

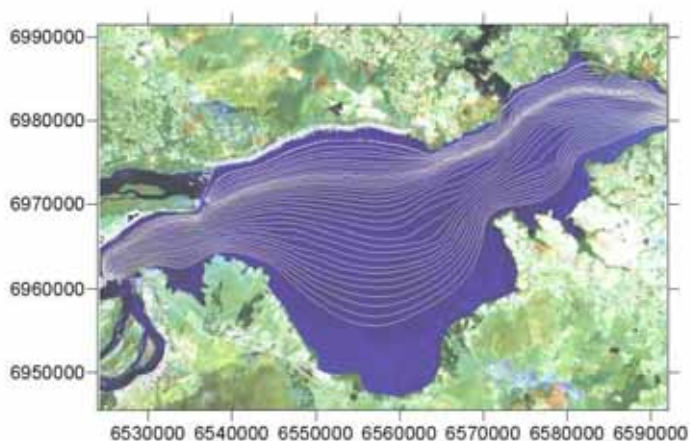


INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
REPÚBLICA ARGENTINA

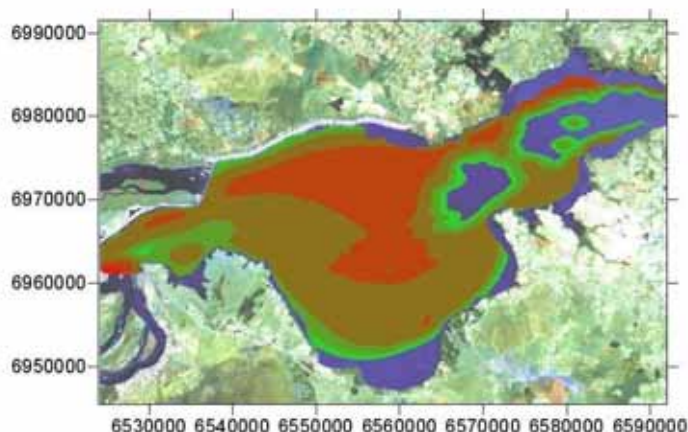


**PROYECTO “CALIDAD DEL AGUA
EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ Y SUS AFLUENTES”**

MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ



$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + fuh + gh \frac{\partial}{\partial y} (h + z_b) + \frac{1}{\rho} (\tau_B - \tau_g) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_g)}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_B)}{\partial y} = 0$$



*Proyecto LHA 224
Informe LHA 04-225-04
Ezeiza, Mayo de 2004*

LABORATORIO DE HIDRÁULICA

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. ÁLVAREZ TAGLIABUE

Patricia JAIME

Julio TORCHIO

INFORME PRODUCIDO POR

Christian U. ÁLVAREZ TAGLIABUE

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

RESUMEN

Se presenta la implementación y calibración de un modelo numérico de transporte de sólidos suspendidos para el embalse de Yacyretá. Este se motoriza con los campos de velocidades provistos por el modelo hidrodinámico EBY-INA I. El modelo utiliza un software basado en una técnica de tipo lagrangiano, que evita la difusión numérica típica de los métodos eulerianos. Para su calibración se utilizan los muestreos de concentración de sólidos suspendidos colectados por la EBY, los cuales son sometidos a un elaborado proceso de filtrado para determinar sus tendencias de evolución anual. El modelo se explota para obtener las distribuciones de sólidos suspendidos y de tasas de sedimentación en el embalse para distintos escenarios de caudal y para la cota actual y futura del embalse.

Descriptor Temático: Modelación matemática, modelación sedimentológica, simulación numérica, embalse, lago, sólidos en suspensión, sedimentos.

Descriptor Institucional: Entidad Binacional Yacyretá

Descriptor Geográfico: Misiones, Posadas, Encarnación, República Argentina, República del Paraguay, Río Paraná.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	5
2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	6
2.1 TÉCNICA DE SIMULACIÓN Y SOFTWARE.....	6
2.2 DOMINIO DEL MODELO.....	6
2.3 BASE DE DATOS DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	7
2.4 CAUDALES SÓLIDOS	9
2.5 APOORTE MARGINAL.....	11
2.6 SERIES FILTRADAS.....	12
2.7 DISCRETIZACIÓN DEL TRANSPORTE	19
3 CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	21
3.1 ESCENARIOS DE CALIBRACIÓN	21
3.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	22
4 EXPLOTACIÓN DEL MODELO.....	27
4.1 PRODUCTOS.....	27
4.2 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS A COTA 76.....	27
4.3 ZONAS DE SEDIMENTACIÓN A COTA 76	29
4.4 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS A COTA 83.....	31
4.5 ZONAS DE SEDIMENTACIÓN A COTA 83	33
4.6 ZONIFICACIÓN DE SEDIMENTOS DE FONDO	35
4.7 COMPARACIÓN CON RESULTADOS PREVIOS.....	37
5 CONCLUSIONES	39
ANEXO I.....	40
REFERENCIAS	53

1 INTRODUCCIÓN

Si bien el mecanismo primario de transporte de contaminantes en el embalse de Yacyretá son las corrientes de agua, los sólidos suspendidos constituyen uno de los vehículos fundamentales de ese transporte, a través de su capacidad de sorber muchos de esos elementos. Como una parte de los sólidos suspendidos decanta en el embalse, su seguimiento es fundamental para determinar, entonces, el destino de esos contaminantes.

En el presente Informe se describe la implementación y calibración de un modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse de Yacyretá. Este se motoriza a partir de los campos de corrientes de agua provistos por el modelo hidrodinámico global *EBY-INA I*.

2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

2.1 TÉCNICA DE SIMULACIÓN Y SOFTWARE

El modelo sedimentológico está basado en el software Manchas (Menéndez, 1986), el cual es apto para modelar la dispersión de contaminantes en una región localizada de aguas poco profundas, en base a una técnica lagrangeana de seguimiento de manchas. Las manchas son distribuciones bidimensionales de tipo gaussiano, que representan la concentración del contaminante. Durante su avance, advectadas por la corriente, las manchas sufren rotaciones y deformaciones debido a los gradientes de velocidades, difusión debido a la turbulencia, y decaimiento debido a la sedimentación. La sedimentación depende del tamaño medio de las partículas, que determinan su velocidad de caída. De la superposición de todas las manchas surge la distribución espacial de concentración. En el Apéndice A se incluye una descripción más detallada de la técnica (Carreras & Menéndez, 1990).

2.2 DOMINIO DEL MODELO

Las manchas se transportan dentro del dominio del modelo hidrodinámico global del embalse de Yacyretá *EBY-INA I*, que se extiende entre la sección Garupá-Candelaria y la presa.

Ahora bien, dado que en los ensayos preliminares se verificó que a cota actual prácticamente no existe sedimentación en la parte fluvial del embalse, la inyección de sólidos suspendidos se realizó al comienzo de la zona de transición, donde se produce el primer ensanchamiento del embalse, tal como se indica en la figura 2.2.1. De esta manera no sólo se redujeron los tiempos de cómputo, sino que se dispuso de mayor control para distribuir adecuadamente las manchas representativas de la distribución lateral de concentración de sólidos suspendidos de modo de cubrir todo el embalse. El análisis de la sedimentación en la zona no representada para cota 83 m se llevará a cabo con el modelo regional, en construcción.



Figura 2.2.1: Dominio del modelo de transporte de sólidos suspendidos

2.3 BASE DE DATOS DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

La EBY proveyó la base de datos de sólidos en suspensión en formato de planilla electrónica, dando la fecha de la medición, el nombre de la estación y la concentración de sólidos en suspensión en unidades de miligramos por litro (mg/l). En la figura 2.3.1 se observa la ubicación de las estaciones de medición y su denominación, en las cuales se efectúan, además, mediciones de los otros parámetros de calidad del agua.



Figura 2.3.1: Estaciones de monitoreo de calidad de agua

Como criterio de calibración del modelo de transporte de sólidos suspendidos se impondrá que éste satisfaga el balance global de masa de sólidos suspendidos, es decir que, impuesto el caudal sólido en la entrada del modelo de acuerdo a los registros, el caudal sólido a la salida sea similar al registrado. En consecuencia, es necesario calcular esos caudales sólidos a partir de los datos disponibles en las estaciones de entrada y de salida.

Las siguientes estaciones se seleccionaron como representativas de las condiciones de transporte de sólidos a la entrada y en las salidas del dominio de modelación:

- o Estaciones EI-1 MD, EI-1 C y EI-1 MI para la entrada del modelo en Garupá-Candelaria.
- o Estaciones E10 MI y EI 11 para la salida del modelo por el brazo principal (Central y Vertedero).
- o Estaciones EI 10 MD y EI 12 para la salida del modelo por el vertedero del brazo Aña Cuá.

En las figuras 2.3.2 a 2.3.4 se muestran los datos de concentración de sólidos suspendidos correspondientes a la entrada y a las salidas por el brazo principal y el Aña Cuá, respectivamente.

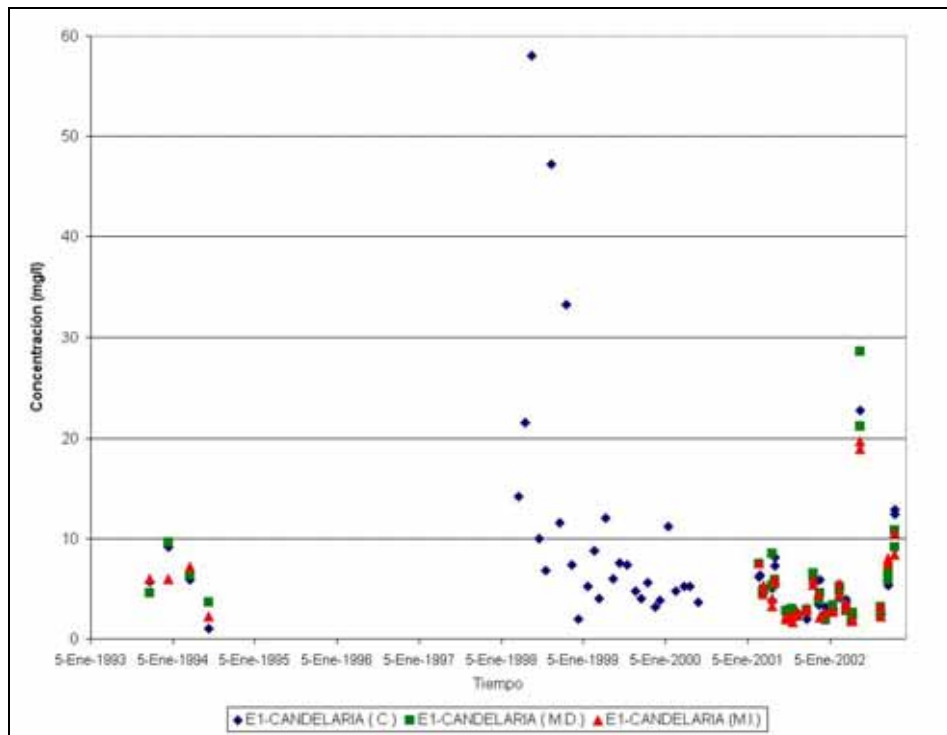


Figura 2.3.2: Concentración de sólidos suspendidos en Garupá-Candelaria

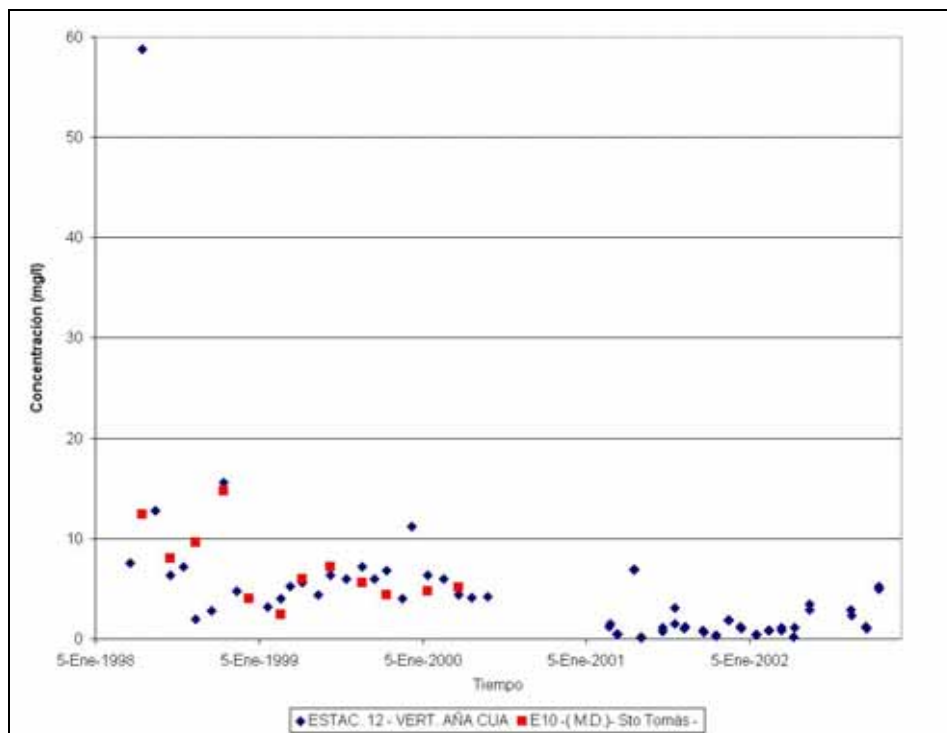


Figura 2.3.3: Concentración de sólidos suspendidos en la salida por el brazo principal

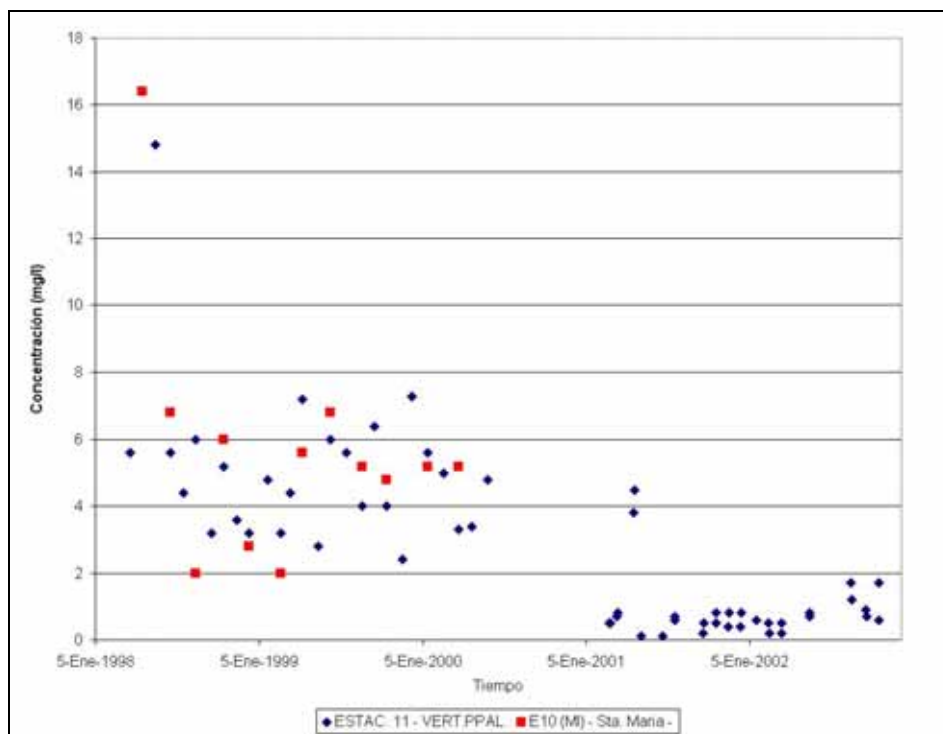


Figura 2.3.4: Concentración de sólidos suspendidos en la salida por el brazo Aña-Cuá

Los muestreos se realizaron con una frecuencia aproximadamente mensual, pero las series no son enteramente compatibles entre sí. Por ejemplo, los datos que corresponden a la entrada, en Garupá-Candelaria, se extienden entre el 23/09/93 y el 20/10/02, con una falta de datos en el período que va del 15/06/94 al 23/03/98 para la estación ubicada en el centro del río (EI-1 C - Candelaria) y del 15/06/94 al 28/02/01 para las estaciones ubicadas en las márgenes del río (EI-1 MI y EI-1 MD - Candelaria). Por su parte, los datos que corresponden a las salidas del modelo, en cambio, se extienden entre el 25/03/98 y el 24/10/02 para las estaciones EI 11 – vertedero principal y EI 12 – vertedero Aña Cuá, y entre el 25/03/98 y el 30/03/00 para las estaciones EI 10 MD – Sto. Tomás y EI 10 MI – Sta. María. Además, las mediciones en las distintas estaciones no son simultáneas.

2.4 CAUDALES SÓLIDOS

Los datos de concentración de sólidos suspendidos se combinaron con los registros de caudal líquido para determinar los caudales sólidos entrantes y salientes del dominio del modelo. Para llevar a cabo esta combinación fue necesario, primero, adoptar algunos criterios de selección y compatibilización de datos:

- Para la entrada del modelo en Garupá-Candelaria se tomó el promedio de las tres estaciones (EI-1 MI, EI-1 C, y EI-1 MD - Candelaria), cuando éstos existían (o el promedio de dos de ellas, si una faltaba), ya que las mediciones correspondían al mismo día.

- Como ventana de tiempo de trabajo se tomó desde el 23/03/98 al 24/10/02, lo que significó descartar datos de la entrada en Garupá-Candelaria.
- Para la salida del modelo sobre el brazo principal se tomó como serie de datos los que corresponden a la estación EI 11 – vertedero principal, por ser más extendidos en el tiempo y, además, no presentar gran disparidad en el intervalo de tiempo en que hay superposición con la estación EI 10 MI – Sta. María.
- Análogamente, para la salida del modelo sobre el brazo Aña Cuá se tomó como serie de datos los correspondientes a la estación EI 12 – vertedero Aña Cuá, por ser más extendidos en el tiempo y, además, no presentar gran disparidad en el intervalo de tiempo en que hay superposición con la estación EI 10 MD – Sto. Tomás.

Las concentraciones representativas en la entrada y las dos salidas del modelo fueron multiplicadas por los caudales líquidos correspondientes a las respectivas fechas de muestreo para obtener los caudales sólidos, los cuales se muestran en la figura 2.4.1, donde también se presenta el caudal líquido total como referencia.

