

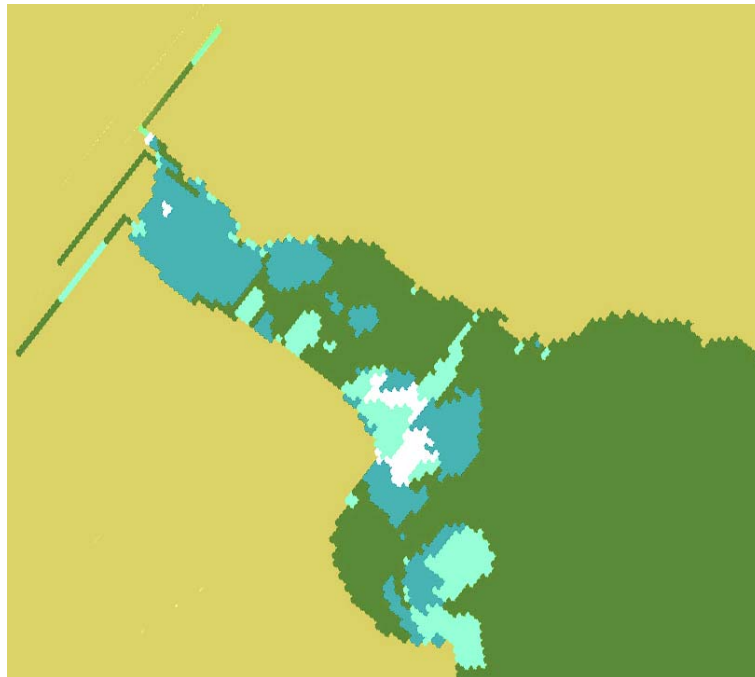


INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

DINÁMICA DE SEDIMENTOS BAJO CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS NORMALES



*Proyecto LHA 296
Informe LHA 07-296-11
Ezeiza, Febrero de 2011*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mariano RE

Martín SABAROTS GERBEC

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mag. Mariano RE

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata
DINÁMICA DE SEDIMENTOS BAJO CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS
NORMALES

Informe

Mariano Re y Ángel N. Menéndez

RESUMEN

Se presentan los ensayos realizados con el modelo hidro-sedimentológico del Río de la Plata con la versión 6.25 del Sistema de Modelación MARS-3D. A partir de estos resultados se efectúa una interpretación de la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata Interior bajo condiciones hidrometeorológicas normales.

Descriptores temáticos: Modelación Sedimentológica, MARS-3D.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Argentina, Uruguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	ELEMENTOS PARA LA CALIBRACIÓN	3
2.1	Datos para la calibración	3
2.2	Parámetros de calibración	6
2.2.1	Velocidad de caída	7
2.2.2	Tensiones críticas de erosión y deposición	7
2.2.3	Coefficiente de erosibilidad	8
3	MODELACIÓN	9
3.1	Condiciones de los ensayos	9
3.2	Resultados	10
3.3	Análisis de resultados	29
4	CONCLUSIONES	38

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31: "Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats" ha encomendado al INA su participación en un grupo de trabajo binacional que tiene por finalidad la instrumentación de un modelo hidrodinámico y sedimentológico para el Río de la Plata, que permita mejorar los conocimientos sobre los aportes sedimentarios en su cauce y obtener la información necesaria para optimizar la gestión en la zona de estudio. El grupo está conformado por personal del Servicio de Hidrografía Naval – SHN (RA), del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera – CIMA (RA), del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero - INIDEP (RA), del Instituto Nacional del Agua - INA (RA), y del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada – SOHMA (ROU), contando además con la colaboración del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar – IFREMER (*Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer*).

En el Primer Informe (LHA 01-296-08, junio de 2008) se presentó el Plan de Trabajo del INA. En el Segundo Informe (LHA 02-296-08, agosto de 2008) se describió la dinámica general de los sedimentos. En el Tercer Informe (LHA 03-296-09, agosto de 2009) se planteó un modelo conceptual de flujo de sedimentos en el Río de la Plata Interior, y se desarrolló la metodología para la determinación de las cargas sólidas de los tributarios. En el Cuarto Informe (LHA 04-296-10, septiembre de 2010) se presentó la implementación del modelo hidrodinámico y una validación realizada a partir de observaciones de velocidades de corriente y niveles. En el Quinto Informe (LHA 05-296-10, octubre de 2010) se mostraron los resultados de un análisis de sensibilidad de distintas variables respecto de la interacción del viento con la superficie. En el Sexto Informe (LHA 06-296-11, noviembre de 2010) se presentó la implementación del modelo sedimentológico en el Río de la Plata y su Frente Marítimo. En este Séptimo informe, en base a la explotación del modelo sedimentológico, se desarrolla una interpretación de la dinámica de los sedimentos en el Río de la Plata Interior bajo condiciones hidrometeorológicas normales.

