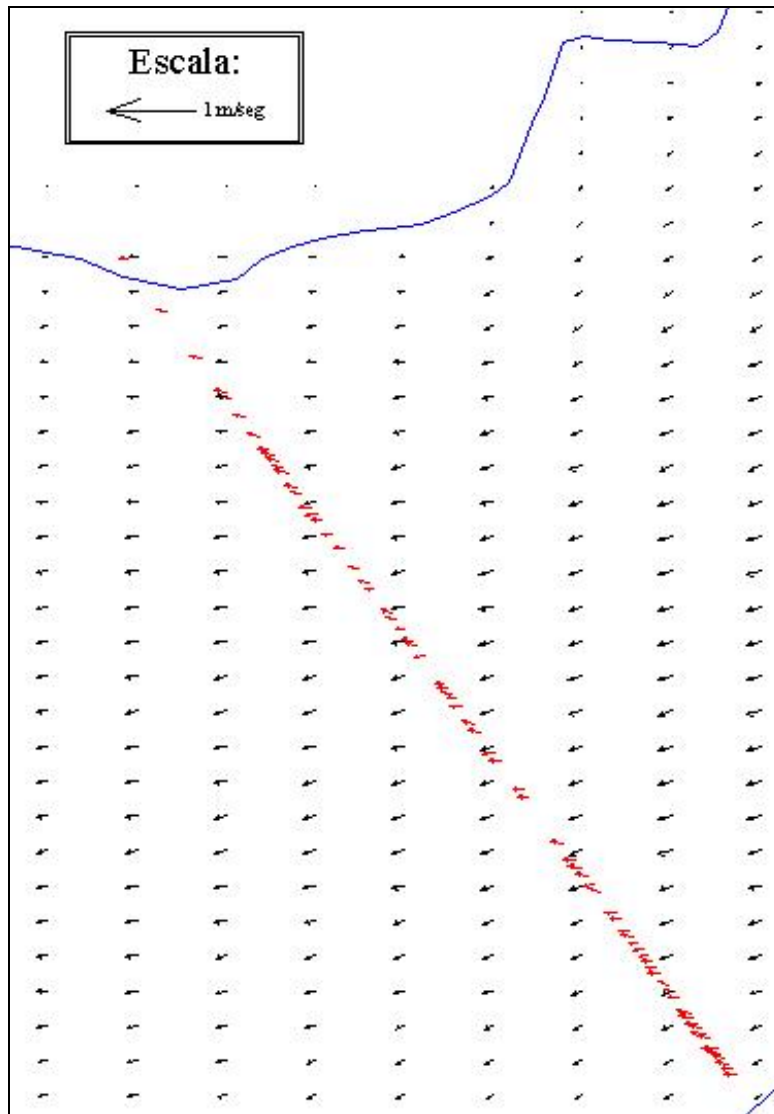


Figura 3.4.3 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 1 (E04)

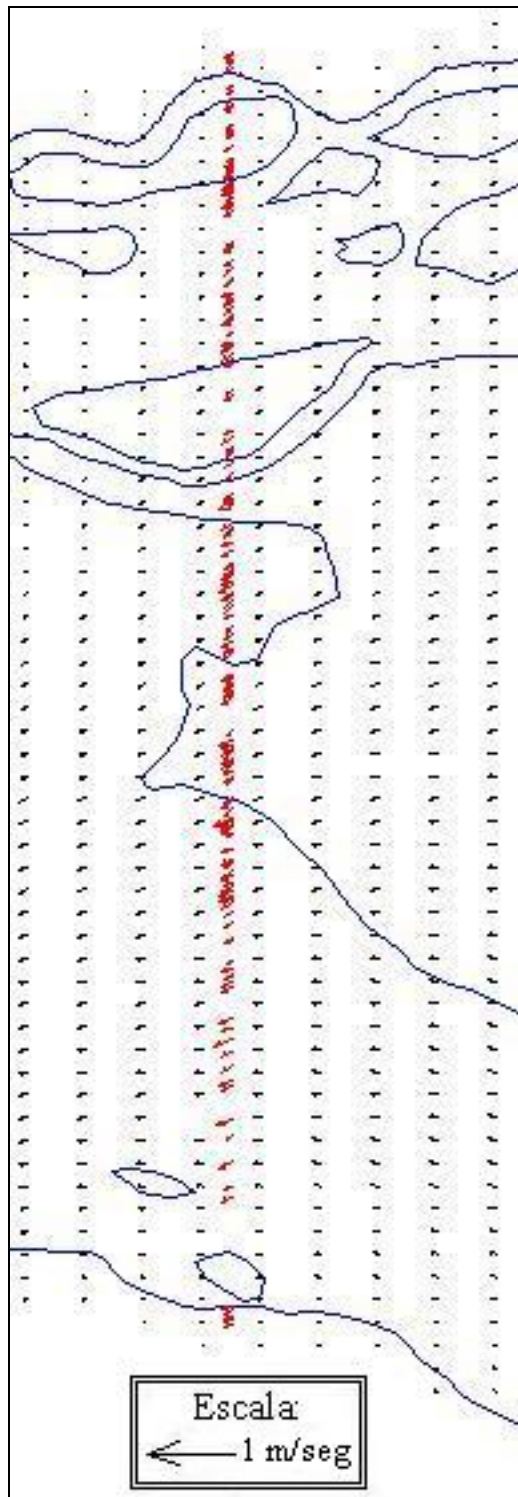


Figura 3.4.4 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 2 (E09)