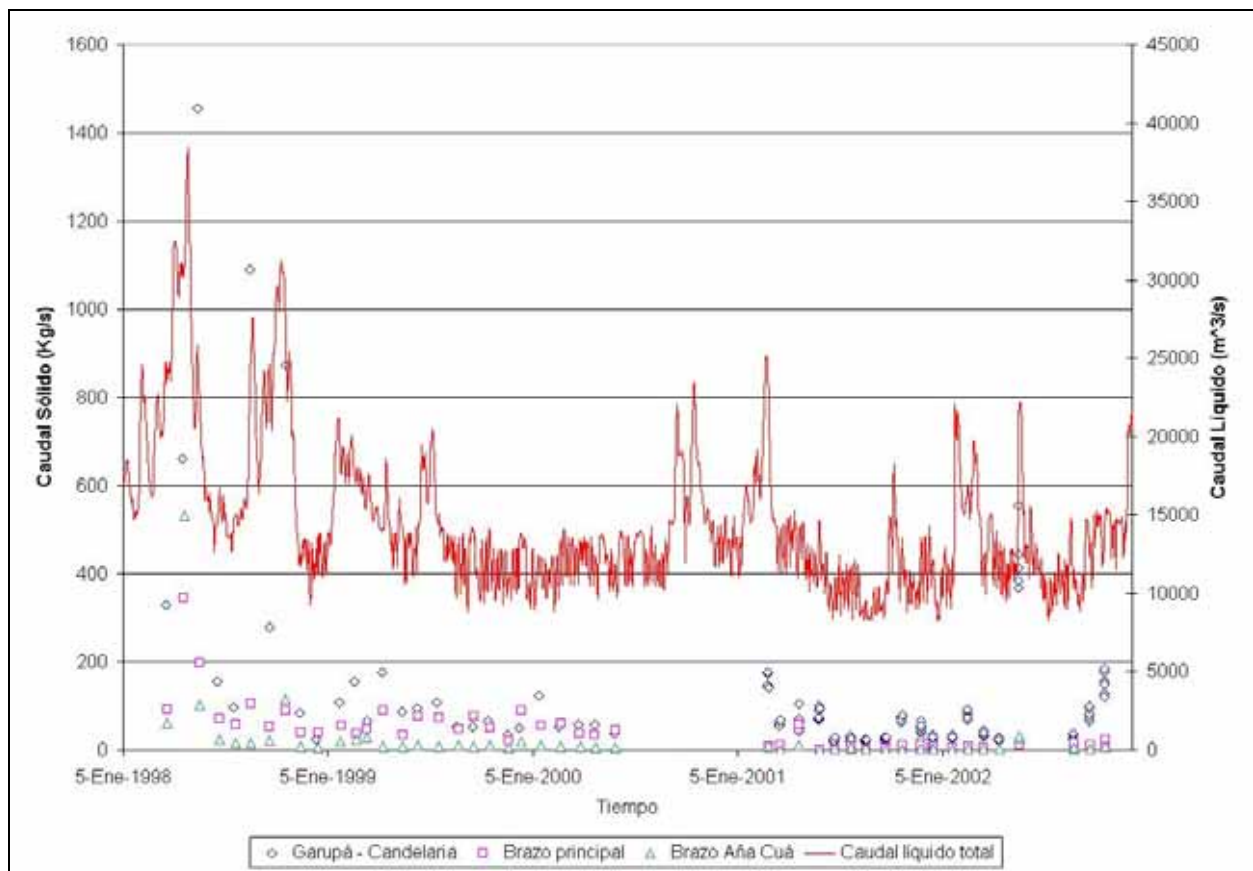


Figura 2.4.1: Caudales sólidos entrantes y salientes

La figura 2.4.2 muestra la correlación existente entre los caudales sólido y líquido ingresantes al modelo. Se observa que esta correlación es pobre, lo cual era de esperarse, ya que los factores determinantes de uno y otro no son los mismos. En efecto, mientras el caudal líquido está básicamente condicionado por las precipitaciones en la parte superior de la cuenca del alto Paraná, el caudal sólido lo está por las lluvias regionales que producen una contribución directa desde la cuenca de aporte, ya que los sólidos provenientes de la parte alta de la cuenca quedan retenidos en la cadena de embalses brasileña. La correlación entre ambos sistemas de precipitación sólo puede esperarse para situaciones de tormentas extendidas espacialmente, seguramente asociadas a los mayores caudales líquidos. En consecuencia, cuando se deban construir escenarios de ensayo para el modelo de transporte de sólidos suspendidos, ambas series deben construirse por separado, aunque preservando una modulación similar.

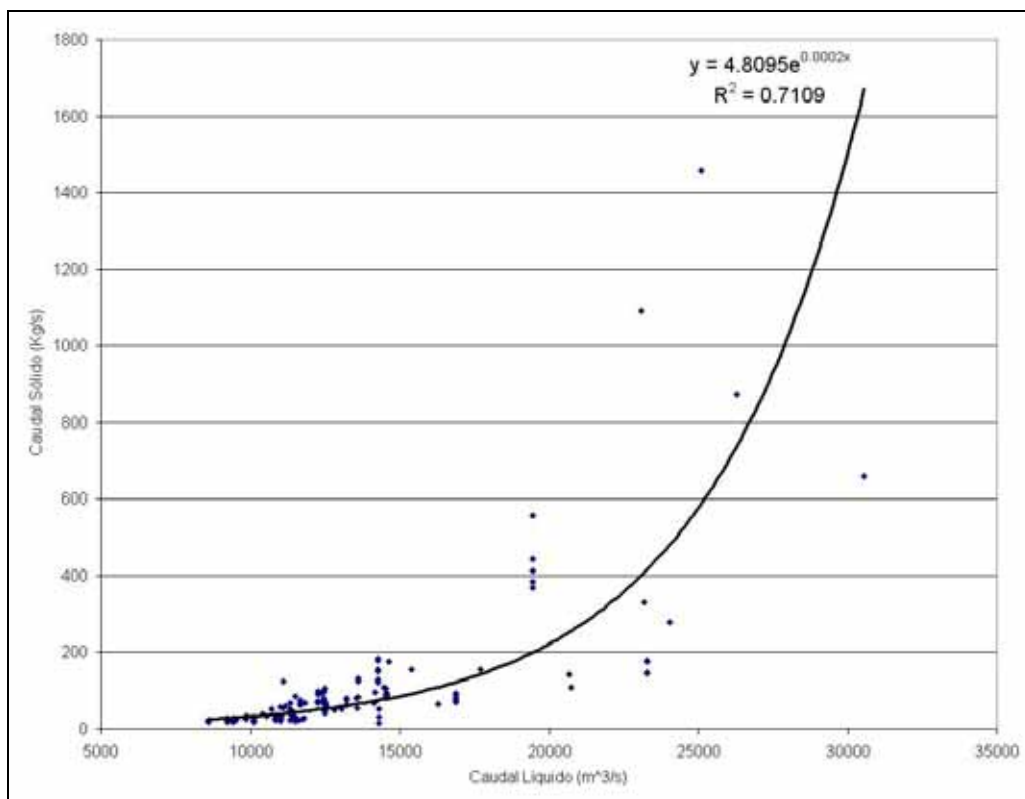


Figura 2.4.2: Correlación entre caudales sólido y líquido ingresantes al embalse

2.5 APORTE MARGINAL

Para la estimación del aporte marginal de sedimentos, aguas abajo de la sección Garupá – Candelaria, se utilizaron los resultados obtenidos en el estudio de sedimentación en el embalse (NHC & EVARSA, 2002). Ahora bien, el tamaño de la cuenca de aporte al embalse de Yacyretá, aguas abajo de esa sección, se ha estimado en 3.500 km² sobre territorio paraguayo (margen

derecha) y 2.400 km² sobre territorio argentino (margen izquierda), es decir 5.900 km² en total, lo que equivale a alrededor de un 8,5% de la cuenca total aguas abajo de la presa de Itaipú (69.230 km²). En consecuencia, las estimaciones efectuadas en el citado estudio, de acuerdo a distintos métodos de cálculo de tasas de exportación, fueron multiplicadas por el factor 0,1. Los resultados se muestran en la tabla 2.5.1, junto con las correspondientes tasas de exportación.

Tabla 2.5.1: Aporte marginal de sólidos al embalse de Yacyretá

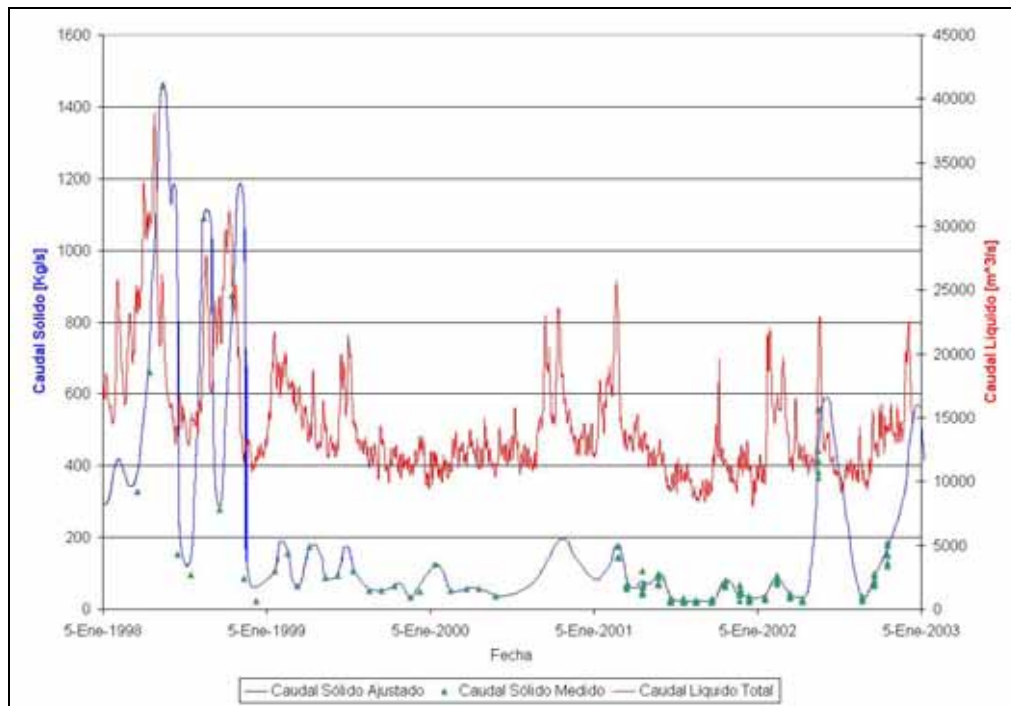
Método	Tasa de Erosión Específica [ton/km ² /año]	Erosión Total [ton/año]
Fournier	300	1.770.000
Walling y Webb	75	442.500
Fleming y Kadhimi	57	336.300
Varoni	200	1.180.000

En el informe de sedimentación de NHC & EVARSA (2002) se recomienda, por consistencia, un valor algo inferior al provisto por Fournier, que es el máximo, lo que en este caso equivale a tomar como aporte marginal total 1.400.000 ton/año, lo que equivale a aproximadamente 44,4 kg/s.

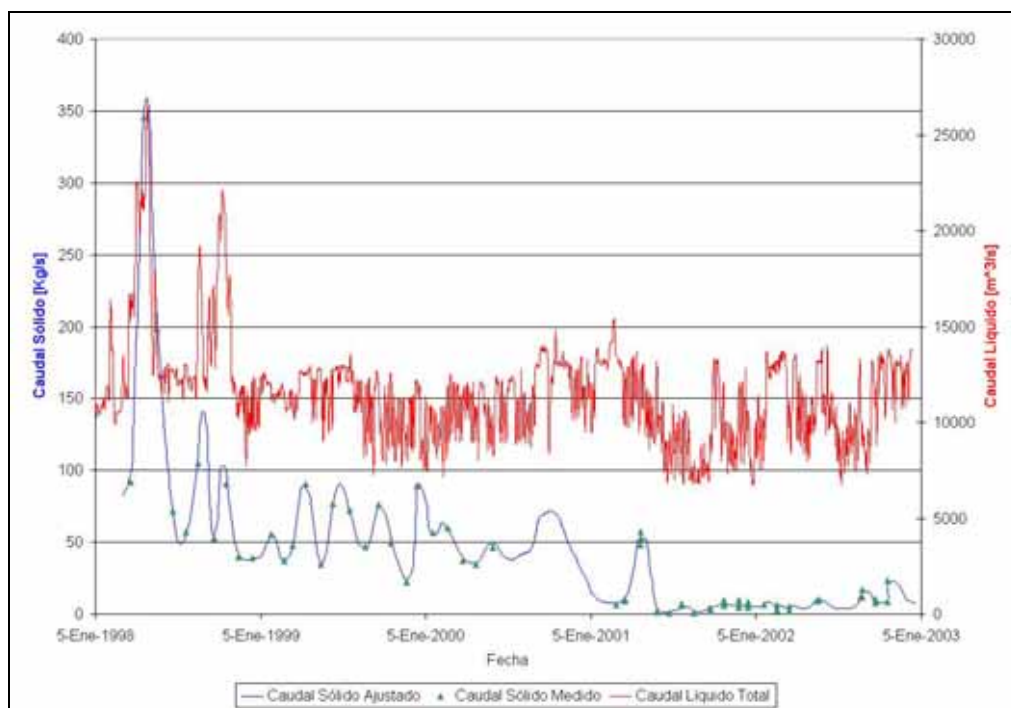
Si bien este aporte es de un orden de magnitud similar al transportado por el río, su ingreso es gradual y permanece confinado en una franja marginal debido a la acción hidrodinámica de las corrientes. Más aún, una parte significativa sedimenta a poco de ingresar al cuerpo de agua, debido a la brusca expansión. En base a estas consideraciones, el aporte marginal no fue considerado a los fines del balance global aquí efectuado.

2.6 SERIES FILTRADAS

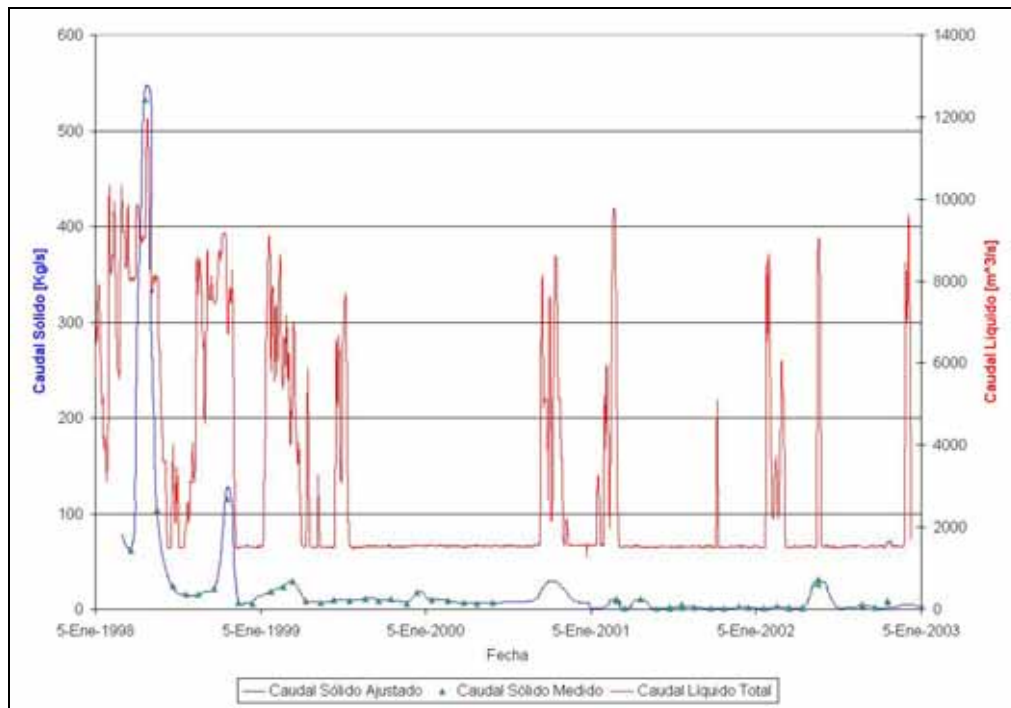
No parece adecuado calibrar el modelo sedimentológico a partir de la utilización directa de las series registradas, ya que los caudales sólidos y líquido muestran oscilaciones relativamente intensas y cortas a lo largo del período de registro. Se planteó, entonces, una estrategia de filtrado. Para ello, en primer lugar se completaron los datos faltantes de caudales sólidos mediante un ajuste manual criterioso basado en la representación de los picos más significativos, cuya ocurrencia también debería estar reflejada en el caudal, de acuerdo a lo discutido más arriba. En la figura 2.6.1 se muestran los puntos agregados a las series. En segundo lugar, se solucionó la falta de simultaneidad de los datos mediante un remuestreo de las series con paso mensual, utilizando polinomios de Hermite. Las series resultantes se muestran en la figura 2.6.2. Estas constituyen el punto de partida del filtrado.



a) Caudal sólido entrante

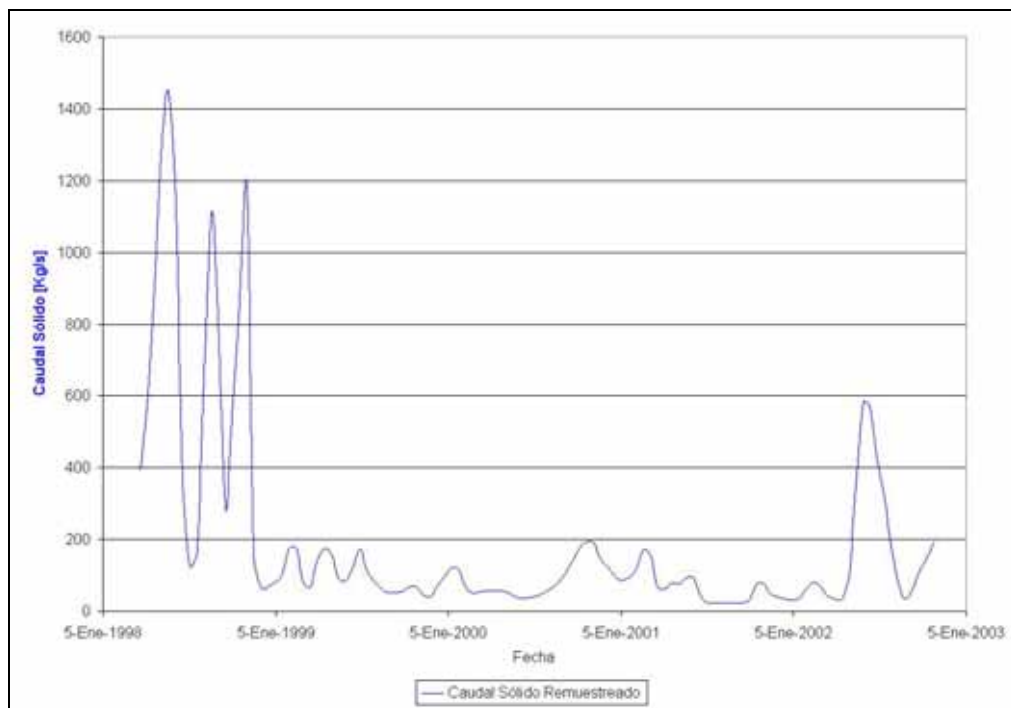


b) Caudal sólido saliente por el brazo principal

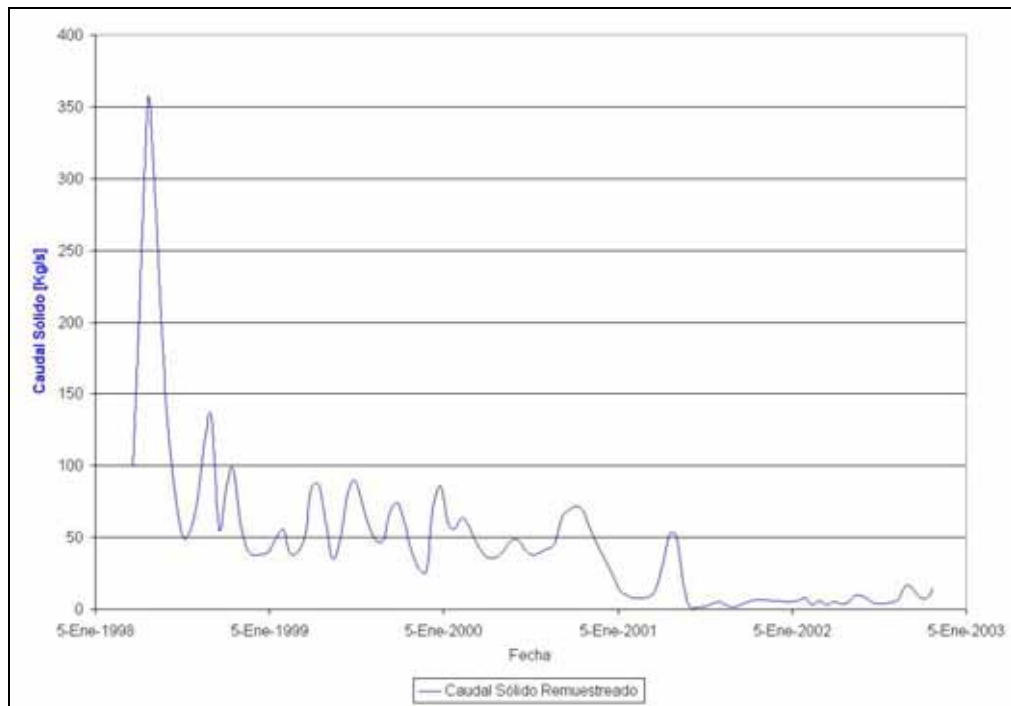


c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

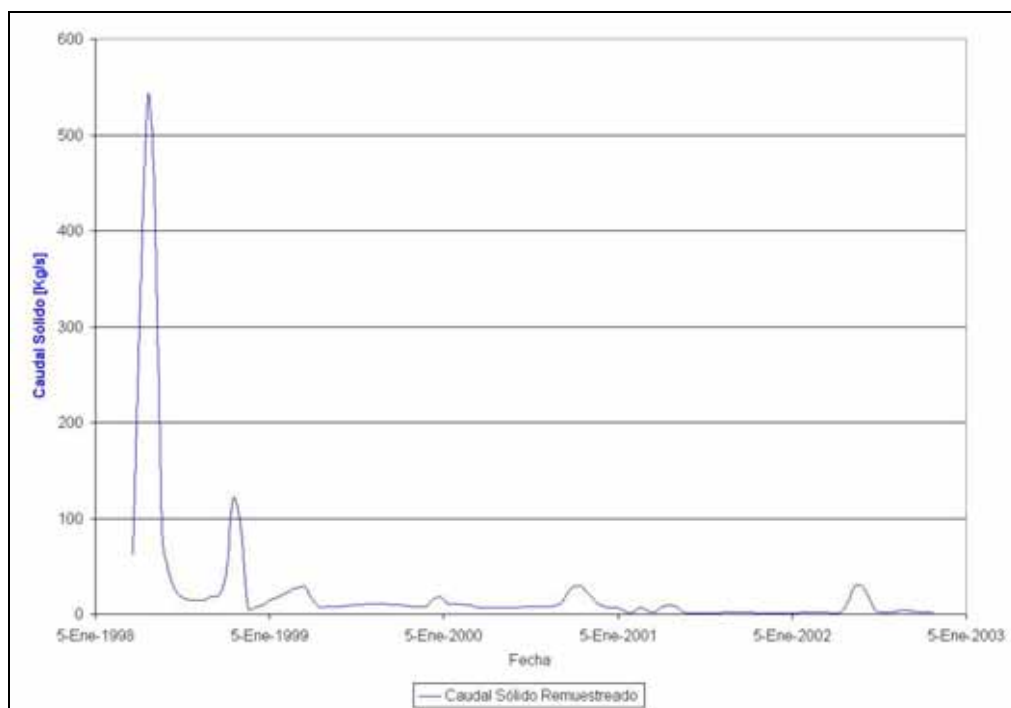
Figura 2.6.1: Series completadas de caudales sólidos