2 ELEMENTOS PARA LA CALIBRACIÓN

2.1 Datos para la calibración

La calibración del modelo se realizó a partir de las series de datos sobre concentraciones de material en suspensión correspondientes a las siguientes mediciones (Figura 2.1):

- A lo largo de los canales de navegación, a cargo de las empresas de dragado Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging durante Marzo y Abril de 1992 (concentración total de sedimentos en suspensión y diámetro medio d_{50})
- En cortes transversales, presentados por Ottmann y Urien (1966)
- En los puntos de observación de la Campaña 1 FREPLATA-FFEM desarrollada del 23 al 28 de noviembre de 2009.

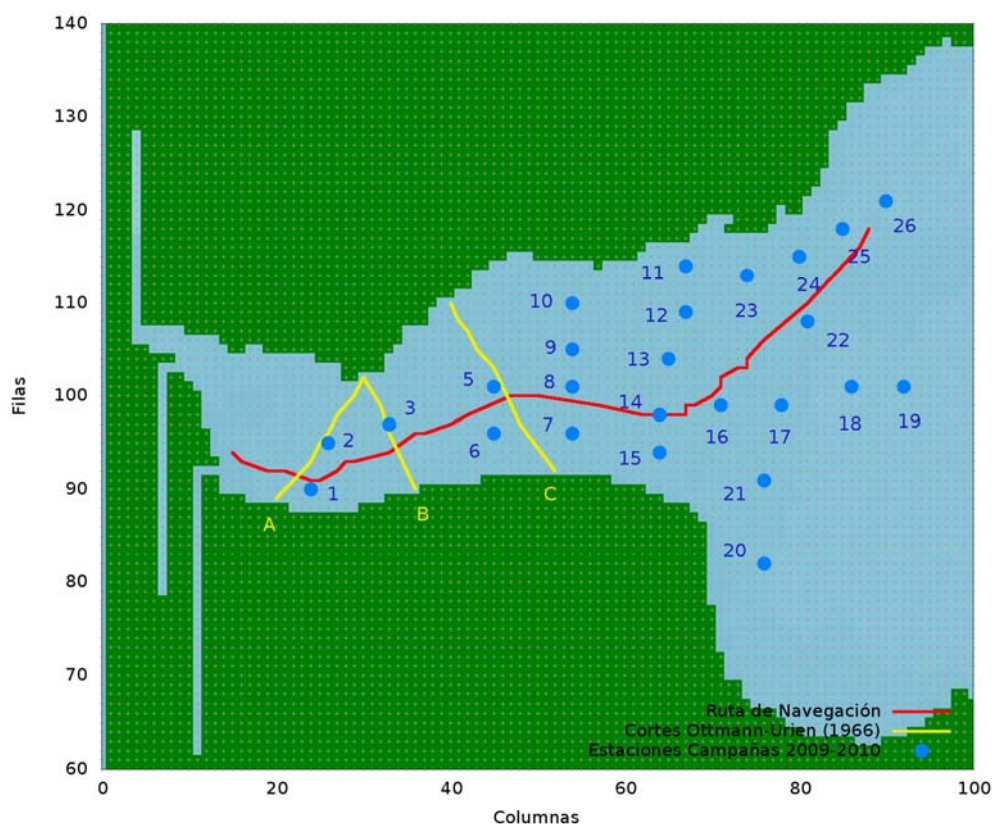


Figura 2.1 Ubicación de secciones y puntos de muestreo de las concentraciones de sedimentos en suspensión utilizados para la validación.

Las mediciones de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992) se realizaron en cuatro períodos de distintas duraciones. El conjunto de datos se presenta en la Figura 2.2. Se destaca que ellas fueron llevadas a cabo bajo condiciones hidrometeorológicas normales, como se deduce de los niveles en Buenos Aires durante las fechas de la campaña (Figura 2.3).