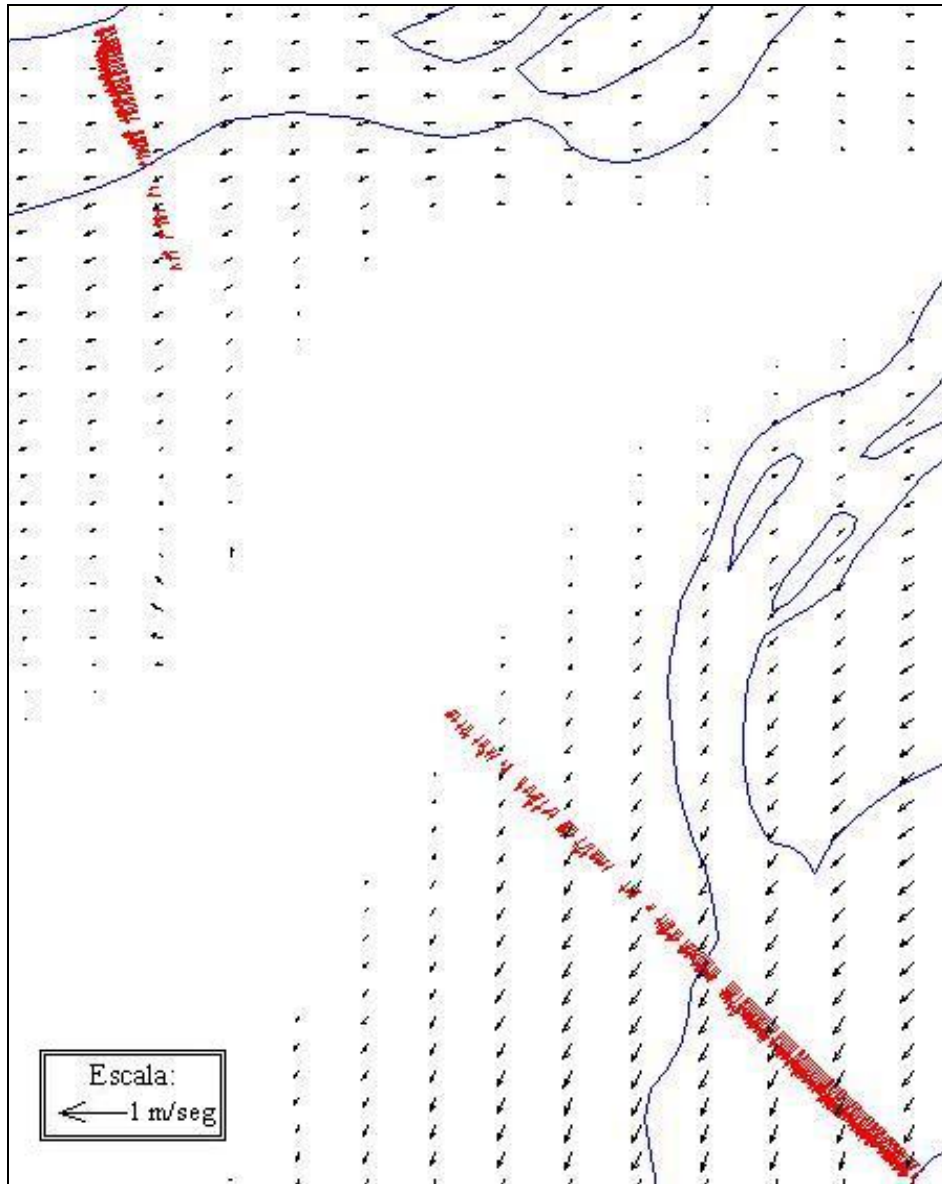


Figura 3.4.5 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 3 (E06)

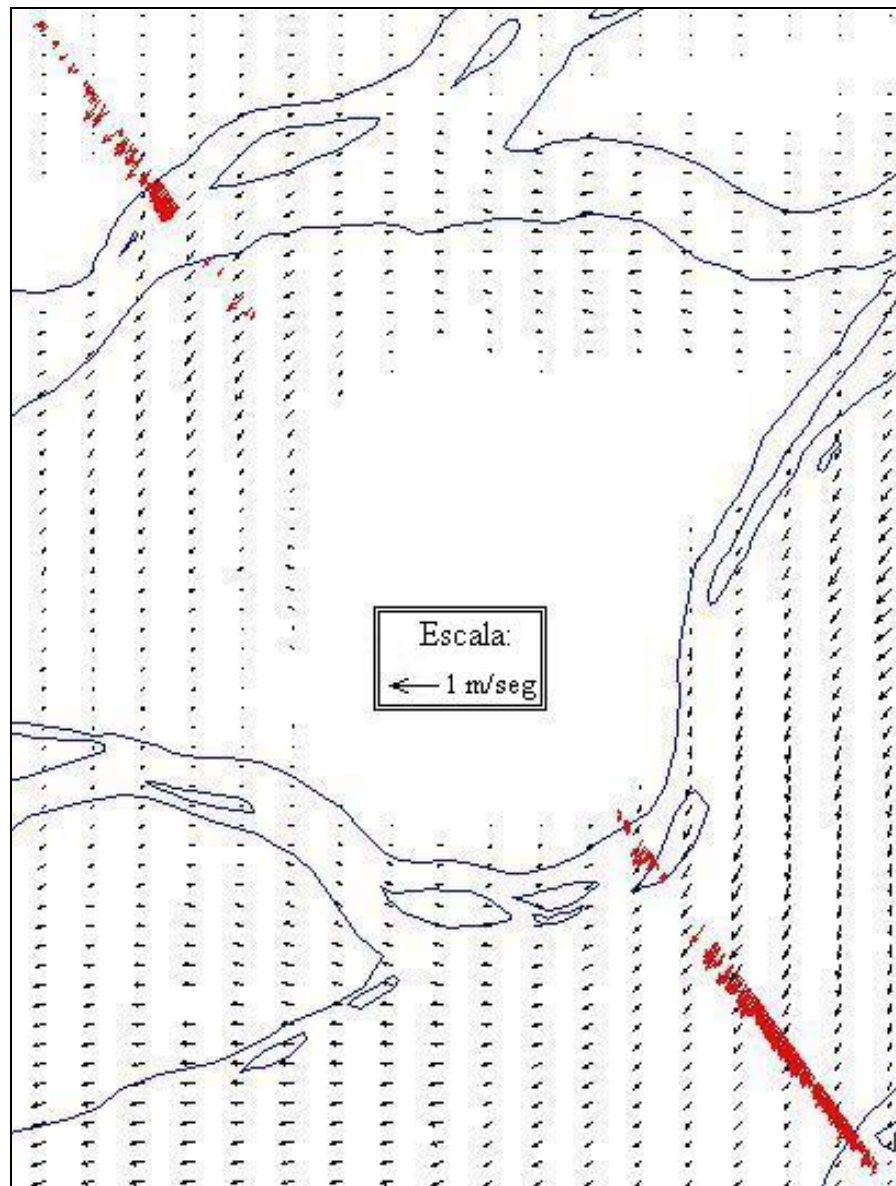


Figura 3.4.6 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 4 (E06)