a) Caudal sólido entrante



b) Caudal sólido saliente por el brazo principal

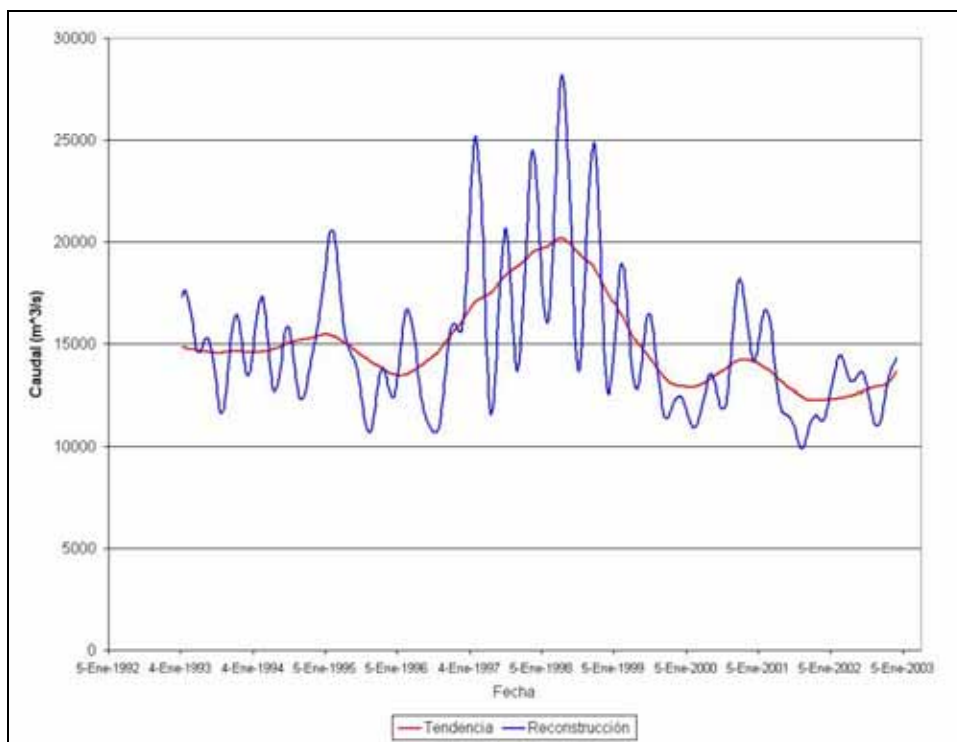


c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

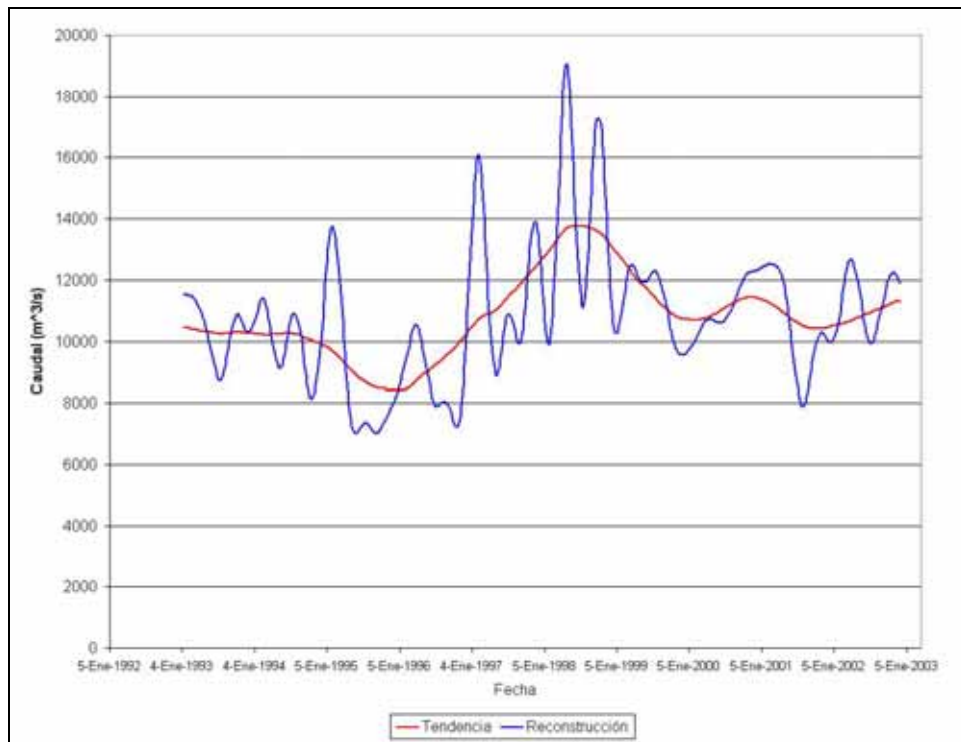
Figura 2.6.2: Series remuestreadas de caudales sólidos

El filtrado se llevó a cabo mediante la técnica de Análisis Espectral Singular (Broomhead and King, 1986; Vautard and Ghil, 1989; Vautard et al., 1992), ó SSA por sus siglas en inglés, que es una variante del método de las componentes principales (PCA). Se utilizó el “SSA-MTM Toolkit” (Myles Allen et al., 2002). Con el SSA se puede realizar la descomposición de series temporales en tendencias, oscilaciones cuasi-periódicas y periódicas, otras componentes significativas, y ruido. Con ellas se pueden reconstruir las contribuciones de las componentes seleccionadas de la serie temporal, y estimar las propiedades espectrales de la serie temporal o de cualquiera de sus componentes por métodos espectrales modernos. En general, las características principales de la señal se pueden reconstruir con muy pocas componentes. La tendencia es la reconstrucción con las componentes de más baja frecuencia.

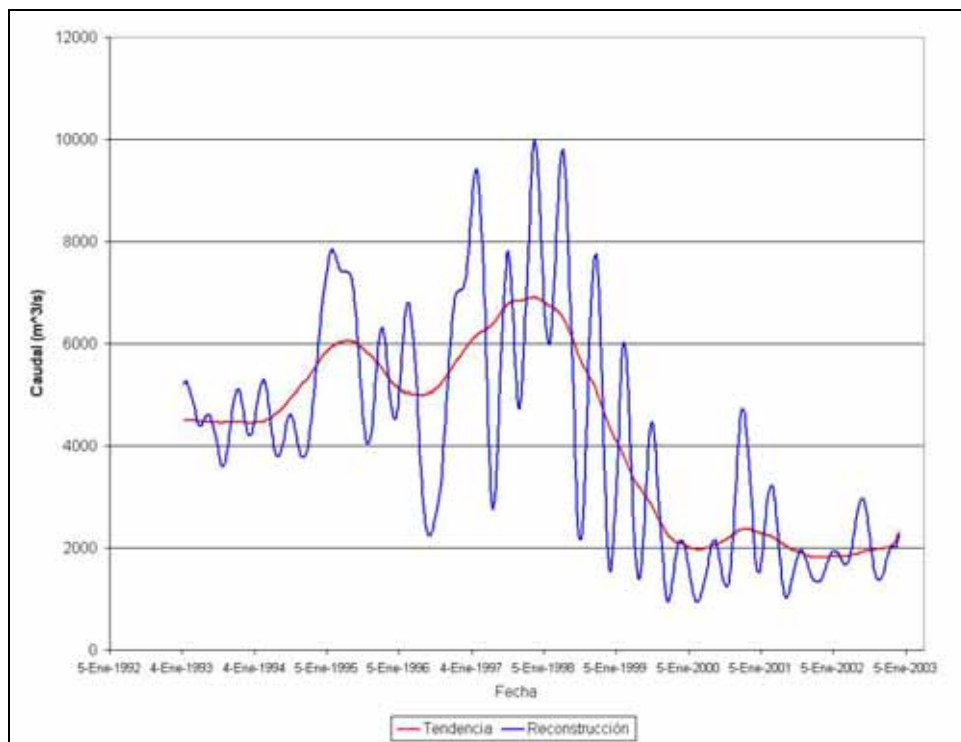
En la figura 2.6.3 se muestran la tendencia y la señal reconstruida con cinco componentes para el caudal líquido ingresante y los dos salientes. Análogamente, la figura 2.6.4 presenta los resultados para los caudales sólidos. Nótese que la oscilación de mayor frecuencia de las tendencias tiene un período anual, por lo que puede ser considerada como representativa de la variación estacional, superpuesta sobre variaciones interanuales.



a) Caudal líquido entrante

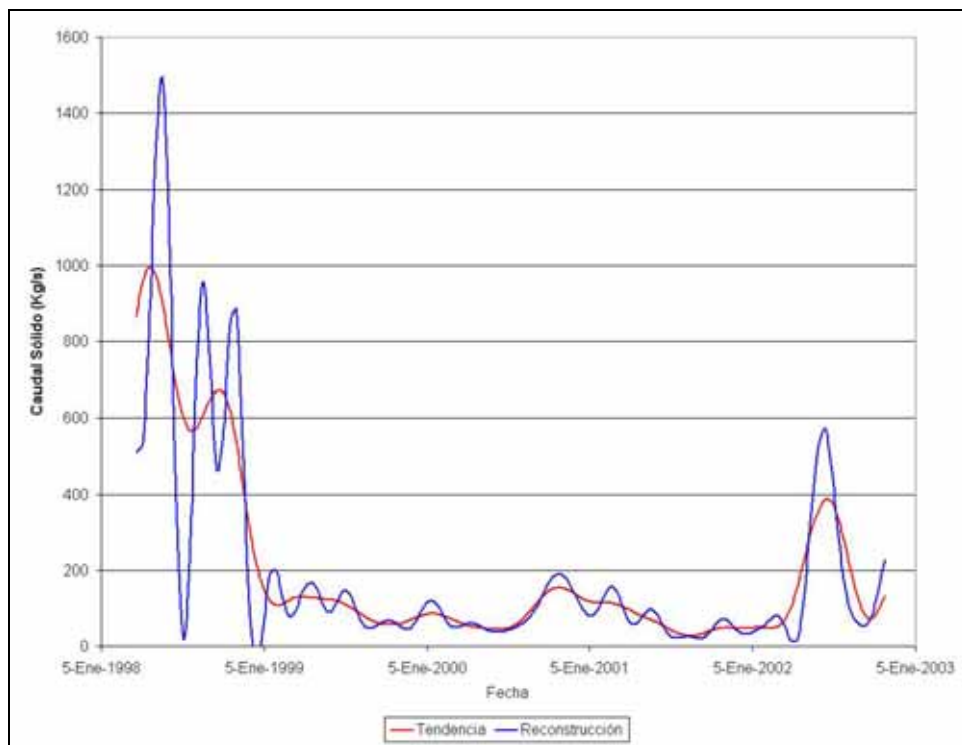


b) Caudal líquido saliente por el brazo principal

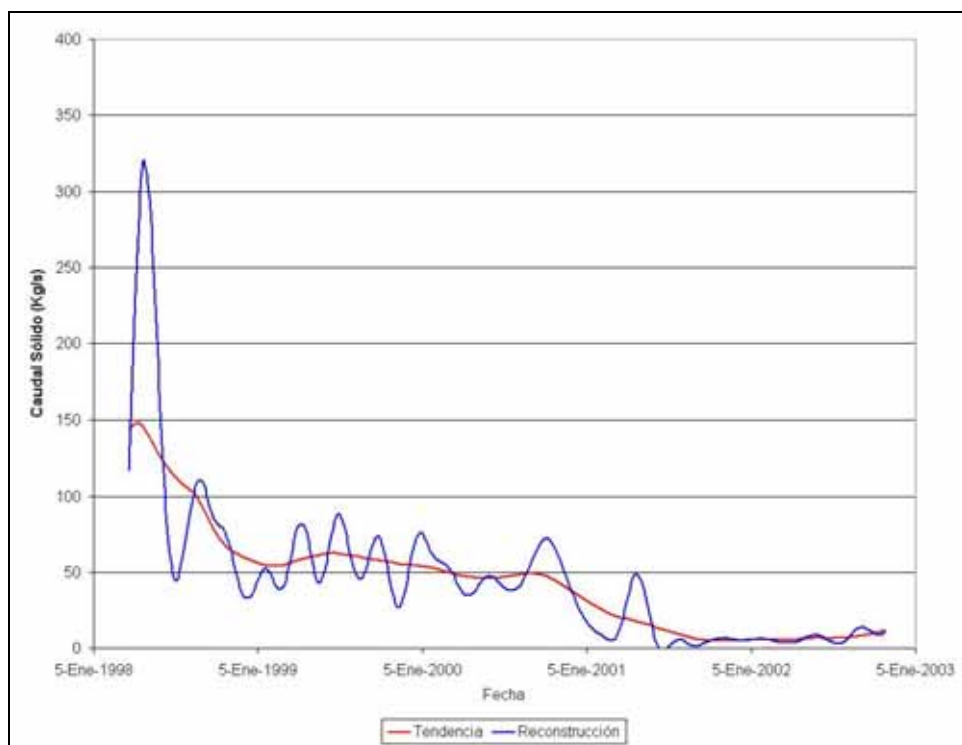


c) Caudal líquido saliente por el brazo Aña-Cuá

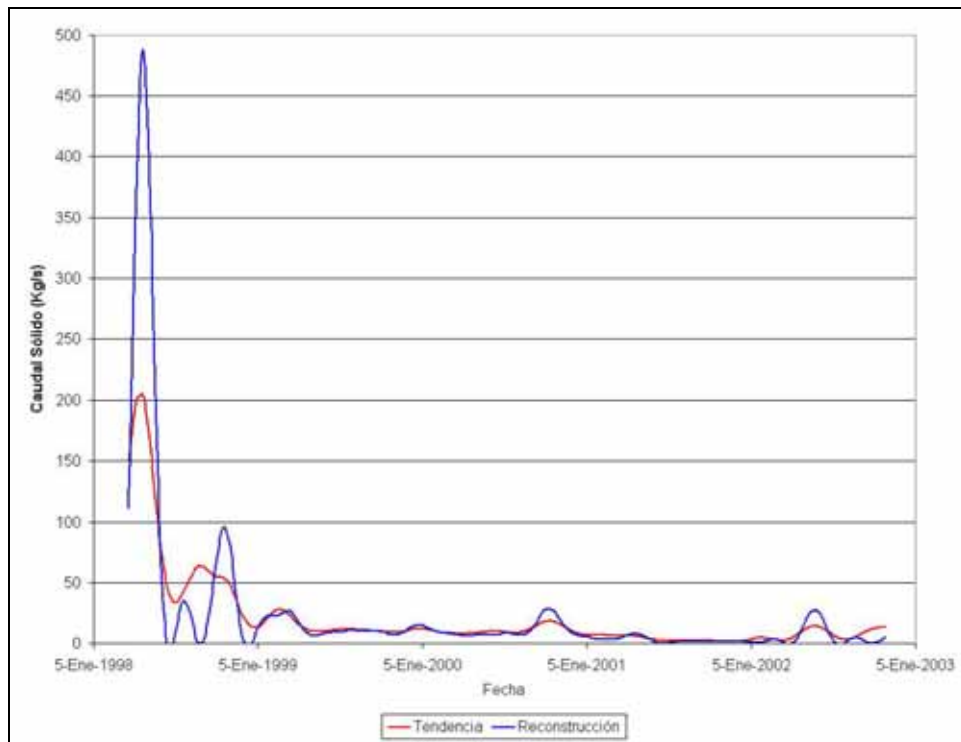
Figura 2.6.3: Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal líquido



a) Caudal sólido entrante



b) Caudal sólido saliente por el brazo principal



c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

Figura 2.6.4: Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal sólido

Se considera que las series de tendencias obtenidas con la técnica de SSA contienen información significativa respecto del balance global de sólidos suspendidos sobre escalas de tiempo estacionales e interanuales. En consecuencia, éstas se utilizan en el próximo capítulo para definir escenarios de calibración.

2.7 DISCRETIZACIÓN DEL TRANSPORTE

El transporte espacialmente continuo de sólidos fue discretizado en alrededor de 35 trayectorias de manchas, que proveyeron una cobertura suficiente como para que su superposición constituyera una distribución lo suficientemente continua. En las figuras 2.7.1 y 2.7.2 se muestran esas trayectorias para el caudal de $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ y las cotas de embalse actual y futura.