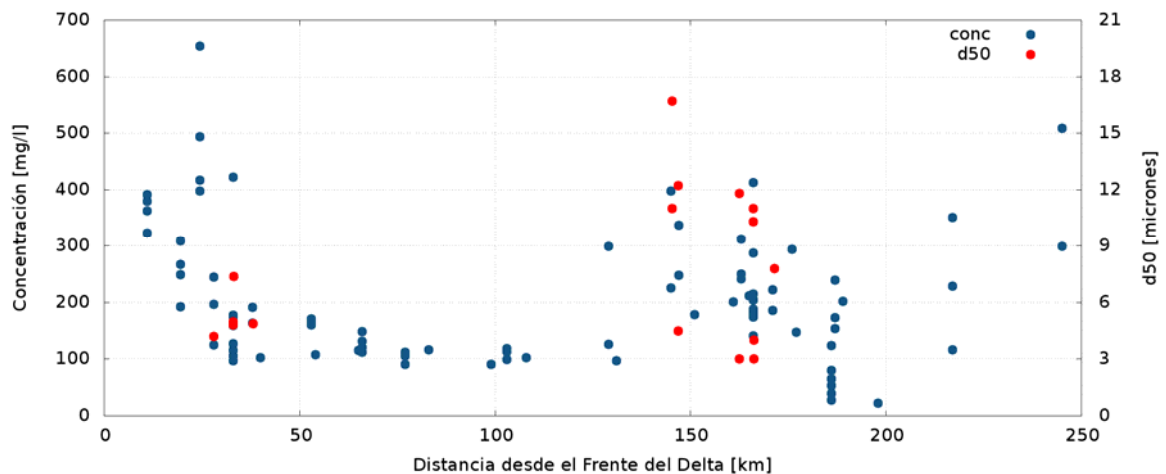


Figura 2.2 Mediciones de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992).

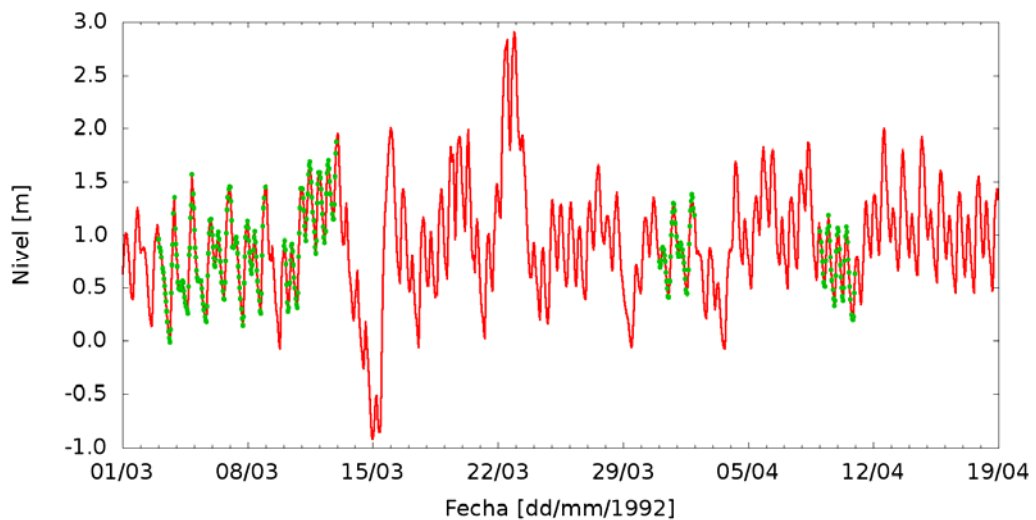


Figura 2.3 Niveles del Río de la Plata observados en Buenos Aires. Marzo- Abril 1992.

Los datos de las mediciones efectuadas por Ottmann y Urien (1966) se muestran en la Figura 2.4. Se observa una tendencia decreciente desde la costa argentina hacia la uruguayana. Además, nótese que la mezcla vertical en esas secciones puede considerarse como completa; el alto valor de concentración de fondo que aparece en el corte La Plata – Colonia no se considera representativo de condiciones medias, así que se ha descartado a los fines de la comparación. Los tres cortes son presentados en Ottmann y Urien (1966) con información acerca de la intensidad y dirección de los vientos durante las observaciones (todas asociadas a condiciones meteorológicas normales): 10 m/s (N) para Buenos Aires – Colonia, 10 m/s (N) para La Plata – Colonia, y 2 a 10 m/s (NE) para Atalaya – Puerto Sauce.