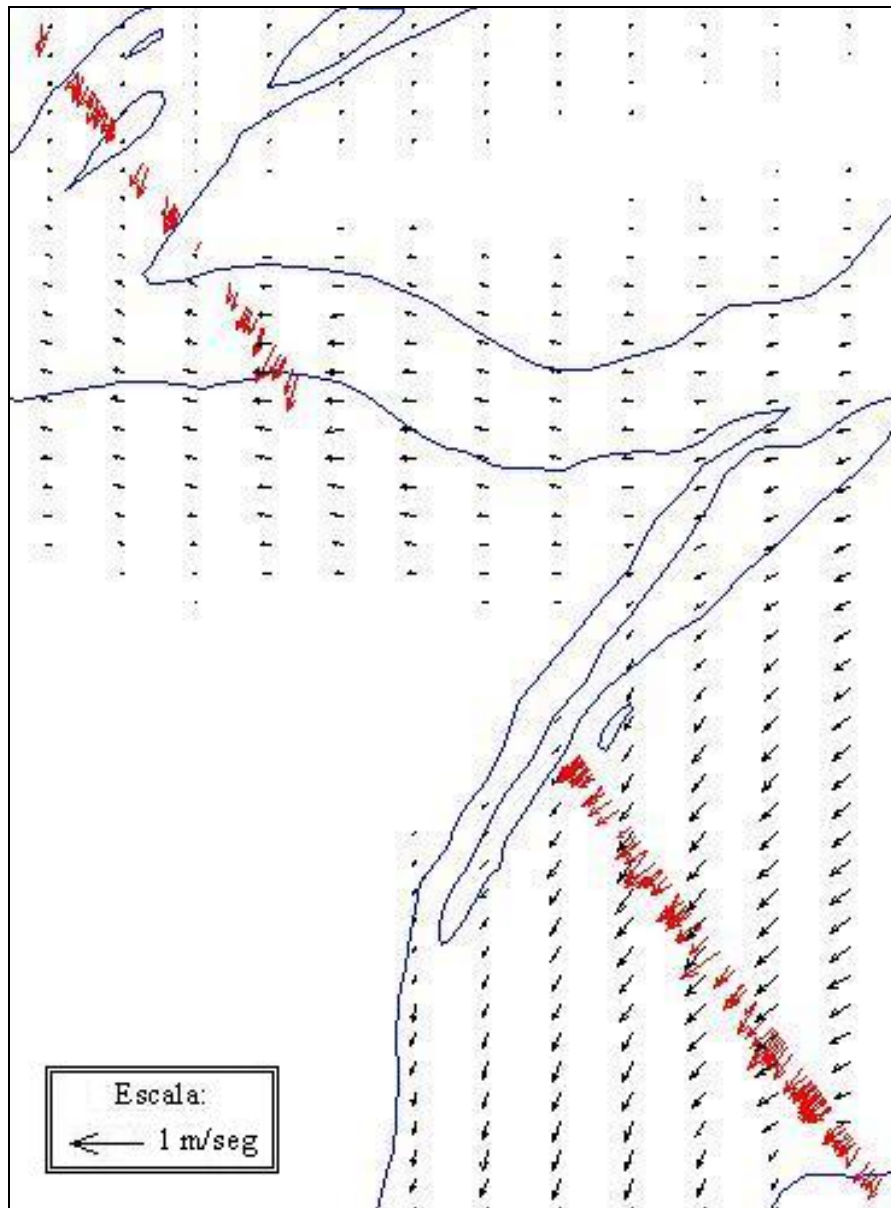


Figura 3.4.7 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 5 (E07)

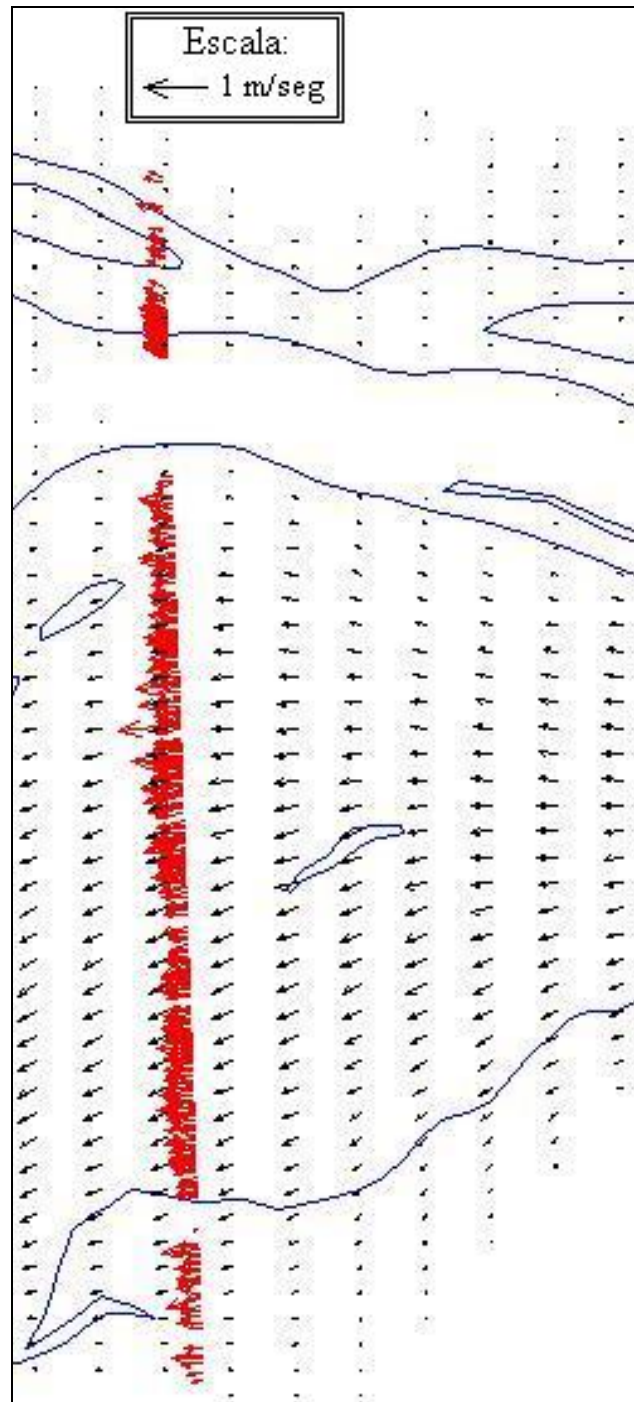


Figura 3.4.8 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 6 (E07)

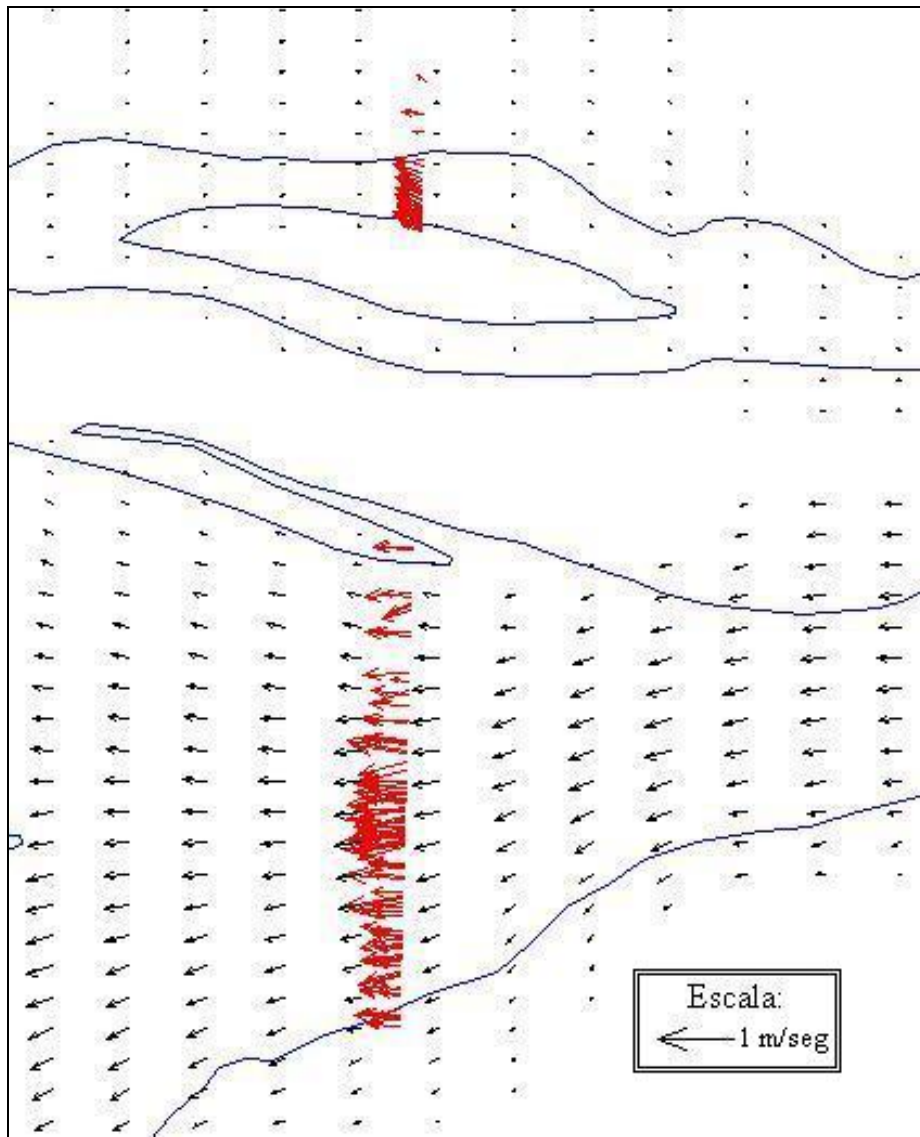


Figura 3.4.9 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 7 (E08)