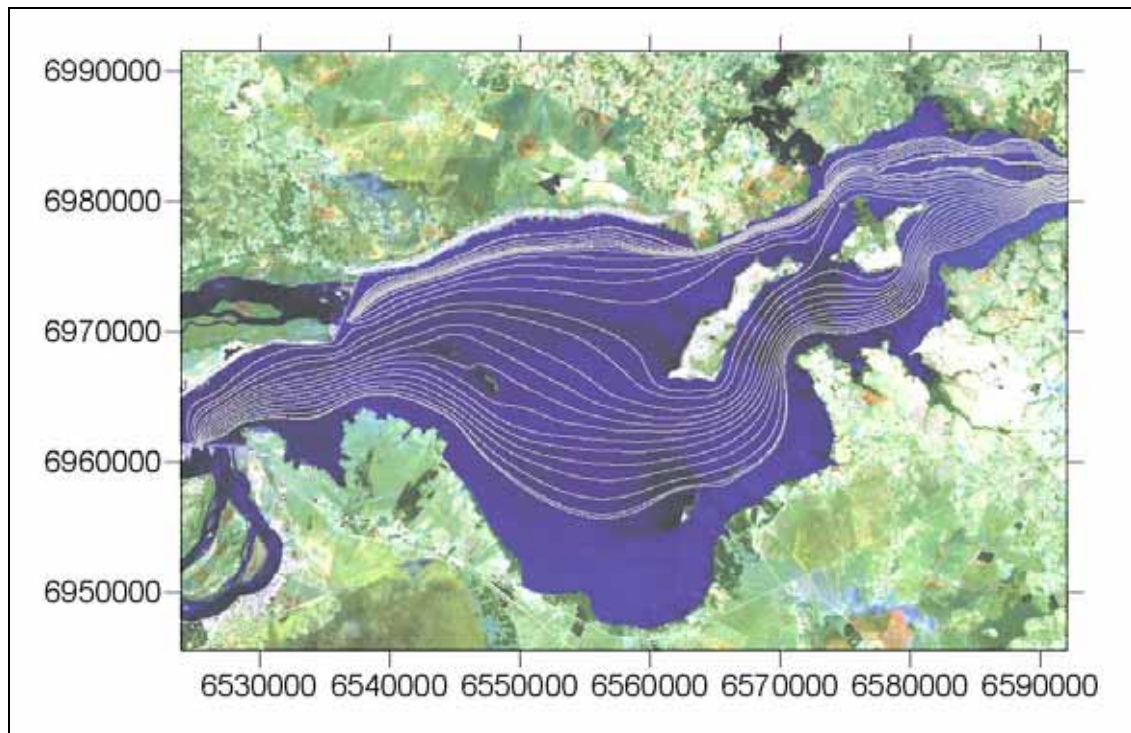


Figura 2.7.1: Trayectorias de manchas lagrangianas para cota 76 m

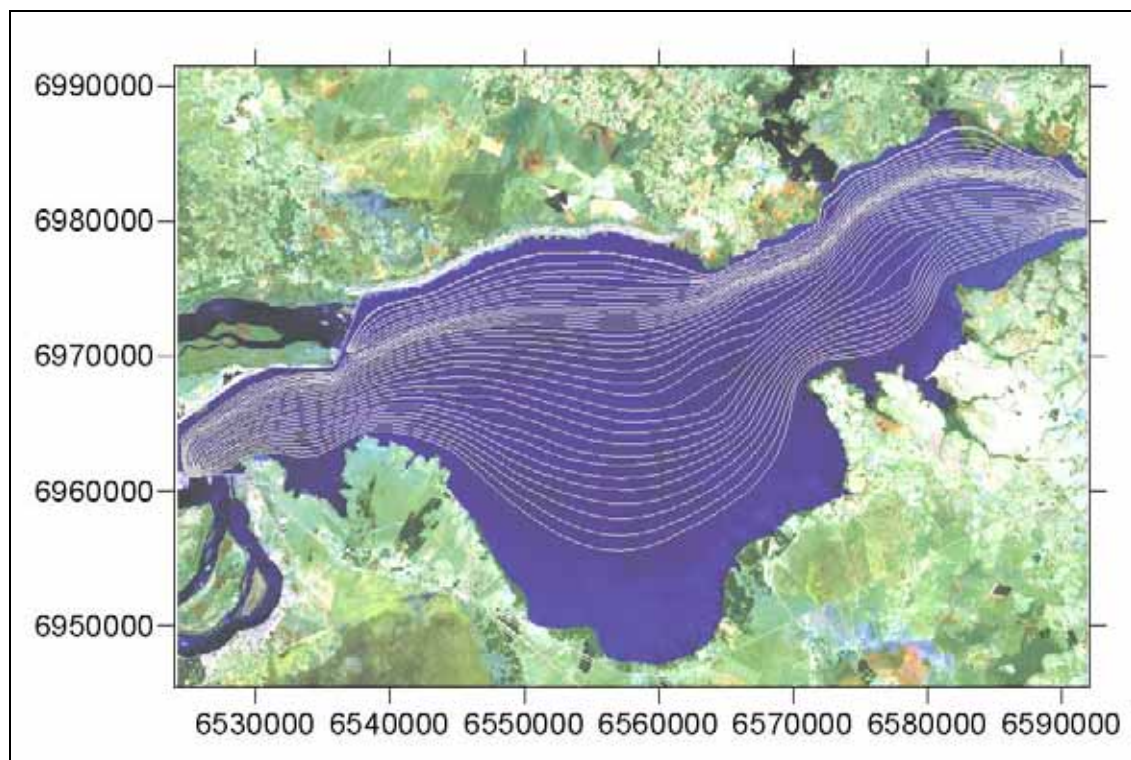


Figura 2.7.2: Trayectorias de manchas lagrangianas para cota 83 m

3 CALIBRACIÓN DEL MODELO

3.1 ESCENARIOS DE CALIBRACIÓN

El modelo puede ser calibrado para escenarios estacionarios, dado que la variación temporal considerada, de escala estacional, es lo suficientemente lenta como para que la respuesta del embalse sea cuasi-estacionaria.

Se seleccionaron escenarios de calibración a partir de las series de tendencias de caudales sólidos. Estos se muestran en la figura 3.1.1 y se describen en la tabla 3.1.1, donde también se indican las tendencias del caudal líquido. Los primeros dos escenarios (E I y E II) corresponden a condiciones aún influenciadas por la gran crecida de 1998, asociada al fenómeno de El Niño. Los restantes son representativos de condiciones más normales. Nótese que se ha cubierto todo el rango de caudales entre 10.000 y 20.000 m³/s, que es el rango de variabilidad que muestra la tendencia de caudal.

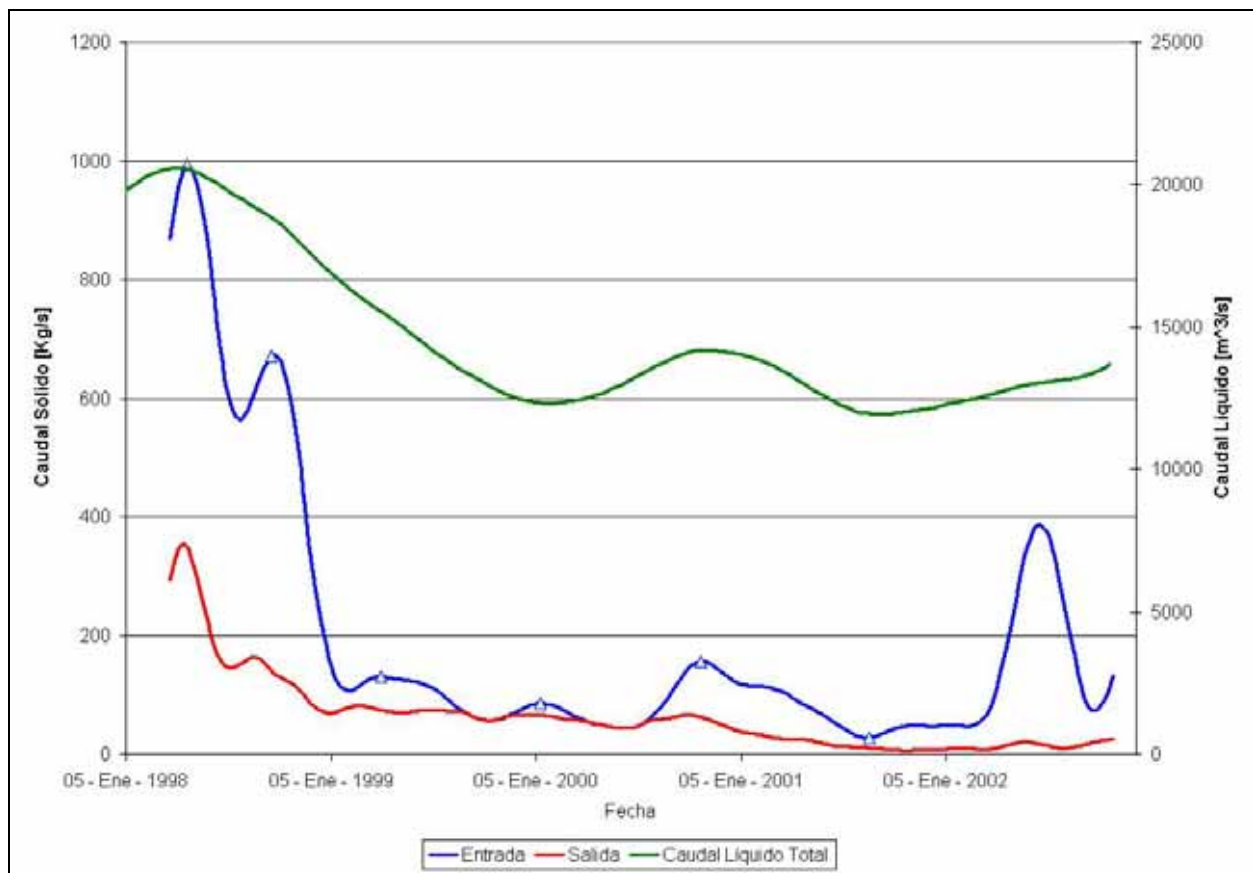


Figura 3.1.1: Escenarios de calibración

Tabla 3.1.1: Escenarios de calibración

Escenario	Fecha	Caudal	Candelaria	Brazo Aña Cuá	Brazo Principal
E I	24/04/1998	Sólido	994,77	204,72	145,90
		Líquido	20.574	9.774	10.800
E II	21/09/1998	Sólido	671,30	58,25	82,63
		Líquido	19.496	5.100	14.396
E III	04/04/1999	Sólido	130,18	16,55	57,73
		Líquido	15.400	3.300	12.100
E IV	14/01/2000	Sólido	85,99	11,58	53,75
		Líquido	11.711	1.780	9.931
E V	25/10/2000	Sólido	155,44	17,92	45,05
		Líquido	14.200	2.548	11.652
E VI	21/08/2001	Sólido	27,40	2,58	7,50
		Líquido	12.900	1.875	11.025

El caudal sólido entrante se especifica como condición de borde, mientras que los de salida se utilizan como base para calibrar el modelo.

Para la calibración se dispuso de dos parámetros:

- o El diámetro medio de las partículas sólidas suspendidas (d_{50}) o, más estrictamente, su velocidad de caída, que regula la pérdida por sedimentación en el embalse.
- o Un parámetro de distribución que se corresponde con la fracción de caudal sólido total entrante al embalse que enfila hacia el brazo principal.

3.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

En la Tabla 3.2.1 se presentan los valores de los parámetros con los cuales se calibró el modelo. En la figura 3.2.1 se muestran los caudales sólidos calculados y las tendencias de los registrados. Se observa que, con los dos parámetros utilizados puede lograrse un acuerdo exacto entre ambos.

Tabla 3.2.1: Diámetros obtenidos en la calibración

Escenario	d_{50} [μm]	Fracción BP
E I	17,3	0,79
E II	21,0	0,83
E III	7,0	0,39
E IV	3,2	0,17
E V	7,5	0,59
E VI	7,1	0,63

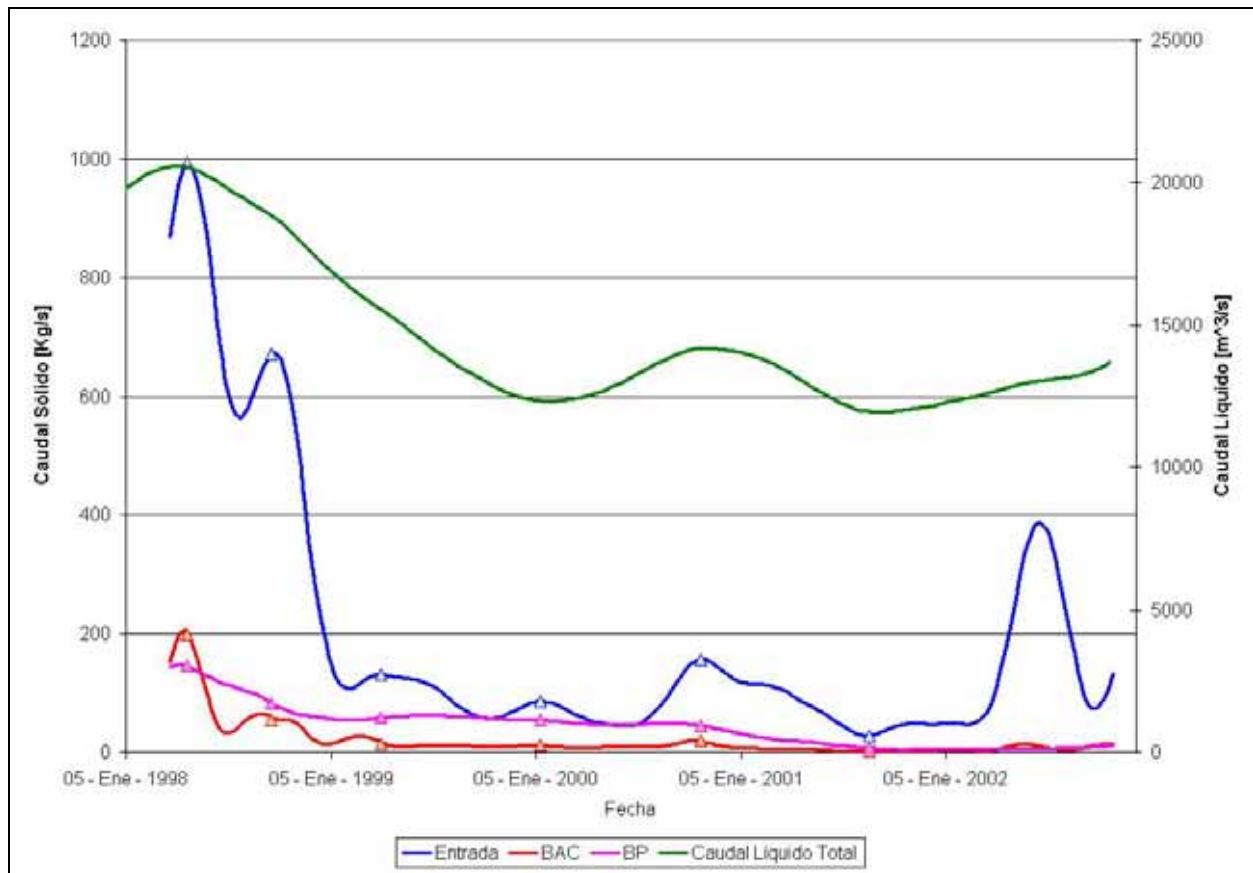


Figura 3.2.1: Resultados de la calibración

Ahora bien, para poder explotar el modelo para otros escenarios, es necesario disponer de leyes que permitan determinar los dos parámetros de calibración correspondientes. En la figura 3.2.2 se representa el diámetro medio en función del caudal líquido para todos los escenarios de calibración. Allí también se muestra una curva de regresión que utiliza como función de base a la exponencial, y que está dada por:

$$d_{50} [\mu m] = 0,5172 \cdot e^{0,0001796 \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right]}$$

donde el caudal se ingresa en m^3/s y el d_{50} se obtiene en micrones. La correlación para el ajuste efectuado es igual a 0,88, que se considera aceptable en función de la incertidumbre en los datos de entrada.

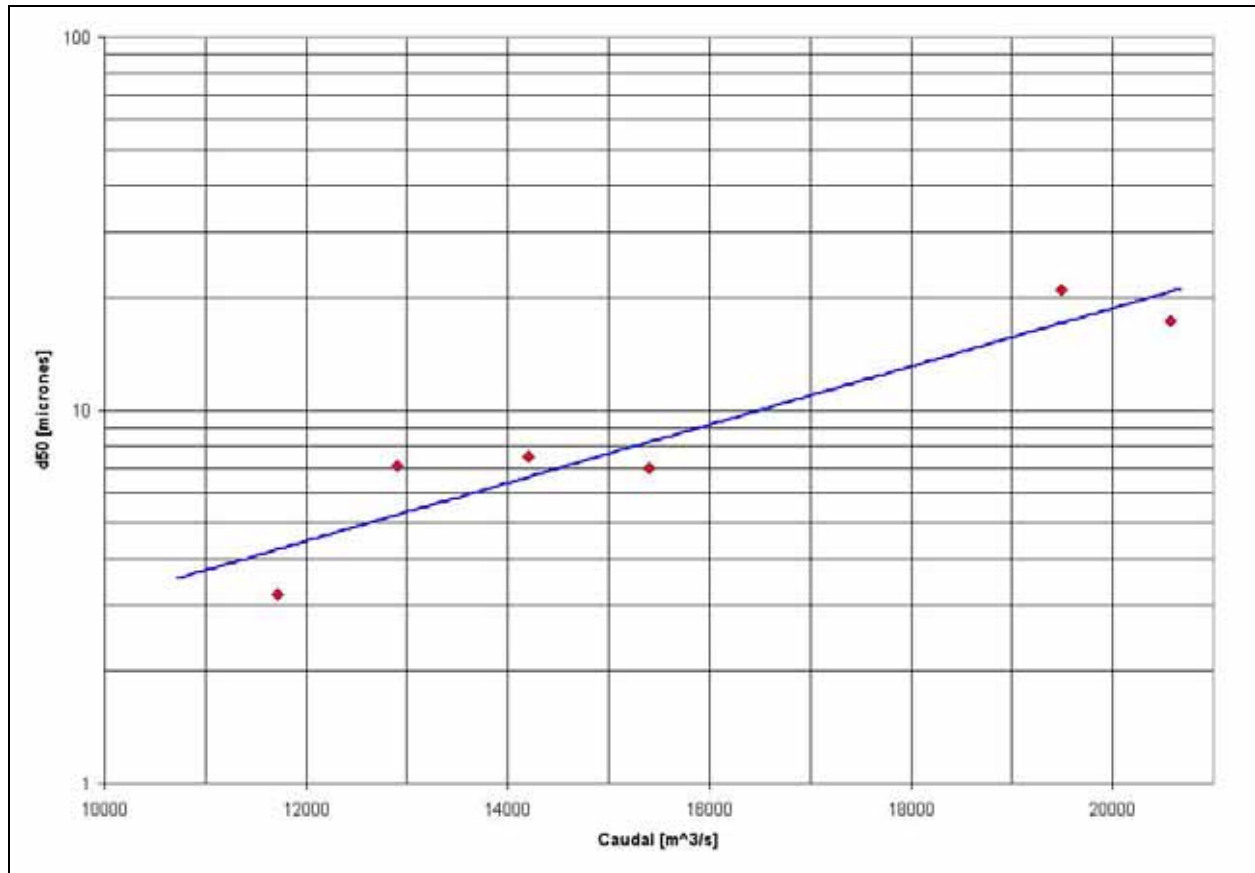


Figura 3.2.2: Ajuste caudal- d_{50}

El segundo parámetro de calibración, la fracción de masa que le corresponde al brazo principal, también varía con el caudal debido a que el corredor de flujo correspondiente al brazo principal varía con la relación de caudales salientes y con la intensidad de los caudales entrantes. En la figura 3.2.3 se observa su variación con el caudal entrante, donde se observa claramente que este parámetro tiene un menor grado de correlación con el caudal que el anterior. Esto es esperable dado que el caudal de salida del brazo Aña-Cuá está regulado, de modo que existe una significativa componente antrópica. De todos modos, para cerrar el modelo se ha ajustado una parábola de segundo grado:

$$FBP = 4 \cdot 10^{-9} \cdot Q^2 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 2,2529$$

cuyo coeficiente de correlación es $R^2 = 0,63$.

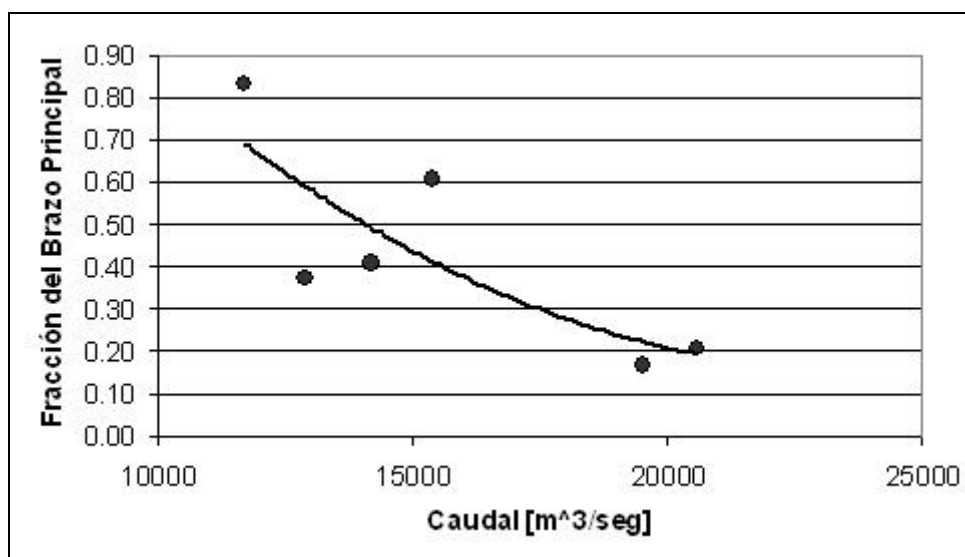


Figura 3.2.3: *Fracción del Caudal Sólido Total del Brazo Principal*

En la figura 3.2.4 y en la tabla 3.2.2 se presentan los caudales sólidos de salida obtenidos con el modelo para los escenarios de calibración, si se utiliza el valor de diámetro y coeficiente de distribución obtenidos de las leyes propuestas. Los resultados se consideran satisfactorios.