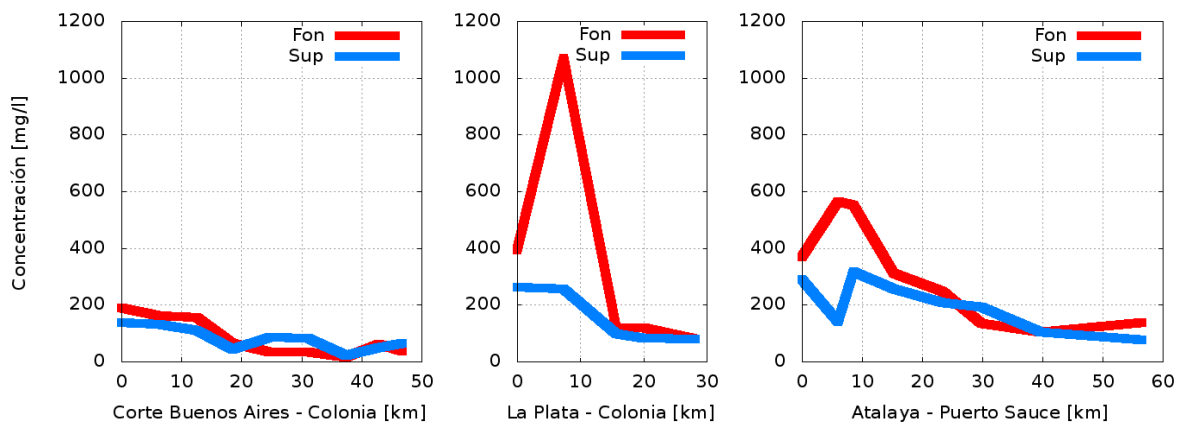


Figura 2.4 Sedimentos en suspensión. Cortes Ottmann y Urien (1966).

La Figura 2.5 presenta los valores observados de concentración de sedimentos en suspensión durante la Campaña 1 FREPLATA-FFEM. Los valores de las estaciones de control 1, 5, 14, 16 y 22 (ubicados en cercanías de la ruta de navegación, menos de 6000 m) se comparan con las mediciones de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992) en la Figura 2.6, destacándose la consistencia de los mismos.

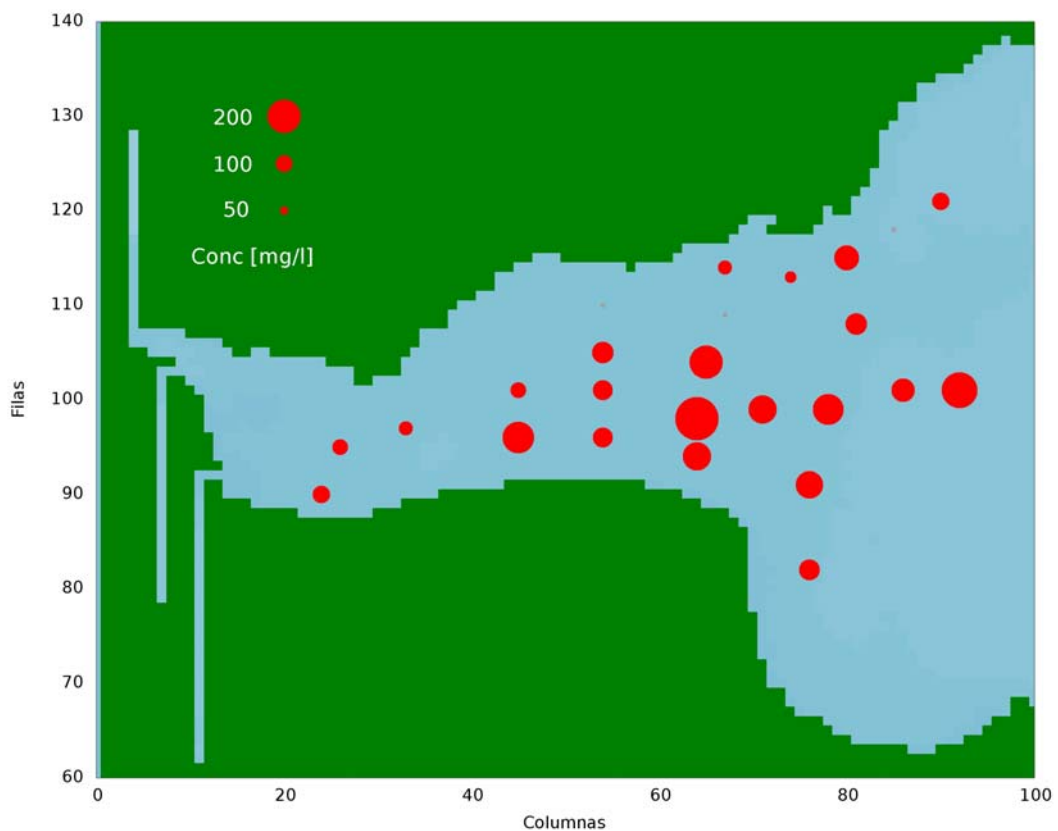


Figura 2.5 Campaña 1 FREPLATA-FFEM. 25-28 Noviembre 2009.