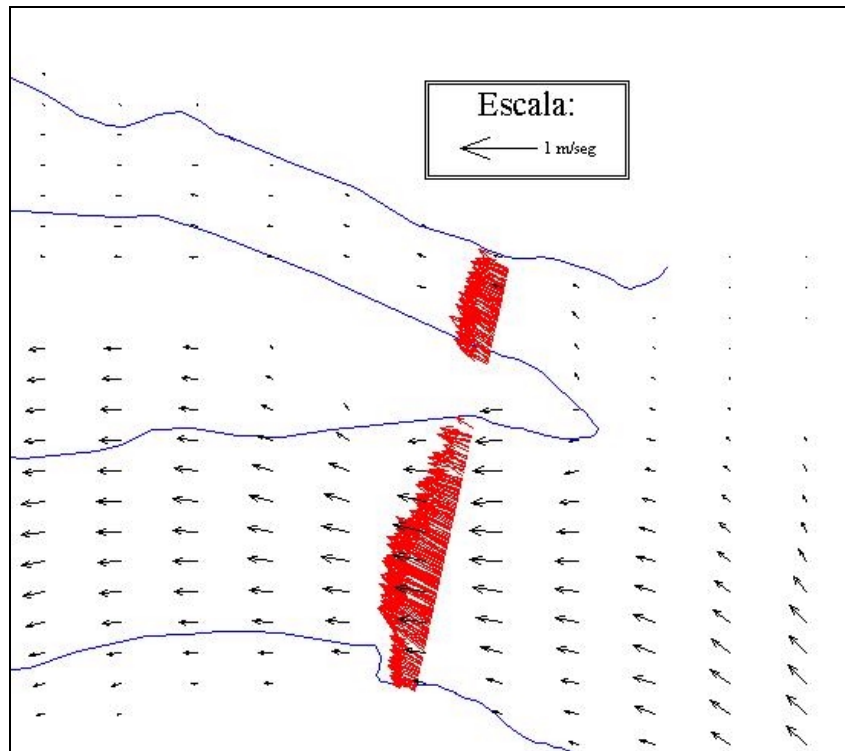


Figura 3.4.10 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 8 (E08)

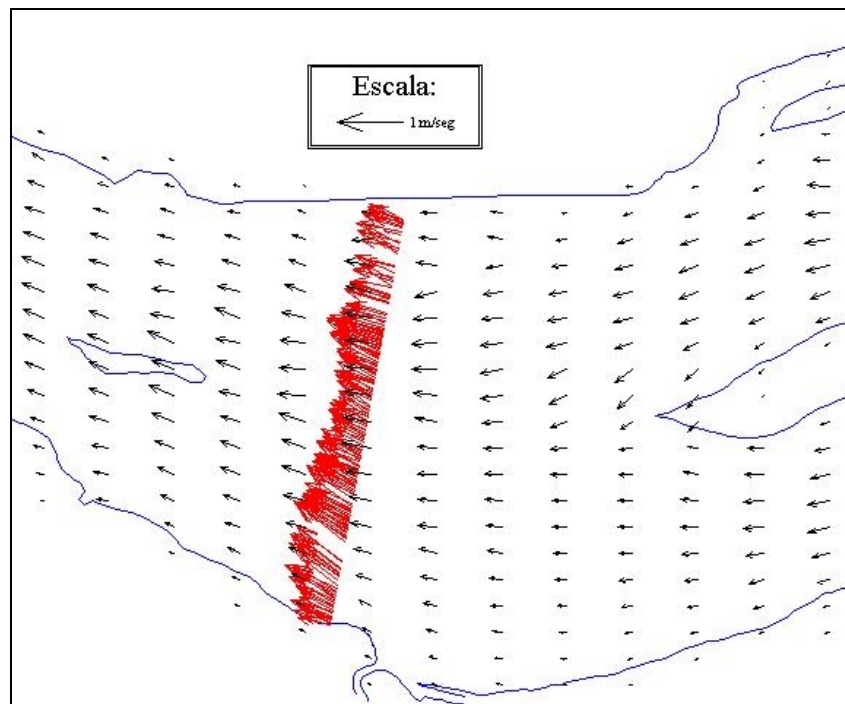


Figura 3.4.11 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 9 (E08)

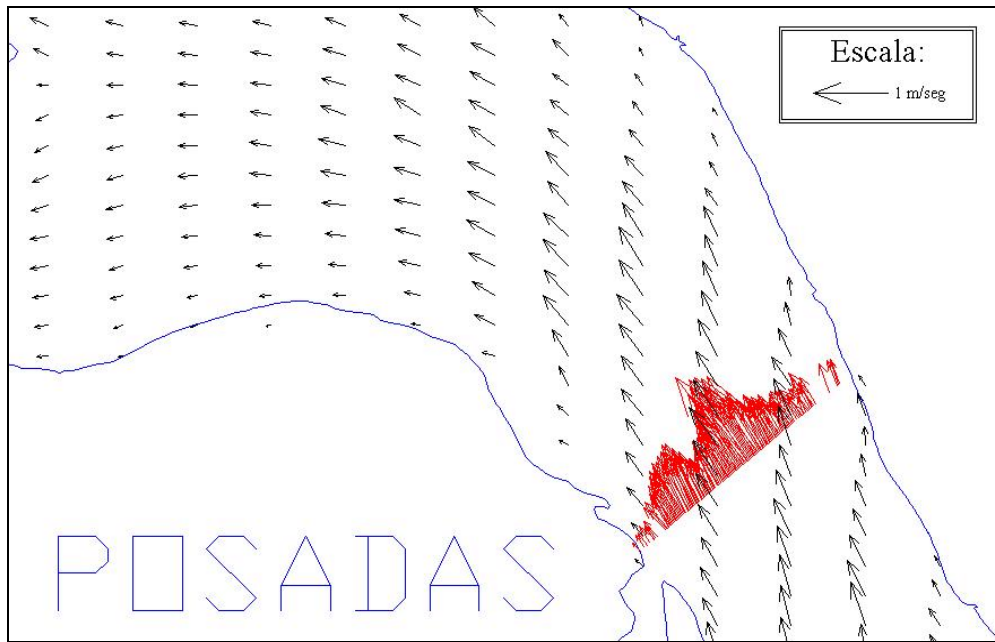


Figura 3.4.12 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 10 (E05)