Tabla 3.2.2: *Resultados de la Calibración*

Fecha	Caudal Sólido [kg/s]			
	Entrada	BAC	BP	Salida
24/Abr/1998	994,77	149,02	145,89	345,17
25/Oct/2000	155,44	24,94	45,05	63,95
14/Ene/2000	85,99	5,46	53,75	65,62
04/Abr/1999	130,18	14,46	57,73	72,19
21/Ago/2001	27,40	4,75	7,50	9,69
21/Sep/1998	671,30	87,08	82,63	136,64

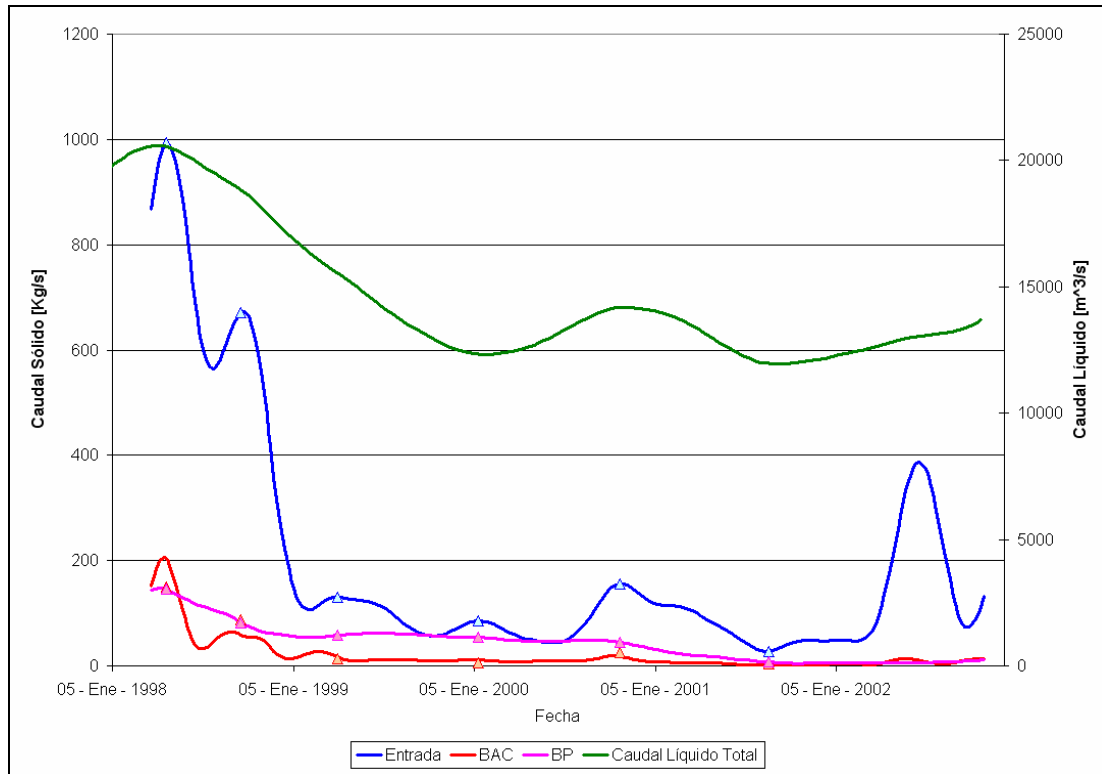


Figura 3.2.4: Resultados utilizando datos del ajuste

4 EXPLOTACIÓN DEL MODELO

4.1 PRODUCTOS

Con el modelo calibrado, es posible proceder a su explotación para obtener información sobre la dinámica del transporte de sólidos.

En lo que sigue se presentan y analizan los mapas de distribución de concentración y de tasas de sedimentación para condiciones actuales y para cota futura.

4.2 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS A COTA 76

Se eligieron como escenarios de ensayo a EIV, EIII, y EI, que corresponden aproximadamente a los caudales representativos del rango de variabilidad: 10.000 (caudal bajo), 15.000 (caudal medio), y 20.000 m³/s (caudal alto).

En el caso del escenario de caudal bajo (figura 4.2.1) se observa una distribución en planta relativamente homogénea de la concentración de sólidos en suspensión. En el caso del escenario de caudal medio (figura 4.2.2), la concentración de sólidos en suspensión cae en la zona sur del embalse, manteniéndose en el mismo orden de valores para el resto del embalse. En el escenario de mayor caudal (figura 4.2.3) se identifican dos canales preferenciales por los que circulan los sólidos en suspensión, los que coinciden con los viejos cauces del río Paraná, notándose entonces la disminución de la capacidad relativa de mezcla lateral debido al aumento de las velocidades de la corriente.

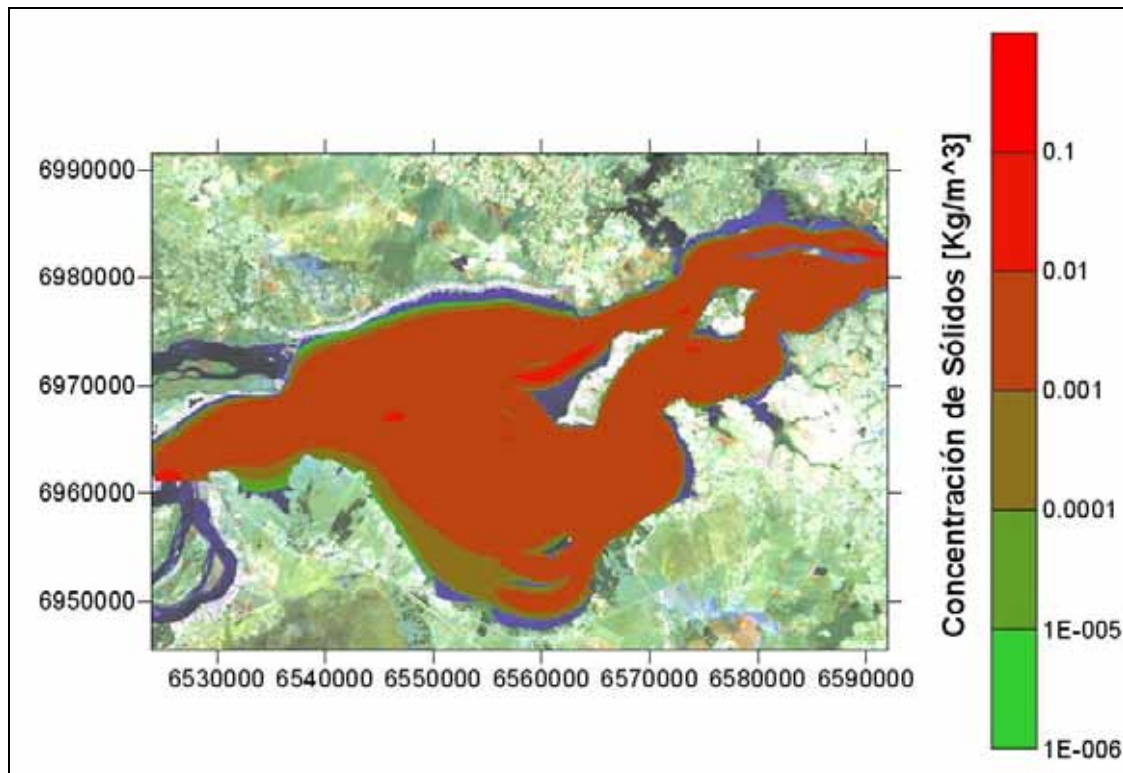


Figura 4.2.1: Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal bajo

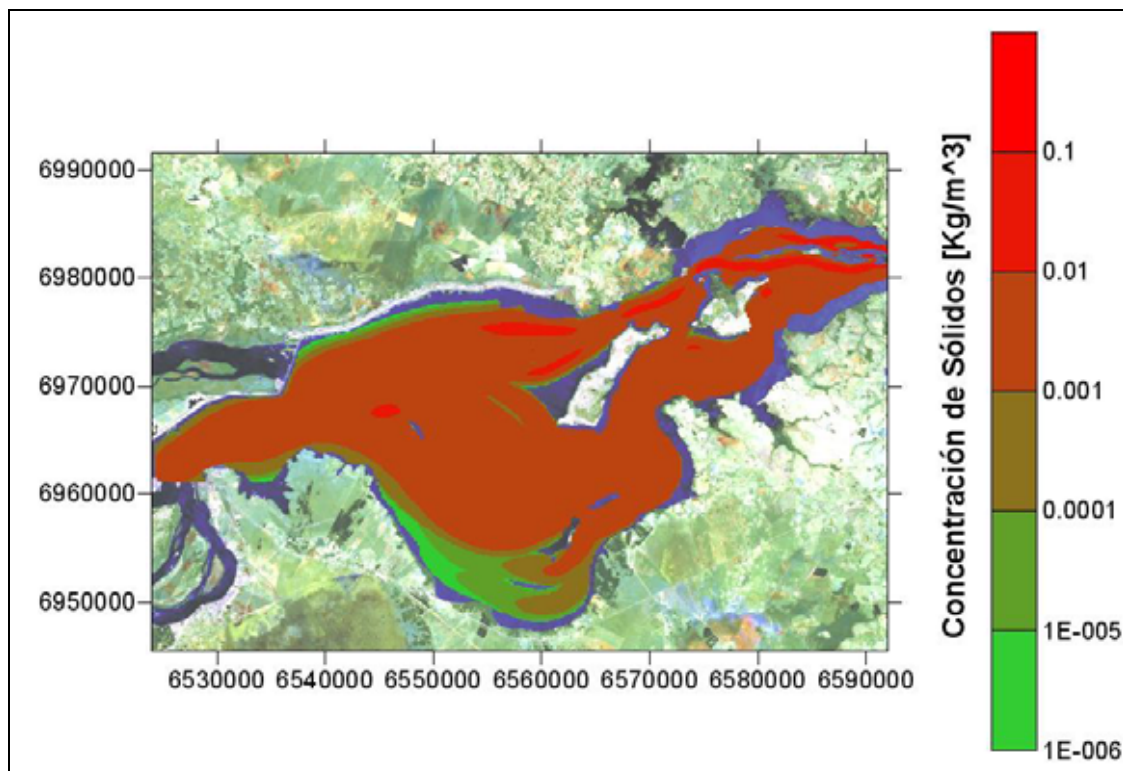


Figura 4.2.2: Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio

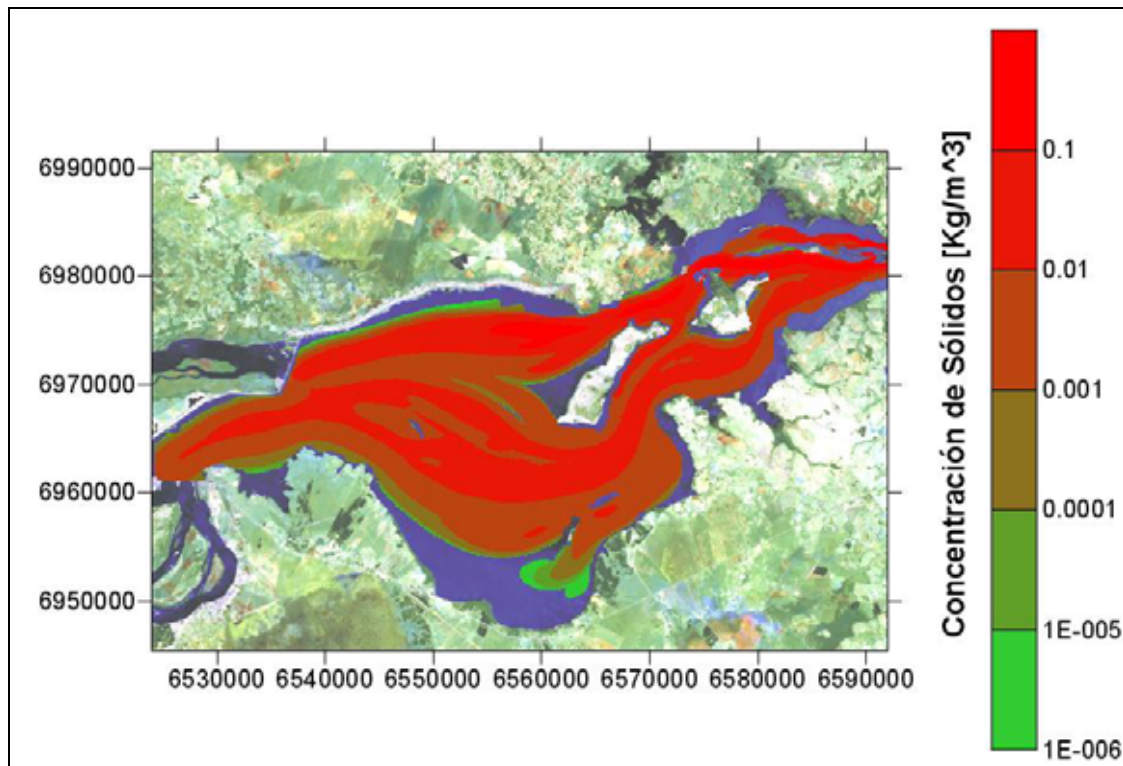


Figura 4.2.3: Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal alto

4.3 ZONAS DE SEDIMENTACIÓN A COTA 76

En el caso del escenario de caudal bajo (figura 4.3.1) se observa que las zonas de mayor sedimentación coinciden con la expansión del cauce y con la parte central del embalse, quedando la zona del antiguo cauce en el embalse con poca sedimentación. Para el escenario de caudal medio (figura 4.3.2) se repiten las características apuntadas para el caso de caudal bajo, pero con un aumento en extensión e intensidad en las zonas de sedimentación. En el escenario de mayor caudal (figura 4.3.3) la mayor sedimentación se produce en la zona media del embalse y al final del mismo, en la zona de los vertederos, con tasas de sedimentación en general más intensas.

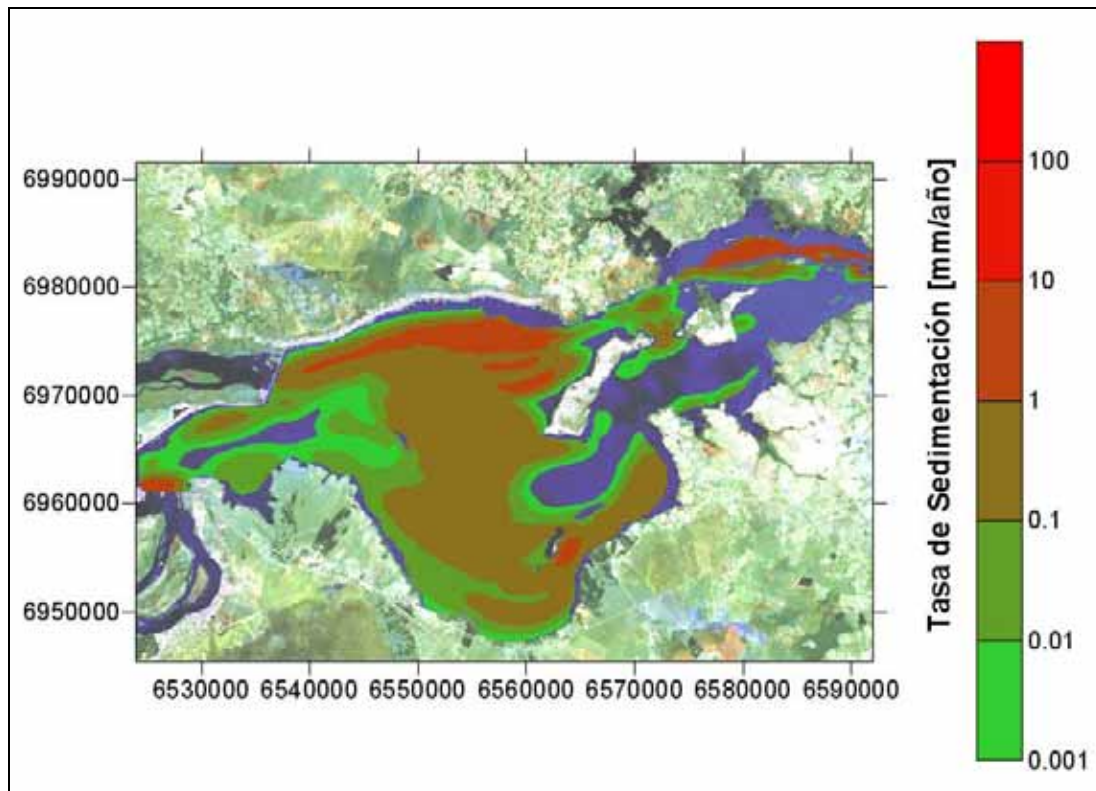


Figura 4.3.1: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal bajo

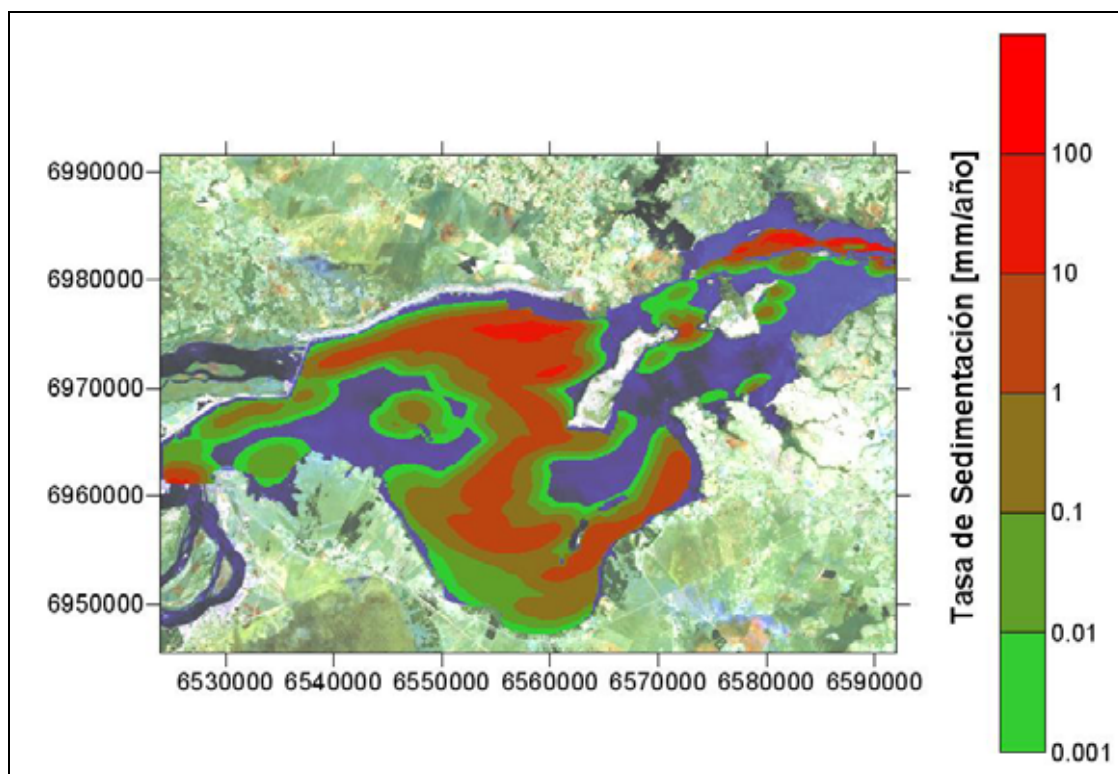


Figura 4.3.2: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio

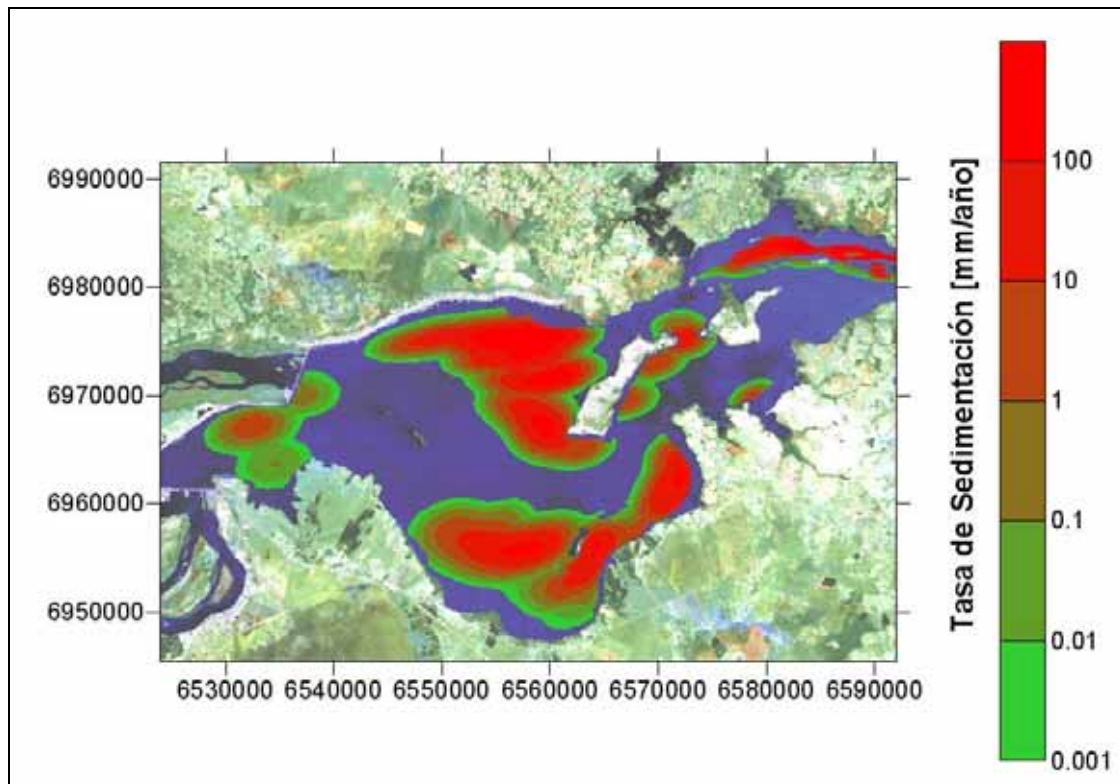


Figura 4.3.3: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal alto

4.4 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS A COTA 83

Se eligieron los mismos escenarios que en el caso de cota 76m.