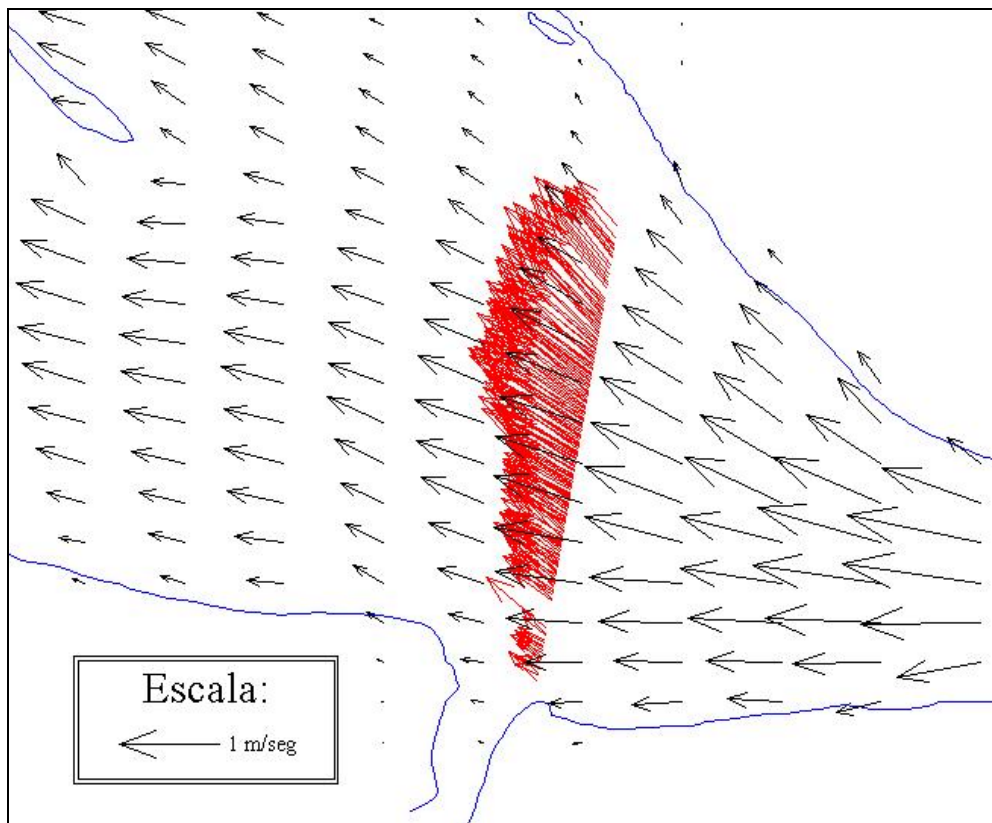


Figura 3.4.13 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 11 (E05)

3.5 VALIDACION

Como una suerte de validación del modelo, se efectuó una corrida prolongada en régimen impermanente (simulación dinámica). Se tomó el intervalo de tiempo comprendido entre el 15/Dic/2001 y el 11/Mar/2002, es decir unos 87 días de simulación. La figura 3.5.1 muestra la comparación entre las series temporales de los niveles calculados y medidos, observándose un acuerdo general satisfactorio. Las diferencias caen dentro del margen establecido en la calibración.

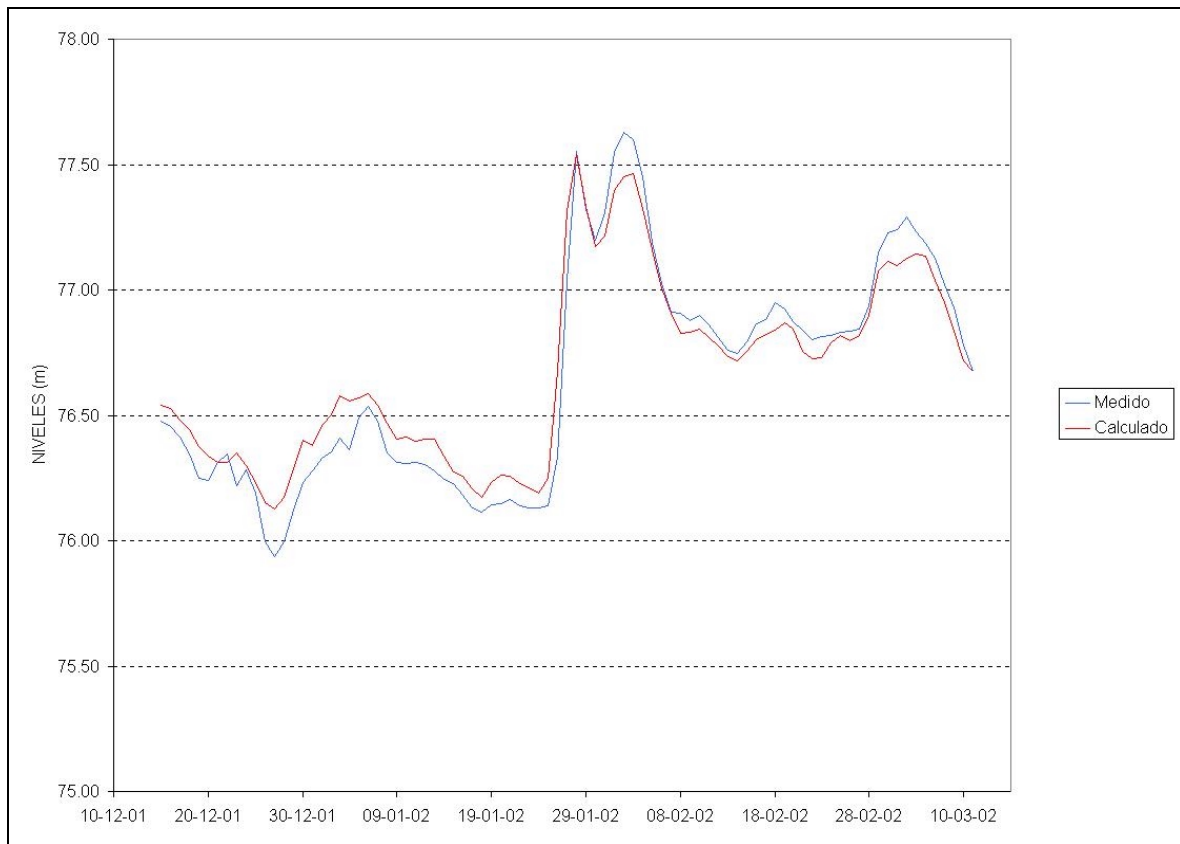


Figura 3.5.1 Comparación de niveles medidos y calculados en Posadas

4 EXPLOTACION DEL MODELO

4.1 SITUACION PRESENTE

En la figura 4.1.1 se muestran los campos de velocidades para el caudal medio del río en la situación presente, de acuerdo al modelo. Se observa la disminución gradual de la velocidad al pasar desde la zona fluvial hacia la lacustre, y la recuperación cercana a los vertederos.

A partir de ese campo se construyeron los tubos de flujo (de 1000 m³/s), que se presentan en la figura 4.1.2. Se observa la concentración que se da sobre el Brazo Principal, indicativa del relativamente alto caudal que transporta. También se ve el trasvase que se produce desde el Brazo Aña-Cuá hacia el Vertedero del Brazo Principal. La figura 4.1.3 muestra las zonas de igual velocidad, lo cual complementa a la figura anterior.

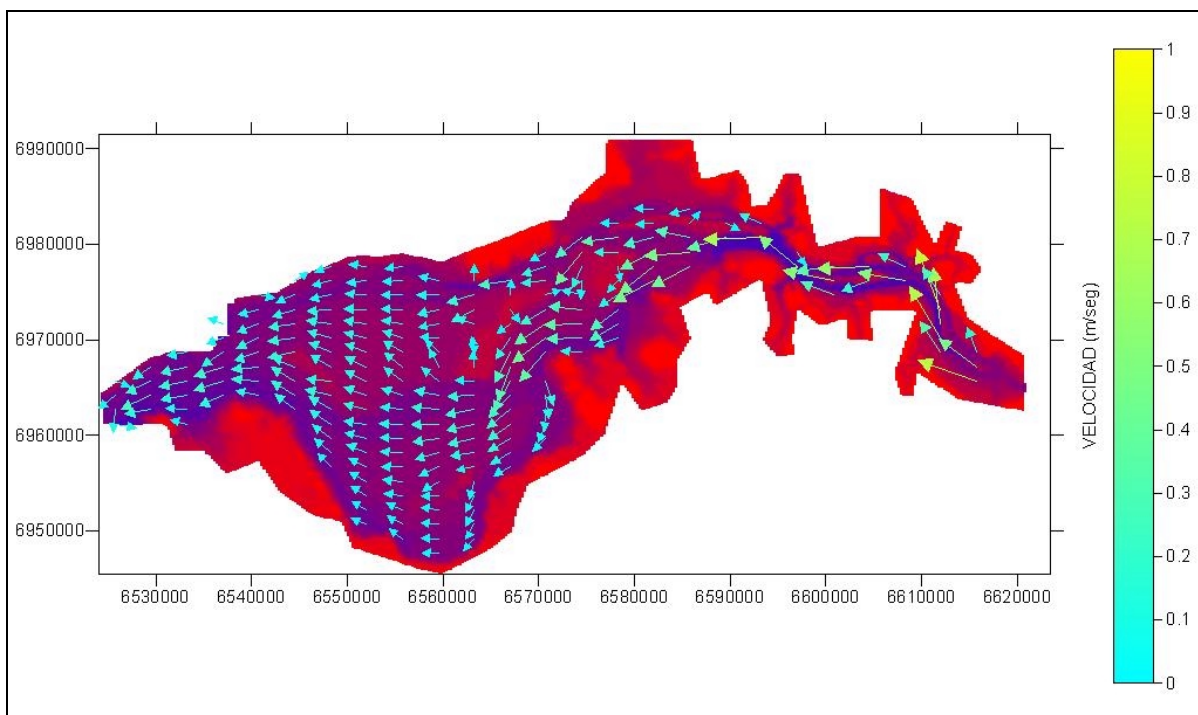


Figura 4.1.1 Campo de velocidades para caudal medio y cota 76 m

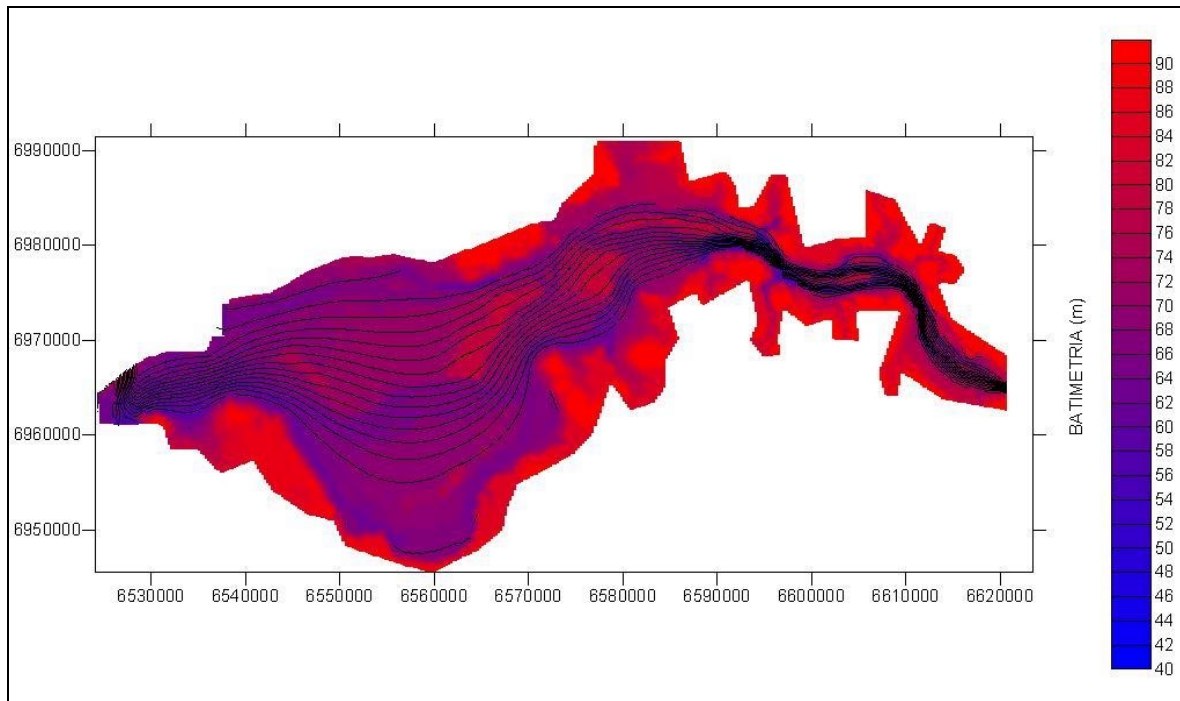


Figura 4.1.2 Tubos de flujo de 1.000 m³/seg para el caudal medio y cota 76 m

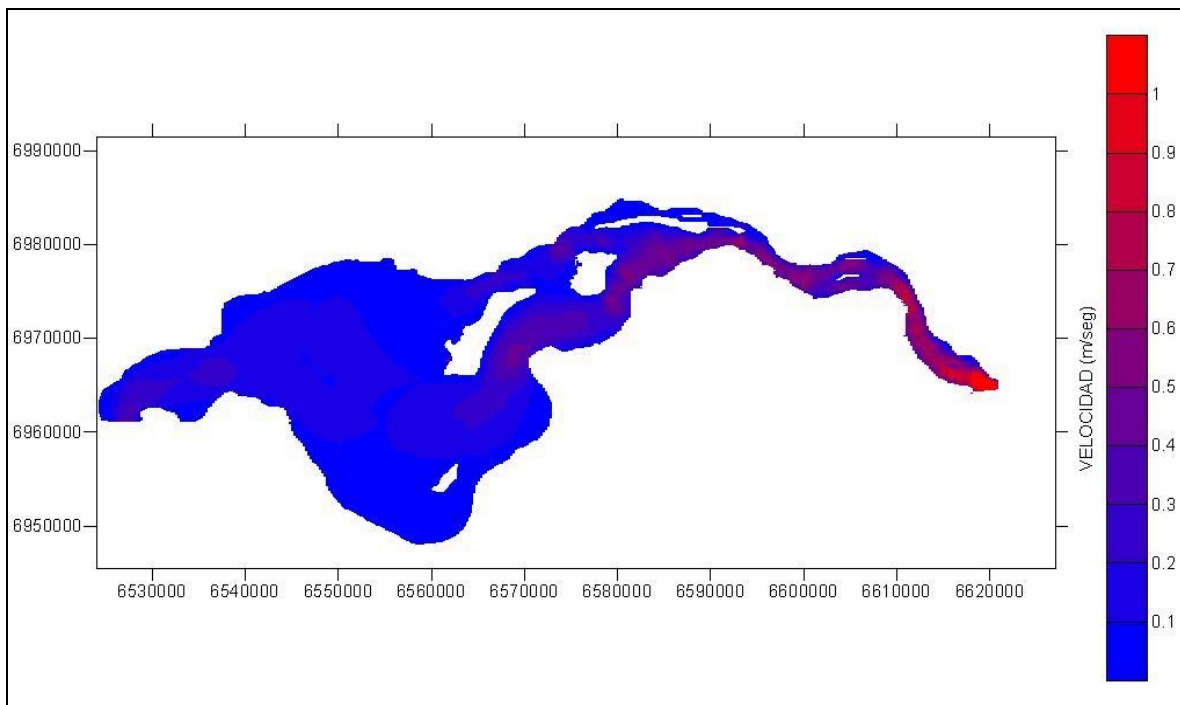


Figura 4.1.3 Zonas de igual velocidad para caudal medio y cota 76 m

4.2 SITUACION FUTURA

A título de simple ensayo numérico, se efectuó una corrida para el caudal medio del río a situación futura de cota 83 m, manteniendo el mismo coeficiente de rugosidad para la nueva zona inundada.

En las figuras 4.2.1 a 4.2.3 se presentan el campo de velocidades, los tubos de flujo y las zonas de igual velocidad. Comparando con la situación presente, se observa una pronunciada suavización de los tubos de flujo y una disminución de la concentración de tubos en el Brazo Principal, lo que también se manifiesta como perfiles de velocidades más uniformes.