En el caso del escenario de caudal bajo (figura 4.4.1) también se observa una buena distribución en planta de la concentración de sólidos en suspensión, como sucede en cota 76m. Para el escenario de caudal medio (figura 4.4.2) no se observan cambios importantes en la concentración de sólidos en suspensión, es decir que la zona sur del embalse disminuye muy poco la concentración y se mantiene en el mismo orden que el resto del embalse. En el escenario de mayor caudal (figura 4.4.3) disminuye bastante el poder de mezcla lateral de la corriente, y se forman dos canales preferenciales para la circulación de sólidos, al norte el que se correspondería con el antiguo cauce del brazo Aña Cuá y al sur el que se correspondería con el canal de los Jesuitas, quedando relegada la zona sur del embalse.

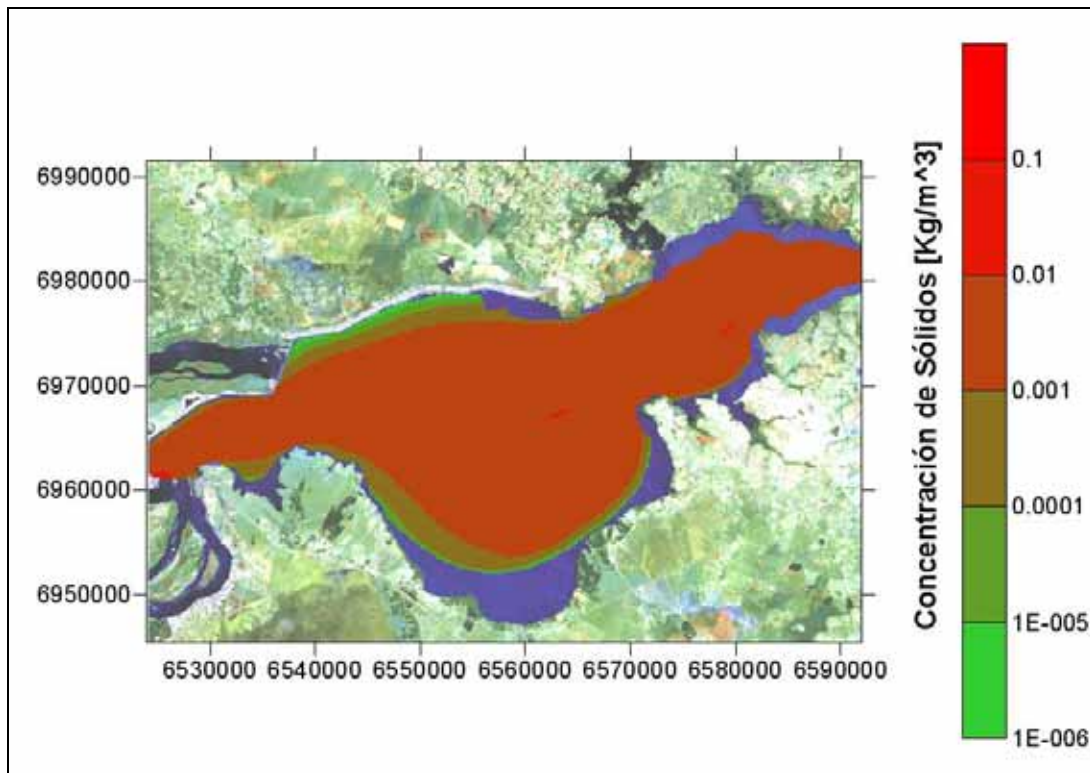


Figura 4.4.1: Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal bajo

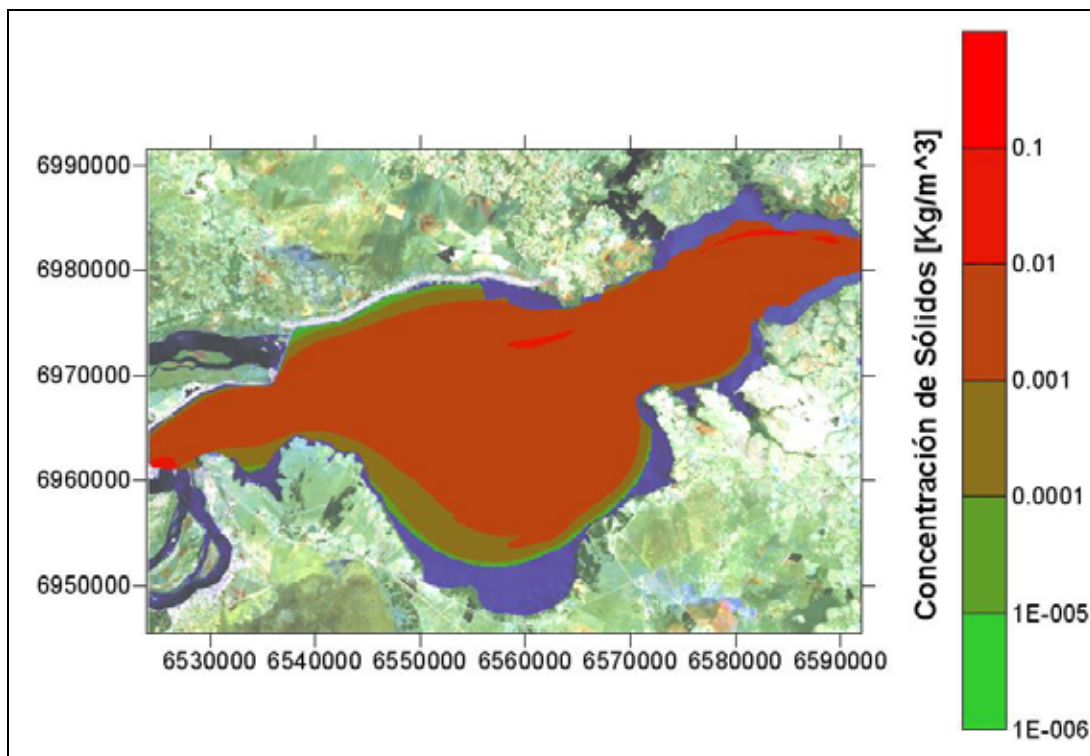


Figura 4.4.2: Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio

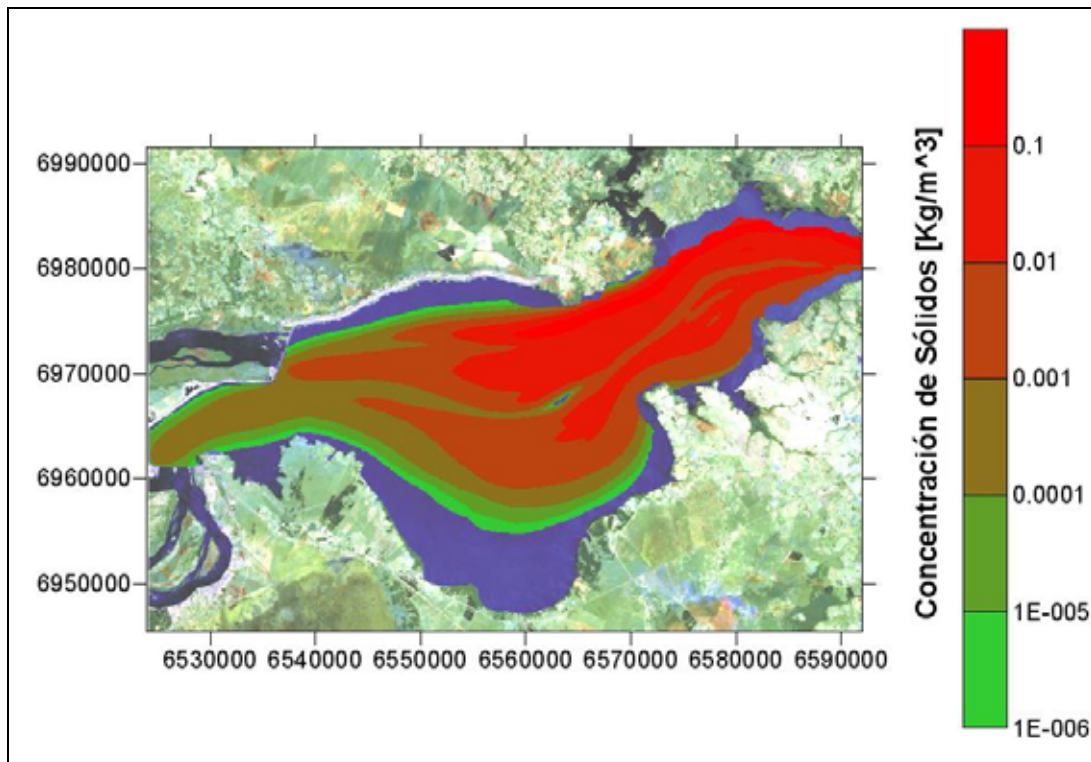


Figura 4.4.3: Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal alto

4.5 ZONAS DE SEDIMENTACIÓN A COTA 83

En el caso del escenario de caudal bajo (figura 4.5.1) se observa que la tasa de sedimentación se encuentra entre 0,1 y 1 mm/año en forma bastante uniforme sobre el embalse, con una pequeña zona sin sedimentación aguas arriba en forma de lengua. Para el escenario de caudal medio (figura 4.5.2) la tasa de sedimentación también se encuentra entre 0,1 y 1 mm/año, con una lengua de tasa cero que avanza aguas abajo desde la zona de transición, por el centro del embalse. En el escenario de mayor caudal (figura 4.5.3) la mayor sedimentación se produce en la zona central del embalse, con tasas de sedimentación del orden de 10 mm/año. En este caso la lengua de tasa cero se desarrolla formando un canal desde aguas arriba hasta el centro del embalse.

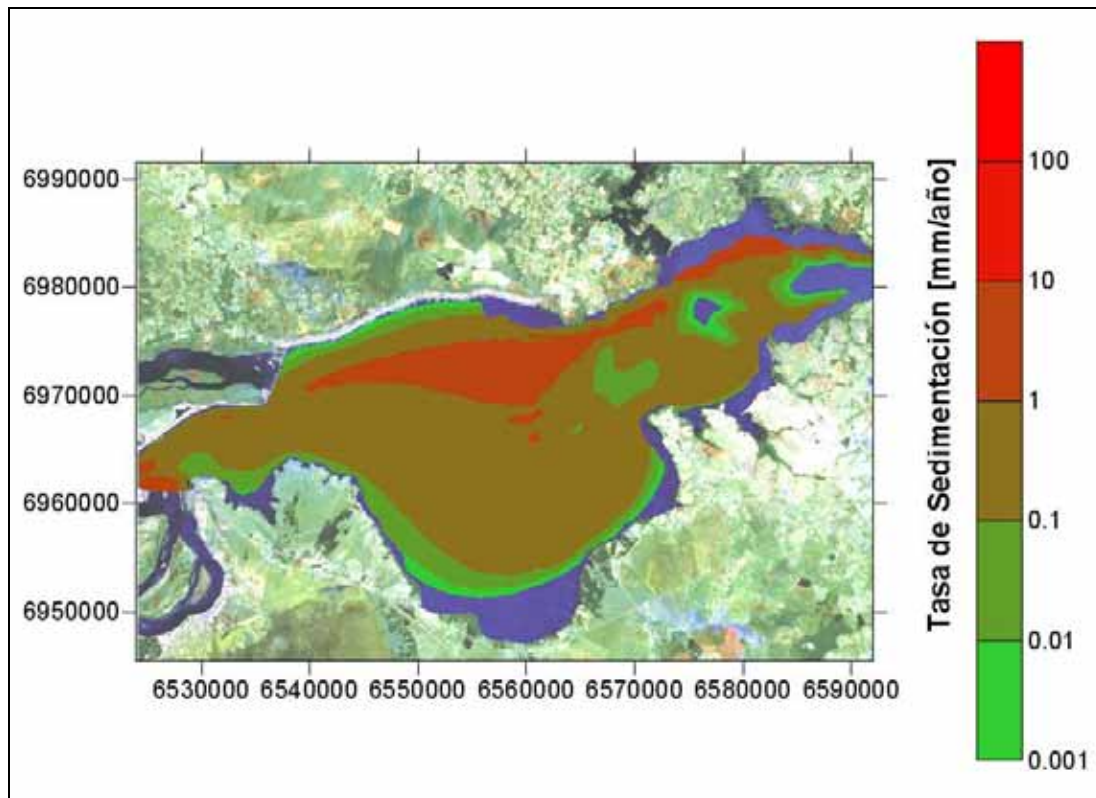


Figura 4.5.1: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal bajo

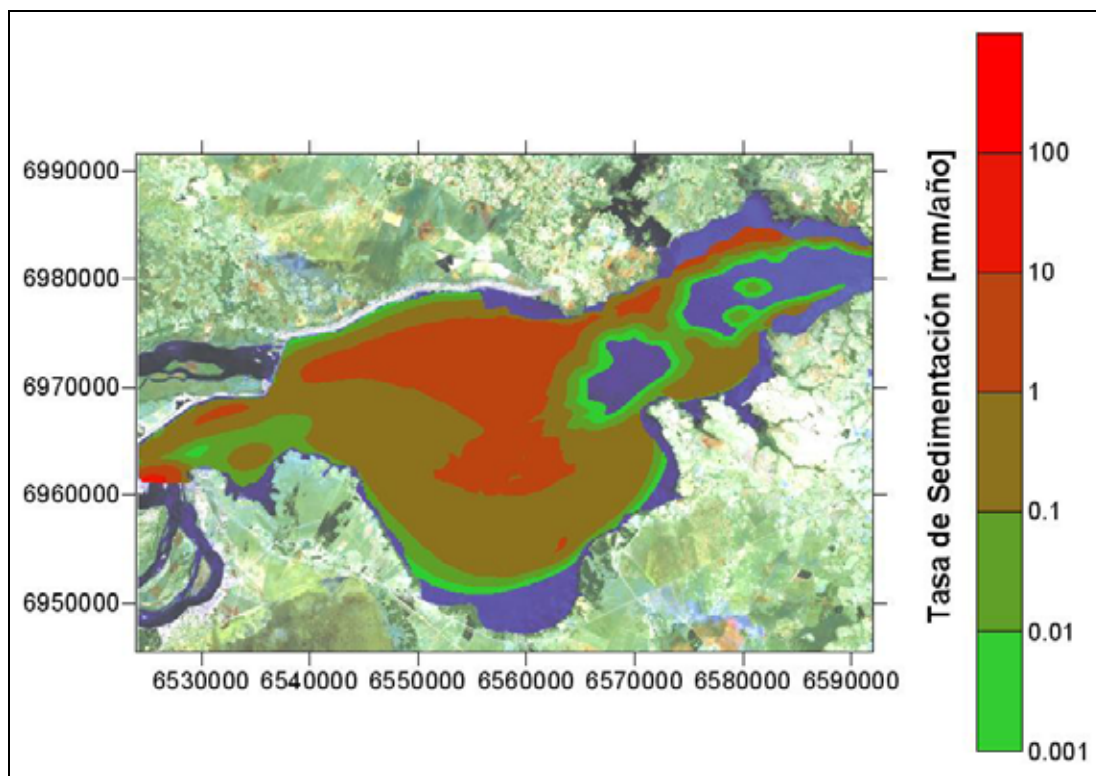


Figura 4.5.2: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio

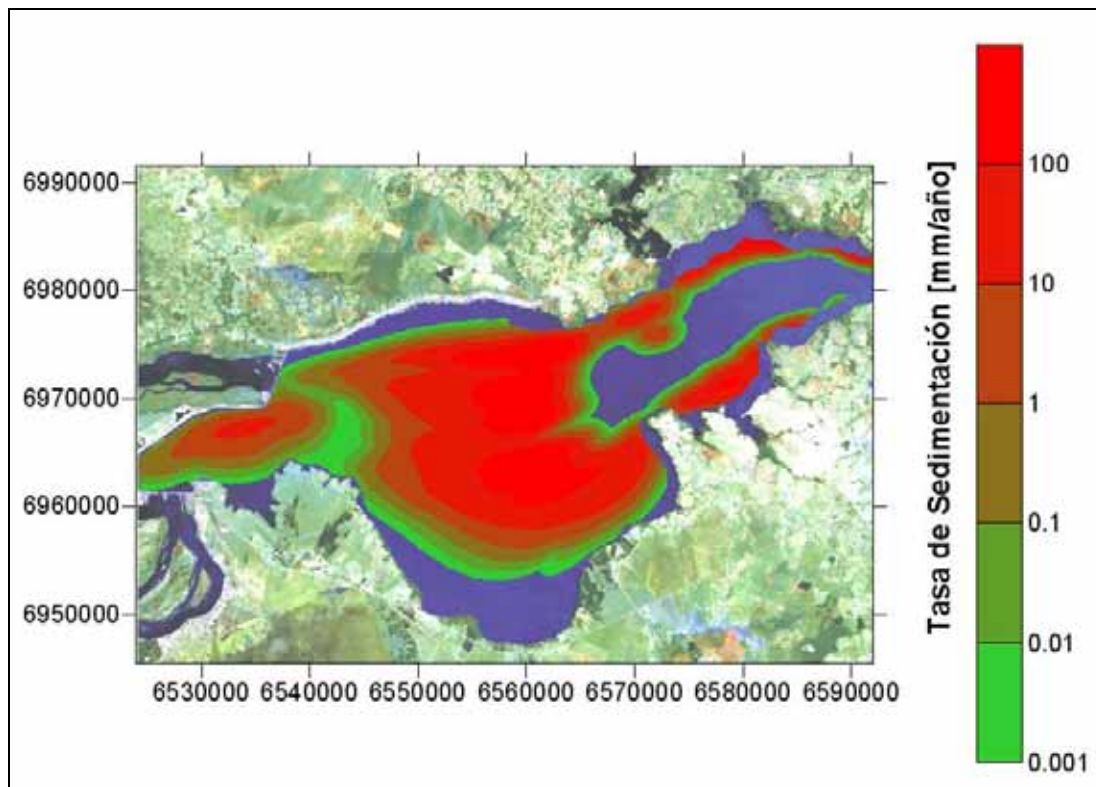


Figura 4.5.3: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal alto

4.6 ZONIFICACIÓN DE SEDIMENTOS DE FONDO

En la figura 4.6.1 se muestra una zonificación del embalse de Yacyretá efectuada en base a datos granulométricos de muestras de sedimentos de fondo provistos por la EBY, que están agrupados en 4 rangos. Como figura 4.6.2 se repite la distribución de tasas de sedimentación de sólidos suspendidos correspondiente al caudal medio ($15000 \text{ m}^3/\text{s}$), presentada anteriormente como figura 4.3.2. En líneas generales se observa que existe coherencia entre ambos resultados. En efecto:

- La zona no incluida en el modelo de transporte de sólidos suspendidos muestra sólo rangos de material grueso (figura 4.6.2), indicando precisamente la ausencia de sedimentación apreciable de sólidos suspendidos (material fino).
- La lengua de material grueso que penetra en el embalse (figura 4.6.1) se corresponde bien con la zona de ausencia de sedimentación de sólidos suspendidos (figura 4.6.2), que además constituye la traza del antiguo cauce principal del río.
- Las zonas con mayor sedimentación (figura 4.6.2) se corresponden con las de rangos de material fino (figura 4.6.1).