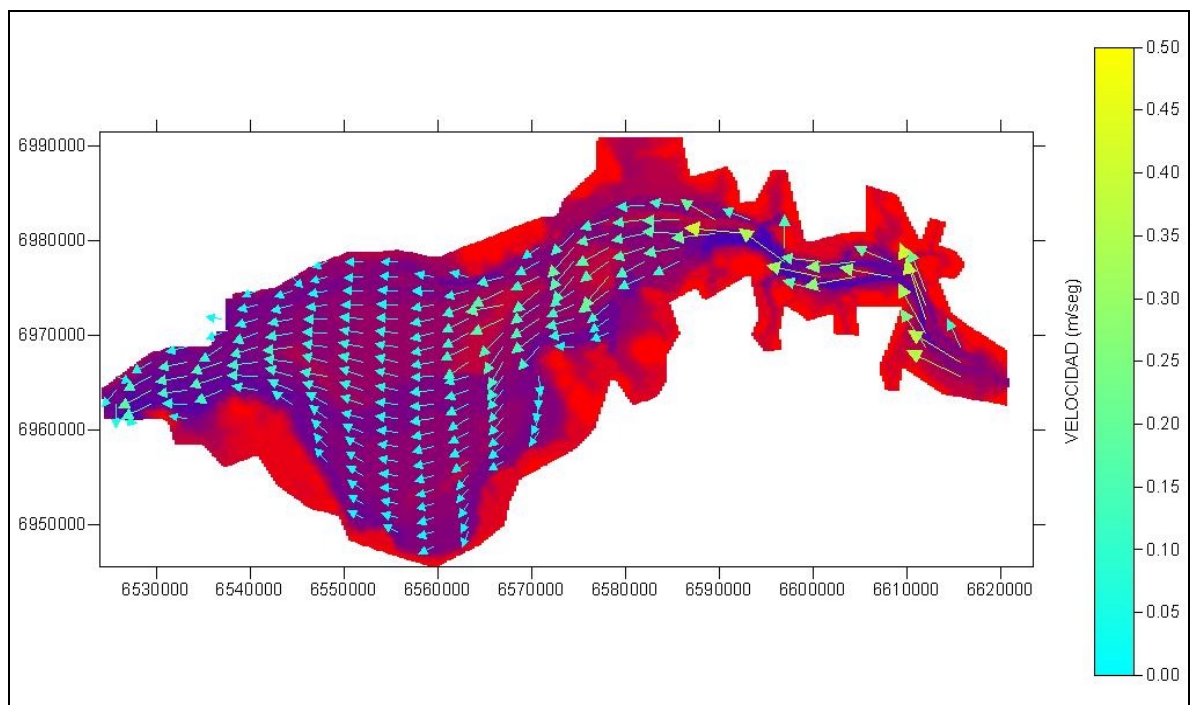


Figura 4.2.1 Campo de velocidades para caudal medio y cota 83 m

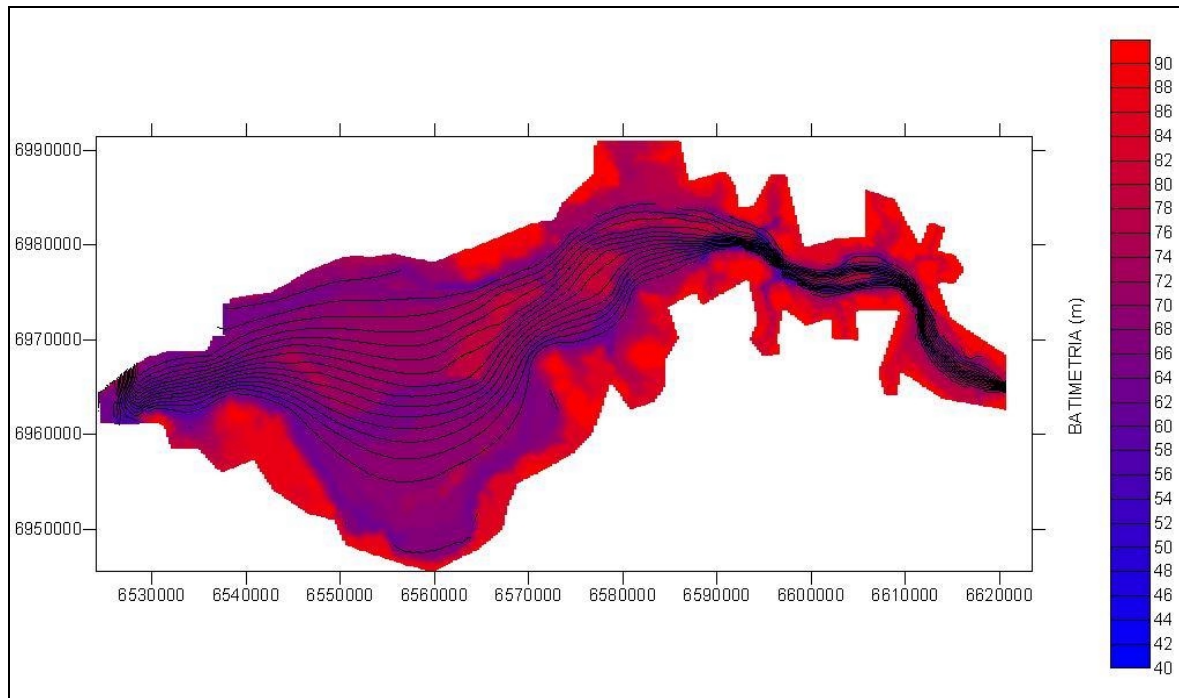


Figura 4.2.2 Tubos de flujo de 1.000 m³/seg para el caudal medio y cota 83 m

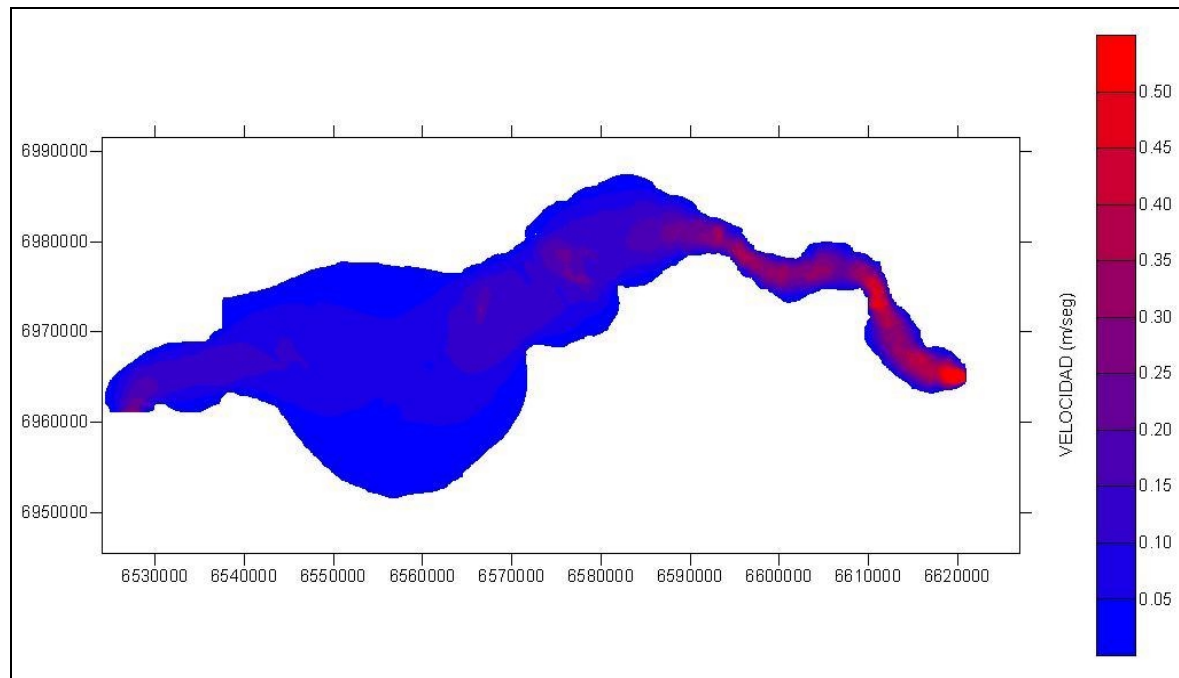


Figura 4.2.3 Zonas de igual velocidad para caudal medio y cota 83 m

5 CONCLUSIONES

Como producto del estudio, se dispone de un modelo bidimensional de corrientes del embalse de Yacyretá, que se denominará *EBY-INA I*, capaz de simular con una precisión adecuada tanto la distribución de niveles como la de velocidades en el embalse.

Durante el estudio se verificó la relativamente alta dependencia que los resultados muestran al modelo numérico del terreno. Esto resalta la importancia de contar con un relevamiento batimétrico de base preciso para todo el embalse, con periódicas actualizaciones.

De los estudios de sedimentación precedentes, se dispuso de perfiles de velocidades en secciones transversales, concentrados aguas arriba en la zona fluvial y de transición al embalse y aguas abajo en las cercanías de los vertederos. Se plantea como próxima etapa la efectivización de una nueva campaña de mediciones de velocidad, incorporando perfiles en la zona del embalse propiamente dicho. Estas mediciones deberían encararse con un criterio de mayor precisión en el dato local. Por ello, también deberían efectuarse verificaciones en los perfiles relevados en el estudio precedente.

ANEXO I

SOFTWARE HIDROBID II

El software HIDROBID II apunta a la simulación matemática de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre, y es apto para la simulación de escurrimientos en régimen impermanente en cuencos de topografía arbitraria. El modelo admite tres tipos de contornos: costa, de entrada y de salida. La geometría de la costa puede ser arbitraria y el dominio de cálculo sobre el que se extiende la malla puede ser múltiplemente conexo (es decir se admiten islas).

El modelo hidrodinámico está basado en una formulación bidimensional, integrada en la vertical, de las ecuaciones de Navier-Stokes, bajo la hipótesis de aguas poco profundas y flujo turbulento, Abbott (1979). Las ecuaciones resultantes que gobiernan la hidrodinámica son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} - fvh + gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_0) + \frac{1}{\rho}(\tau_{fx} - \tau_{sx}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + fuh + gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_0) + \frac{1}{\rho}(\tau_{fy} - \tau_{sy}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} = 0$$