- o La zona de material grueso cercana a la salida por el brazo principal (figura 4.6.1) tiene su correlato en una zona de ausencia de sedimentación (figura 4.6.2).

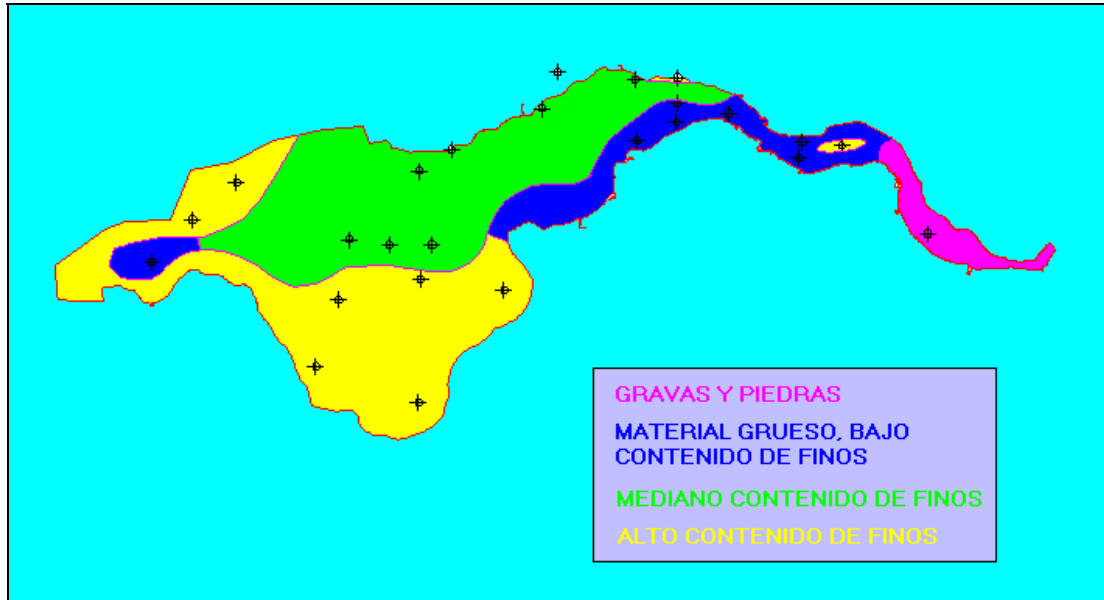


Figura 4.6.1: Distribución granulométrica de sedimentos en planta según mediciones

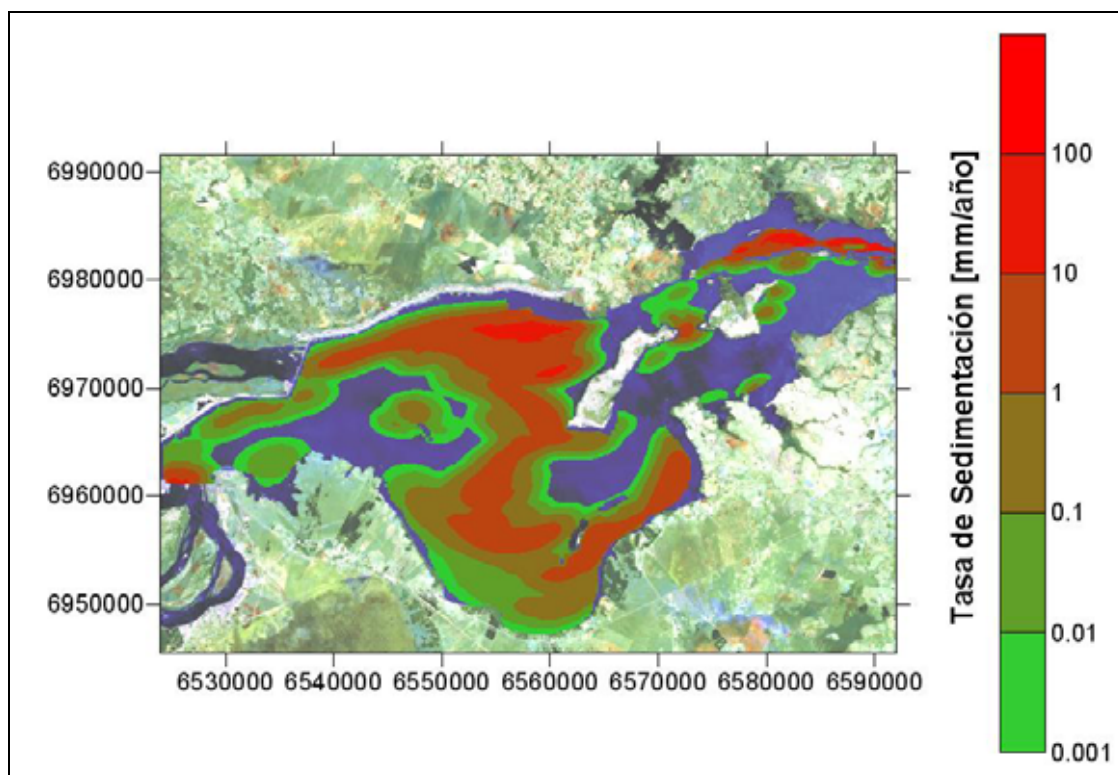


Figura 4.6.2: Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión EIII (caudal medio)

4.7 COMPARACIÓN CON RESULTADOS PREVIOS

En el informe de NHC & EVARSA (2002) se presentan resultados de distribución de concentración de sólidos suspendidos y de tasas de sedimentación, discriminados por rango de tamaños. En las figuras 4.7.1 y 4.7.2 se muestran los correspondientes a la fracción fina para un caudal de alrededor de $14000 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, muy cercano al caudal medio de $15000 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparando, respectivamente, con las figuras 4.7.3 (que se corresponde con la figura 4.2.2 pero esta vez en la misma escala de niveles que la 4.7.1) y 4.7.1 se observan fuertes discrepancias, ya que las primeras muestran que se produce sedimentación total de los finos en la zona de transición. Se considera que esas diferencias provienen de un tratamiento demasiado simplificado por parte de NHC & EVARSA para los materiales finos que, de todos modos, siendo conservativo desde el punto de vista de la sedimentación, no afecta desde el punto de vista ingenieril las conclusiones allí vertidas.

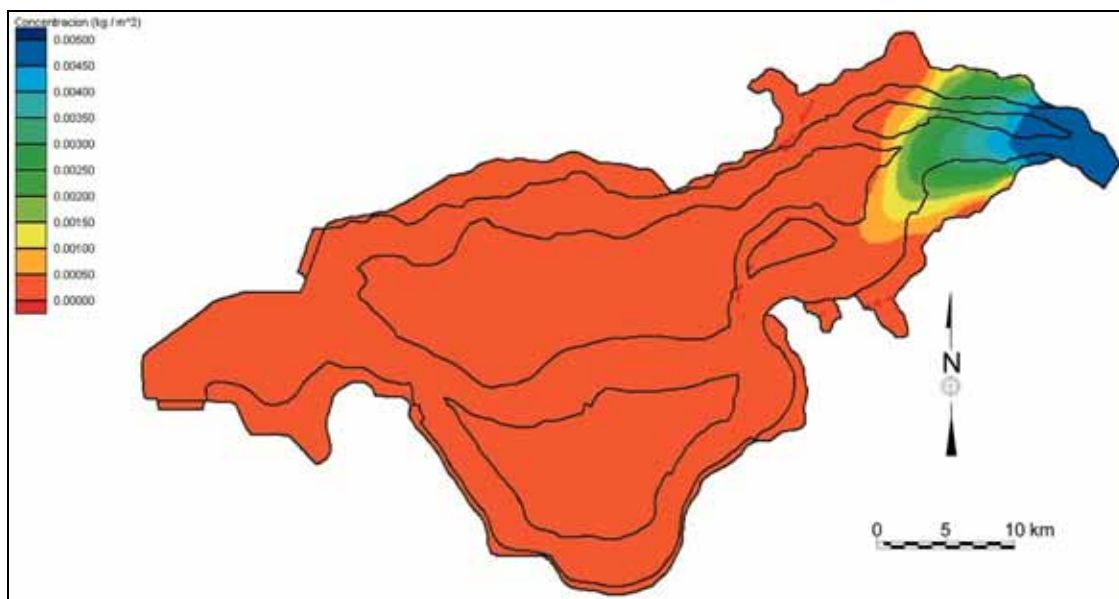


Figura 4.7.1: Distribución de concentración de sedimentos finos y un caudal de $14000 \text{ m}^3/\text{s}$, de acuerdo a NHC & EVARSA (2002)

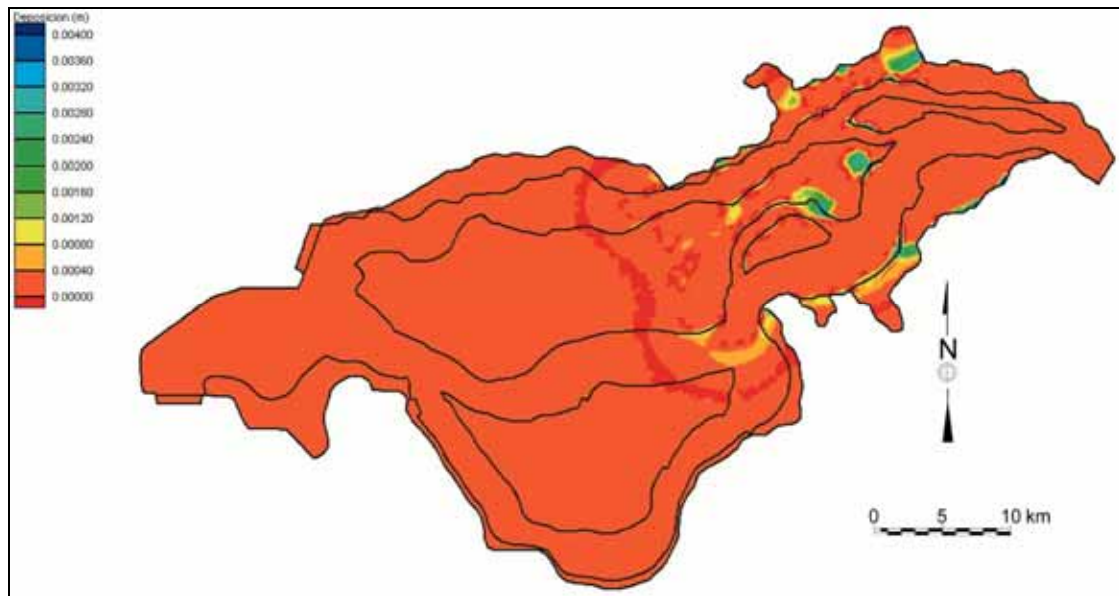


Figura 4.7.2: Distribución de tasa de sedimentación de sedimentos finos y un caudal de 14000 m³/s, de acuerdo a NHC & EVARSA (2002)

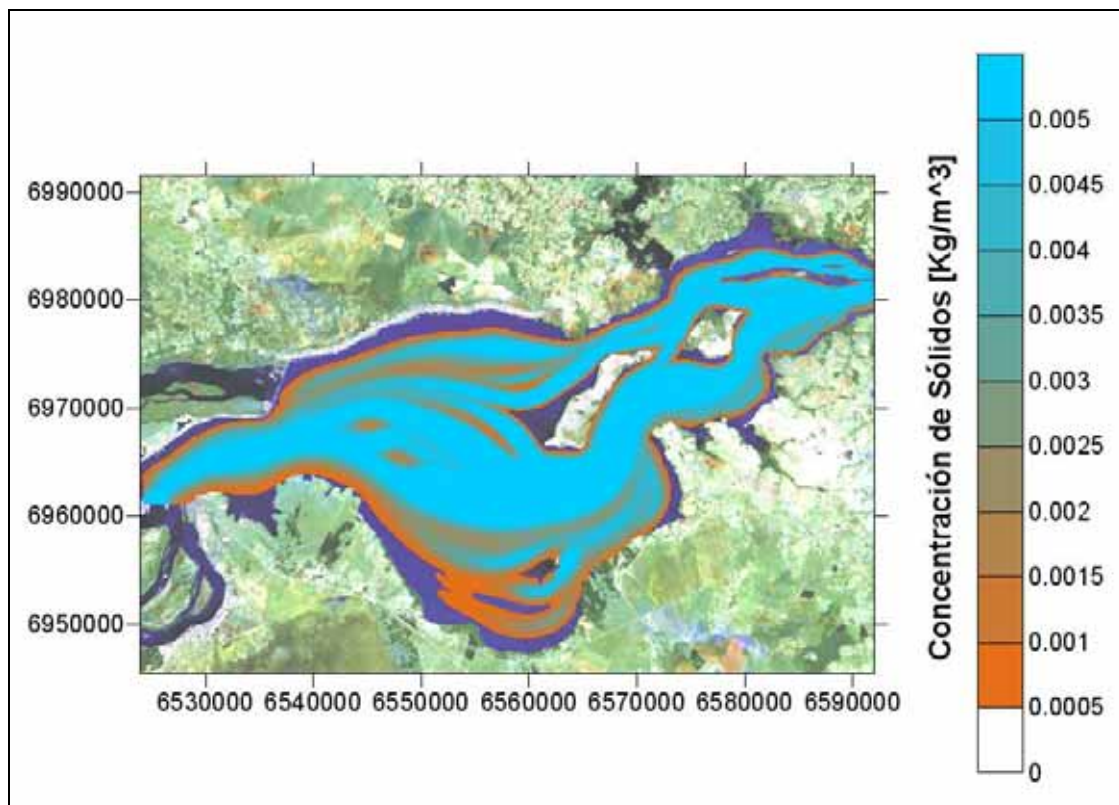


Figura 4.7.3: Distribución de sólidos en suspensión para caudal medio

5 CONCLUSIONES

El modelo de transporte de sólidos implementado para el embalse de Yacyretá es capaz de reproducir adecuadamente el balance global de sólidos que surge de los monitoreos históricos y, además, reproduce cualitativamente bien las zonas de deposición de sólidos suspendidos. En consecuencia, se lo considera una herramienta relativamente confiable como para ser utilizada como base para el transporte de contaminantes en fase particulada.

ANEXO I

“Mathematical Simulation of Pollutant Dispersion”

Patricia E. Carreras and Ángel N. Menéndez

Ecological Modelling 52 (1990)
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Ecological Modelling, 52 (1990) 29–40
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

29

Mathematical simulation of pollutant dispersion

Patricia E. Carreras and Angel N. Menéndez

*INCYTH Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA), Casilla de Correo 21,
1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina*

ABSTRACT

Carreras, P.E. and Menéndez, A.N., 1990. Mathematical simulation of pollutant dispersion.
Ecol. Modelling, 52: 29–40.

A numerical technique based on the computation of contaminant dispersion in a localized area is presented. It allows a two-dimensional description of the plume when the dispersion scale is much smaller than the hydrodynamic one. The technique was implemented in the computational system MANCHAS, developed at the LHA, and was applied to the plume generated by the sewage discharge of Buenos Aires city in the Rio de la Plata. The velocity and depth fields were achieved by the computational system HIDROBID II, also developed at the LHA. The physical parameters involved in the phenomenon, such as dispersion coefficients and time of decay, were estimated from field measurements. Some numerical tests were performed for different tides and wind velocities. It can be concluded from the results that the wind, as a generator of drift currents, is the relevant mechanism of transport of the pollutant.

INTRODUCTION

Sewage disposal, especially that of large cities, is an important problem from a technical point of view. In Argentina, in general, sewage is shed in natural streams without previous treatment, making use of the degrading capacity of flows. As a consequence, it is becoming imperative to study pollutant dispersion, taking into account that the water is being used for several purposes (drinking, fishing, recreation, etc.). As a matter of fact there is an increasing social sensitivity about the subject of environmental contamination.

In this work, a prediction technique is presented based on numerical simulation of the process of dispersion of a pollutant in a localized region, which allows a two-dimensional description of the plume when the disper-

sion scale is much smaller than the hydrodynamic one. This technique was implemented in computational programs very useful from the engineering point of view.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE DISPERSION PHENOMENON

Passive pollutants (that is to say, those which do not affect hydrodynamics) are carried by the natural motion of water. This motion can be broken down into mean and turbulent flows. The mean flow not only transports the substance but also, because of the spatial gradients (differential convection), contributes to the spreading. The turbulent flow scatters the material by a diffusive process. The combined effect of differential convection and turbulent diffusion is called dispersion.

The contaminant transport equation, in a two-dimensional description averaged over the depth, is expressed by:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) - \frac{\partial}{\partial x}\left(hk_{11}\frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(hk_{12}\frac{\partial C}{\partial y}\right) \\ - \frac{\partial}{\partial y}\left(hk_{21}\frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(hk_{22}\frac{\partial C}{\partial y}\right) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where C is the mean vertical concentration, t the time, x and y the spatial coordinates in a horizontal plane, h the water depth, u and v the velocity components in the x and y directions, respectively, and k_{11} , k_{12} , k_{21} and k_{22} the components of the dispersion tensor K .

Every contaminated region with an extension much smaller than the hydrodynamic-length scale will be called a spot. It is assumed that the mean vertical concentration of a spot has a Gaussian distribution and, as a consequence, it is described by the expression:

$$C(x, y, t) = \frac{M\sqrt{D}}{\pi h_0} \exp\left[-\left\{a_{11}(x-x_0)^2 + 2a_{12}(x-x_0)(y-y_0) + a_{22}(y-y_0)^2\right\}\right] \quad (2)$$

where M is the total mass of pollutant contained in the spot (M remains constant), x_0 , y_0 the center coordinates of the spot, $h_0 = h(x_0, y_0, t)$ the water depth in the center of the spot, a_{11} , a_{12} , a_{22} are the shape parameters, and $D = a_{11}a_{22} - a_{12}^2$ is always a positive quantity. The shape parameters define the extension and orientation of the spot.

CALCULATION OF THE SPOT EVOLUTION

The physical processes of transport and dispersion of a spot of contaminant occur simultaneously. Nevertheless, easier computations result consid-

ering them as successive in time. It is assumed that the spot conserves at every time a Gaussian concentration distribution. Hence, only the evolution of its location (characterized by x_0, y_0) and its shape parameters are computed.

Advection

Taking into account only advection, equation (1) reduces to:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

which could be rewritten as:

$$\frac{dC}{dt} = 0 \quad \text{along} \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v \quad (4)$$

where d/dt means differentiation along the trajectory of the fluid element. Equation (4) shows that the concentration remains constant along those trajectories. The resolution of this equation allows to know the new location of the center of the spot and the rotation and distortion of its shape, produced by the horizontal velocity gradients. In Menéndez (1986) the algebraic transformations which allow the computation are presented in detail.

Diffusion

If it is supposed that the water depth and the components of the dispersion tensor vary only a little over the region where the concentration gradients are significant, a hypothesis compatible with the concept of a spot, equation 1, taking into account only diffusion, reduces to:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_{11} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 2k_{12} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + k_{22} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (5)$$

The resolution of this equation simulates the diffusive effect of the turbulence and of the vertical velocity gradient. More details about the resolution appear in Menéndez (1986).

Decay

In the case of dealing with an organic pollutant, an extra effect not considered previously has to be taken into account: the concentration decay due to death. If it is supposed that this process is a first-order reaction, the

equation which describes this phenomenon (dropping advection and diffusion) is:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{C}{T_a} \quad (6)$$

where T_a is the time of decay. In general, ' T_{90} ' is specified, defined by $T_{90} = T_a \ln 10$, which represents the time elapsed to get the concentration reduced by 90%.