donde t es el tiempo, x e y las coordenadas horizontales, u y v las respectivas componentes de la velocidad media vertical, h la altura de la superficie libre, z_0 un nivel de referencia, f el parámetro geotrófico, g la gravedad, ρ la densidad, τ_{fx} y τ_{fy} las componentes de la tensión de corte contra el fondo, τ_{sx} y τ_{sy} las componentes de la tensión de corte contra la superficie libre (viento) y τ_{xx} , τ_{xy} y τ_{yy} las tensiones efectivas (debidas a contribuciones viscosas, turbulentas y convectivas).

El esquema numérico utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales anteriores desarrollado por Menéndez (1985), está basado en las diferencias finitas y se trata del método de las direcciones alternadas. El esquema consiste en una malla de discretización espacial alternada, debido a que las variables h , u y v están centradas en distintos puntos, lo que es óptimo para aplicar las condiciones de borde. El método es implícito, es decir que las incógnitas no se pueden despejar, pero tiene ventajas como la estabilidad. En el primer paso fraccionario los términos implícitos corresponden a las derivadas según x y los explícitos a las derivadas según y . Esto se invierte en el segundo paso fraccionario.

La elección de un método implícito es conveniente a fin de evitar la restricción impuesta por la condición de Courant, $\Delta t < \frac{\Delta x}{u \pm (g \cdot h)^{1/2}}$, a los métodos explícitos, donde Δt y Δx son pasos temporal y espacial de la grilla respectivamente, y $\Delta x/\Delta t$ la denominada velocidad numérica.

REFERENCIAS

1. Abbott, M., 1979, *Computational Hydraulics*, Pitman, Boston.
2. EBY/INRS-ETA, 2002, *Modelo Hidrodinámico Bidimensional del Sistema Fluvial del Río Paraná anexo a la zona del Complejo Hidroeléctrico Yacyretá*.
3. Menéndez, A.N., 1985, *Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*, Informe interno LHA-INCYTH-S5-016-85, Ezeiza.
4. Menéndez, A.N., 1990, “Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos”, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, Vol. 6, 1.
5. Morillo, S., Tarela, P.A., 2002, *Simulación numérica de la estratificación térmica en el embalse de Yacyretá*, Informe INA-LHA 1.131 - 002 – 02 para la EBY.
6. NHC, EVARSA, Gregory L. Morris & Assoc., 2002, *Estudios de sedimentación para actualizar la definición de la vida útil del embalse del Complejo Hidroeléctrico Yacyretá*, Informe para la EBY.