Numerical method

Integration of the equations presented in the previous sections is done by means of numerical methods. First, by integrating equations (4), the transport is computed. The velocity field is supposed to be known all over the computation domain, expressed by nodal values on a rectangular uniform mesh of steps Δx , Δy , as Fig. 1 shows [this velocity field comes, in general, from the numerical simulation of flows by means of a hydrodynamic model (Menéndez, 1985)]. The integration is performed cell by cell, supposing constants in every cell the components of velocity. The computed trajectory consists of a series of straight segments, so that the last point is the location of the center of the spot after time Δt , having a concentration value C_0 equal to the one it had before the transport. The computational process which was chosen presents some interesting characteristics to be discussed.

First, it is necessary to explain that, in the transport computation, the components of the velocity are considered constants not in the cells defined by the mesh (Fig. 1), but in the 'complementary' ones, as is shown in Fig. 2.

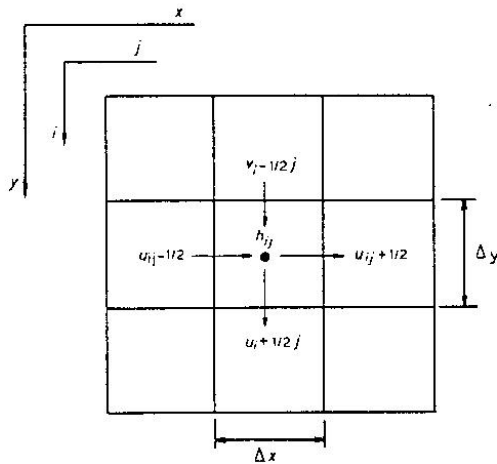


Fig. 1. Differential mesh for hydrodynamic variables.

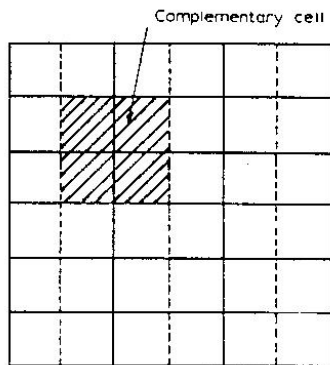


Fig. 2. Differential mesh and complementary cells.

The value of every velocity component is calculated, in general, by the average of the two closer values.

Integration over the time interval Δt requires, in general, to pass across several cells. Two cases are distinguished to determine in which cell the spot penetrates: one is when it enters from a corner and the other one when it comes across a side. The two cases receive a different treatment. When the cell is identified and the components of the velocity are determined, it is necessary to transport the spot over the cell. The time used by the spot to cross the cell has to be determined. If this time exceeds the remaining time to complete the step Δt , it means that the new location of the spot is inside that cell; in consequence, that location is computed. In the opposite case, the place where the spot leaves the cell and the time used in crossing the cell, have to be determined, (which allows the computation of the remaining time necessary to complete the step Δt).

The process of computation just described is genuinely 'two-dimensional'. From this point of view, it is an improvement over the method used by Holly and Usseglio-Polatera (1984), which broke down the transport into two 'one-dimensional' trajectories.

The rotation-distortion and diffusion computation were solved by means of traditional numerical techniques which have no special interest for this paper. Computation of the decay is trivial.

A computational program called MANCHA was developed. The results provided are the location, orientation and extension of the spot for specific times.

Time step

As mentioned previously, in the physical process under consideration several mechanisms take place, each having its own time scale. In the

calculation, it is necessary to use a time step small enough to solve accurately even the processes associated to the smallest time scale (Menéndez, 1986). The time step Δt can be chosen as:

$$\Delta t = \frac{1}{N} \min\{T_t, T_{rd}, T_{dif}, T_a\} \quad (7)$$

where T_t is the time scale related with the transient mean flow, T_{rd} with the rotation and distortion of the spot, T_{dif} with diffusion and T_a with the decay. N must be greater than 5, for accuracy reasons.

CONTINUOUS INJECTION OF CONTAMINANT

Representation of the problem

The technique described to follow a spot can be used for the simulation of a continuous injection of pollutant. This is represented by an injection of instantaneous pulses, which preserves the total mass of contaminant injected by unit of time. Every pulse generates a spot. Being a linear problem, the superimposition of the distributions of every spot gives the total distribution.

The determination of the characteristics of the initial spot generated by the injection requires a specific treatment. Theoretically, the 'near field' must be simulated. In practice, it is generated from field measurements.

Steady flow

When the flow is steady and the mass of contaminant injected by unit of time is constant, the plume of contamination can be built directly, by the superimposition of the distributions of a single spot for different times of its evolution. This means that the results provided by the program MANCHA can be used.

The total contaminant distribution, C_t , is obtained as:

$$C_t(x, y) = \sum_{j=1}^N C(x, y, t_j) \quad (8)$$

where N is the total number of time steps, and C is given by equation (2), where M , h_0 , x_0 , y_0 , a_{11} , a_{12} , a_{22} and D depend on time t_j . Moreover, $M(t_0) = q \Delta t$, where q is the shedding of contaminant.

This computational process was implemented in the program PLUMA. The graphic results are isodilution curves.

Unsteady flow

When the flow is unsteady (and/or the shedding of contaminant is not constant), every spot generated by successive pulses has a different evolution. As a consequence, it is necessary to follow all of them simultaneously.

This problem does not present difficulties, in principle, but its computational implementation is more complex. A new program called MANCHAS was developed, where the hydrodynamic information is continually kept at the corresponding time of computation. Besides, a new spot is generated after each time step. The spots may eventually leave the computational domain. Periodically, those with negligible maximum concentration are discarded so as to keep a reasonable amount of computation.

APPLICATION

The LHA, commissioned by 'Obras Sanitarias de la Nación' (Argentina) and with the participation of experts of CEDEX (Spain), applied the systems previously described for the simulation of the dispersion of the raw sewage of Buenos Aires city, shed in the Río de la Plata through a submarine outfall.

A hydrodynamic model, based on the computational system HIDROBID II (Carreras and Menéndez, 1987), was calibrated for an approximated rectangular domain of 10 km × 20 km (Fig. 3). One of the boundaries is the coastline (side AB). The opposite side, which follows a streamline, is approximately parallel to the coast (side CD). The calibration of the dispersion model for the region under study was done using measurements

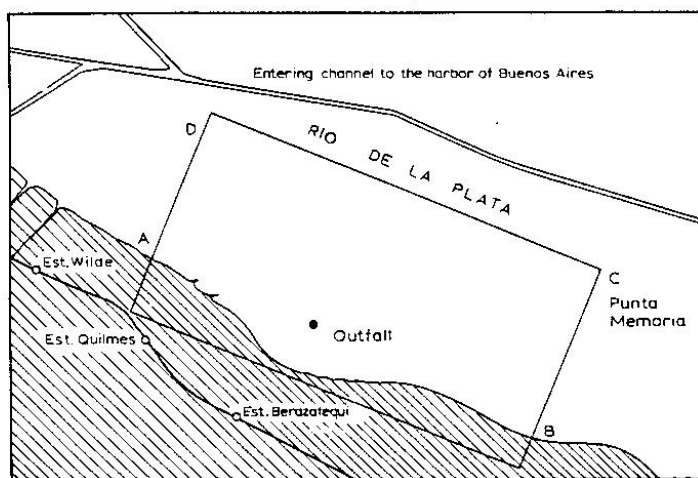


Fig. 3. Computational domain.

of the displacement of a radioactive tracer especially generated in the region close to the outfall. In this way, the values of the dispersion coefficients and the relative influence of wind and tides in the pollutant transport were defined (Carreras and Menéndez, 1988a).

Numerical experiments

To completely define a numerical experiment it was necessary to define the tide, wind and the initial spot.

With respect to tides, two cases were tested, associated with high tides with probabilities of being overcome of 50% (mean tide) and 5% (high tide), values obtained through a statistical analysis performed with tide records of Palermo station (Carreras and Menéndez, 1988b). As the highest high tides are frequently followed by ebbs of higher levels, every case considered was associated with a low tide with a probability of not being overcome of 50% and 5%, respectively. Using these data, fictitious sinusoidal waves were generated to be used as boundary conditions in the hydrodynamic model. The waves are shown in Fig. 4.

In relation to winds, it was determined that its influence is determinant in the pollutant transport. In all cases it was supposed that the wind persisted, with a constant intensity, all along the modelling time period (12 h), which did not result in a very strong restriction.

Another important aspect of the present formulation is the definition of the initial spot. Its mass M is shed by the outfall during the time step Δt , that is to say:

$$M = q \Delta t \quad (9)$$

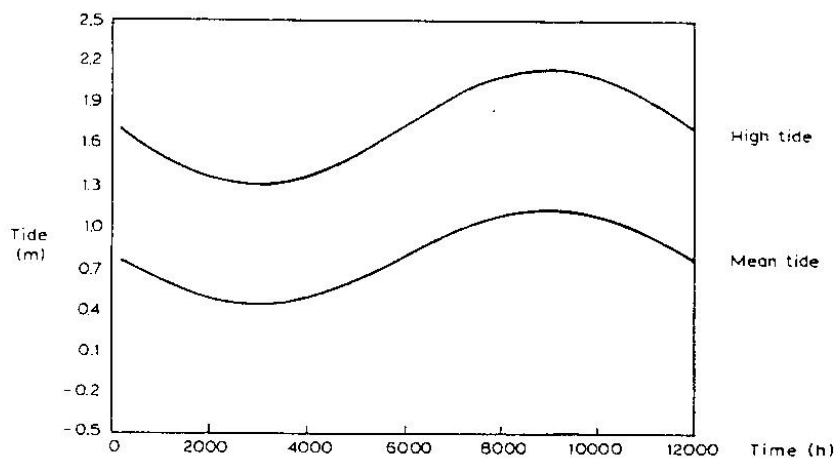


Fig. 4. Sinusoidal waves (boundary conditions).

POLLUTANT DISPERSION

37

where $q = QC_e$ is the solid discharge, Q is the liquid discharge and C_e the concentration of pollutant in the outfall. The liquid discharge is $Q = 27 \text{ m}^3/\text{s}$; the concentration was considered unitary at the emissary. The orientation and dimensions (standard deviations σ_x and σ_y) of the initial spot were defined from field measurements, through extrapolations based on diffusion formulas.

The initial spots results perfectly determined in this way. Nevertheless, it is important to point out that the problem of the 'near field', which involves three-dimensional mechanisms which determine the contaminant dilution in the vicinity of the outfall, was not considered. As a consequence, the computed concentrations only have significance when they are expressed as relative values.

Pollutant plume

The hydrodynamic model provided results for the two sinusoidal waves previously defined as boundary conditions and for meteorological situations of calm (without winds) and with a S.E. wind of 25 km/h. This was chosen as one of the directions of interest for the study because of the importance of very well known S.E. storms ('sudestadas') in the Rio de la Plata.

A time of decay (T_{90}) of 5 h was assumed, based on field estimations. The transversal dispersion coefficient was fixed in its standard value $e_t = 0.23$, while a value $e_l = 20$ was supposed for the longitudinal dispersion coefficient, as was obtained from calibration (Carreras and Menéndez, 1988a). It

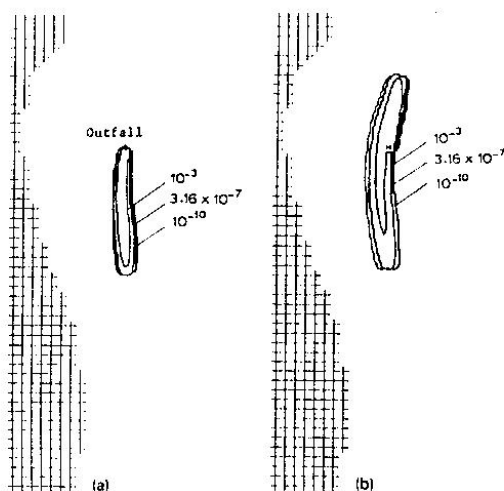


Fig. 5. Isodilution curves – high tide without winds: (a) $T = 4 \text{ h}$; (b) $T = 10 \text{ h}$.

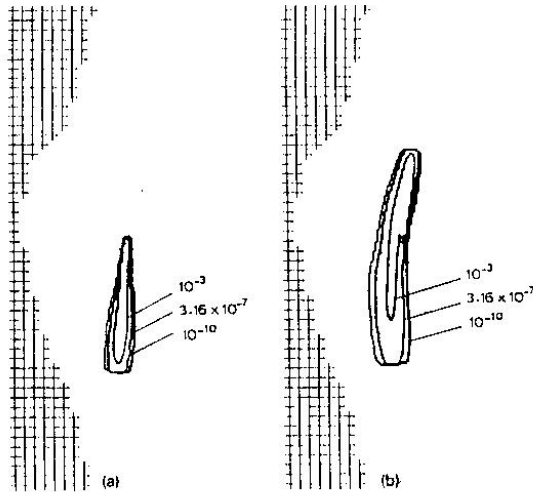


Fig. 6. Isodilution curves – mean tide without winds: (a) $T = 4$ h; (b) $T = 10$ h.

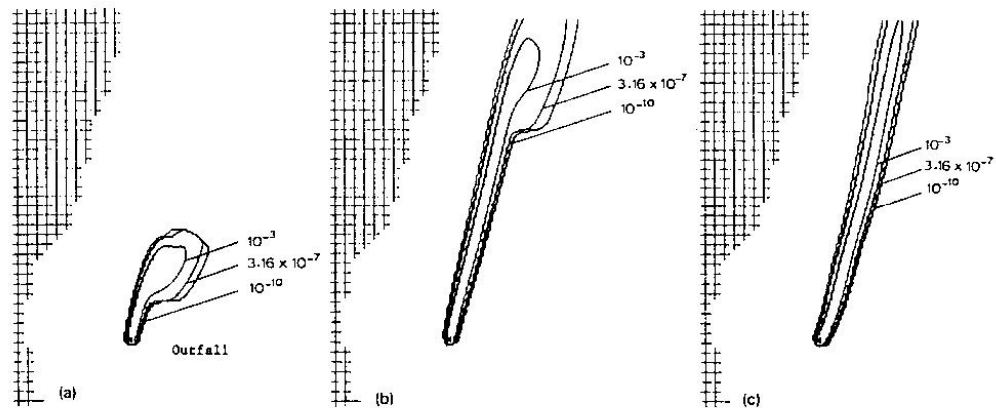


Fig. 7. Isodilution curves – high tide; S.E. wind, 25 km/h: (a) $T = 7$ h; (b) $T = 10$ h; (c) $T = 13$ h.

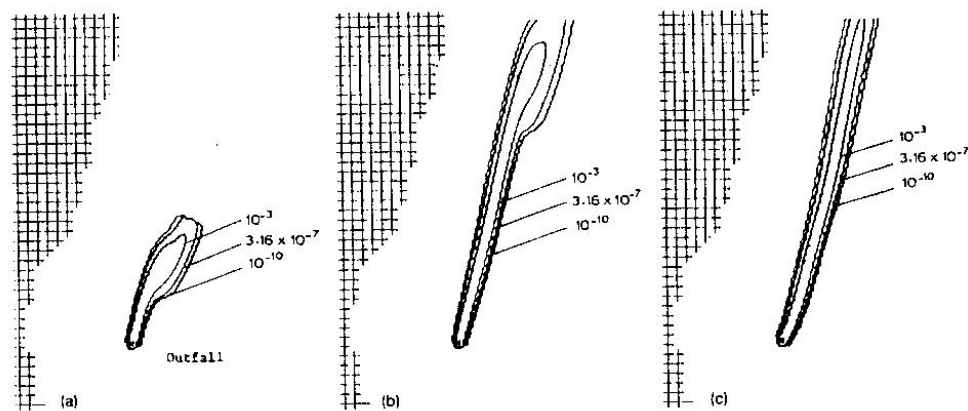


Fig. 8. Isodilution curves – mean tide; S.E. wind 25 km/h; (a) $T = 7$ h; (b) $T = 10$ h; (c) $T = 13$ h.

POLLUTANT DISPERSION

39

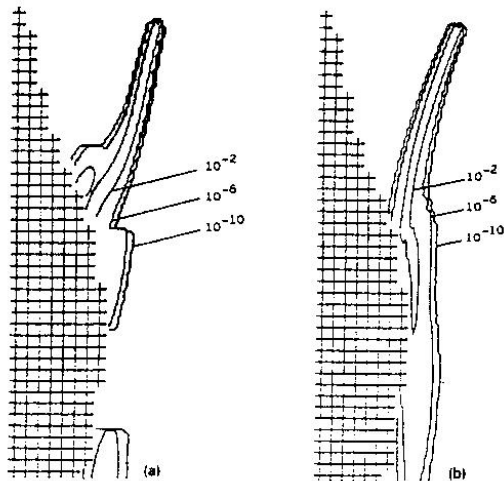


Fig. 9. Isodilution curves - mean tide; N.W. wind 25 km/h; (a) $T = 7$ h; (b) $T = 13$ h.

was assumed a value of 0.55, as Wu (1983) suggested, for the coefficient A of the formula for computing the drift current caused by wind.

The pollutant plumes for high and mean tides and without winds are presented in Figs. 5 and 6. Comparing the results for the same instants, it is observed that the contaminated regions are similar, though the transversal diffusion is a little stronger for the condition of high tide.

Figures 7 and 8 show the evolution of the plume for the condition of high and mean tides, with a wind intensity of 25 km/h. It can be seen that the pollutant is always transported towards the N.W. direction owing to drift currents. The stronger transversal diffusion observed at the end of the plume is produced during the ebb interval.

We also tested the condition of mean tide with a N.W. wind of 25 km/h, which causes important contamination along the coast, as can be seen in Fig. 9.

CONCLUSIONS

An elaborate but powerful technique, used to simulate the dispersion of pollutants in a free surface flow, was implemented in computational systems which constitute useful tools for engineering diagnosis. Its application to the problem of the raw sewage discharge in the Rio de la Plata will allow a diagnostic about the impact over water quality and, eventually, the analysis about alternative structures in order to control that impact.

REFERENCES

- Carreras, P.E. and Menéndez, A.N., 1987. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelo matemático hidrodinámico. Rep. LHA-INCYTH 070-002-88.
- Carreras, P.E. and Menéndez, A.N., 1988a. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelos matemáticos de dispersión de contaminantes. Rep. LHA-INCYTH 070-003-88.
- Carreras, P.E. and Menéndez, A.N., 1988b. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Informe final del modelo matemático de dispersión de contaminantes. Rep. LHA-INCYTH 070-004-88.
- Holly, F.M. and Usseglio-Polatera, J.M., 1984. Dispersion simulation in two-dimensional tidal flow. *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 110: 905-926.
- Menéndez, A.N., 1985. Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre. Rep. LHA-INCYTH S5-016-85.
- Menéndez, A.N., 1986. Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas. Rep. LHA-INCYTH 066-01-86.
- Wu, J., 1983. Sea surface drift currents induced by wind and waves. *J. Physical Ocean.*, 13: 1441-1451.

REFERENCIAS

1. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2003, *Modelación hidrodinámica del embalse de Yacyretá*, Informe INA-LHA 01-224-03, mayo.
2. Vautard, R., P. Yiou, and M. Ghil, 1992: Singular Spectrum Analysis: A toolkit for short, noisy, chaotic time series. *Physica D*, volume 38, pp. 74-95
3. Vautard, R., and M. Ghil, 1989, *Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series*. *Physica D*, vol. 35, pp. 395-424.
4. Broomhead, D. and King, G., 1986, *Extracting qualitative dynamics from experimental data*. *Physica D*, 20, 217-236
5. Broomhead, D.S., and G. King, 1986, *On the qualitative analysis of experimental dynamical systems*, in *Nonlinear Phenomena and Chaos*, S. Sarkar (Ed.), Adam Hilger, Bristol, 113-144.
6. Myles Allen, Mike Dettinger, Kayo Ide, Dmitri Kondrashov, Michael Ghil, Mike Mann, Andrew W. Robertson, Amira Saunders, Ferenc Varadi, Yudong Tian, and Pascal Yiou, 2002, SSA-MTM Group, UCLA. (<http://www.atmos.ucla.edu/tcd/ssa/index.html>)
7. Menéndez, A.N., 1986, *Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas*, Informe INA-LHA 066-01-86, diciembre.
8. NHC & EVARSA, 2002, *Estudios de Sedimentación Para Actualizar la Definición de la Vida Útil Del Embalse del Complejo Hidroeléctrica Yacyretá*.