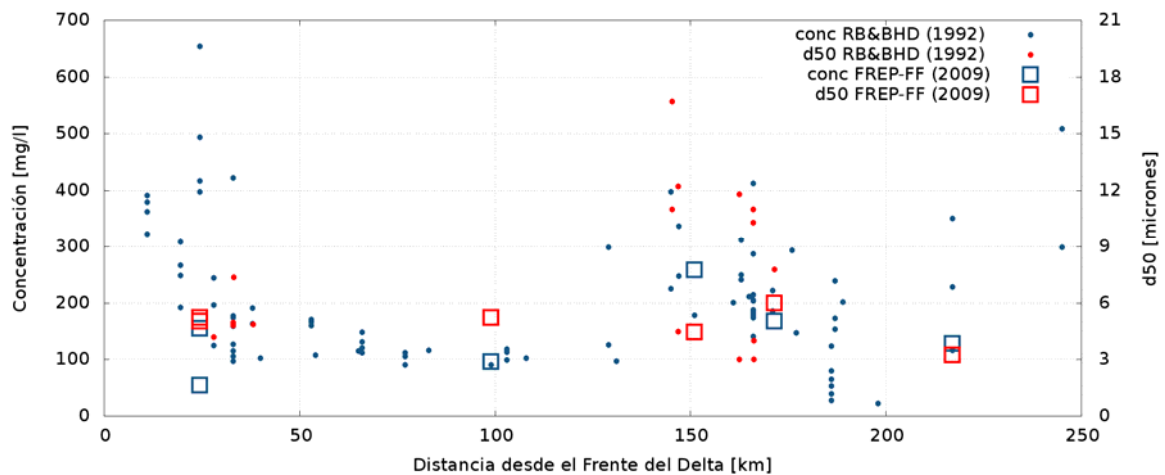


Figura 2.6 Comparación de resultados de las campañas de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992) y Campaña 1 FREPLATA-FFEM (2009).

2.2 Parámetros de calibración

La tasa de sedimentación, DEP [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], se calcula a partir de la expresión generalizada de Krone (1962), en donde para partículas finas en un cuerpo de agua en movimiento se considera una función probabilidad de deposición ψ

$$DEP = C \cdot W_s \cdot \psi$$

con

$$\psi = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_{cr,d}}\right) & \text{si } \tau < \tau_{cr,d} \\ 0 & \text{si } \tau \geq \tau_{cr,d} \end{cases}$$

donde C es la concentración, W_s la velocidad de caída del sedimento, τ la tensión de corte del escurrimiento y $\tau_{cr,d}$ la tensión de corte crítica de deposición. La concentración y la tensión de corte son calculadas por el modelo, mientras que la velocidad de caída (relacionada con el tamaño de las partículas) y la tensión de corte crítica, si bien se estiman criteriosamente, se los ajusta como parámetros de calibración.

La tasa de erosión, ERO [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], se calcula mediante la formulación de Parthenaides (1962), considerando una función de probabilidad de erosión:

$$ERO = E_0 \left(\frac{\tau}{\tau_{cr,e}} - 1 \right) \quad \text{si } \tau \geq \tau_{cr,e}$$

$$ERO = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_{cr,e}$$

donde E_0 es la erosibilidad ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), τ la tensión de corte del escurrimiento y $\tau_{cr,e}$ la tensión de corte crítica de erosión. La tensión de corte la calcula el modelo, mientras que la

erosibilidad (relacionada con el estado de consolidación del sedimento de fondo) y la tensión crítica, si bien se estiman criteriosamente, se consideran parámetros de calibración.

2.2.1 Velocidad de caída

La velocidad de caída de los sedimentos (W_s) es el parámetro que permite distinguir las distintas variables sedimentarias entre sí (tipos de sedimentos) en MARS-3D. El sistema fue forzado con sedimentos finos, que son los que se transportan en suspensión. Se consideraron tres opciones de velocidad de caída: la formulación planteada por Le Hir et al. (2001), en función de la concentración, y dos opciones de velocidad constante calculadas según la fórmula de van Rijn (1984) en función del tamaño de grano medio de los sedimentos (d_{50}): 0.025 mm/s ($d_{50} = 5\mu\text{m}$), y 0.075 mm/s ($d_{50} = 9\mu\text{m}$) (Figura 2.7).

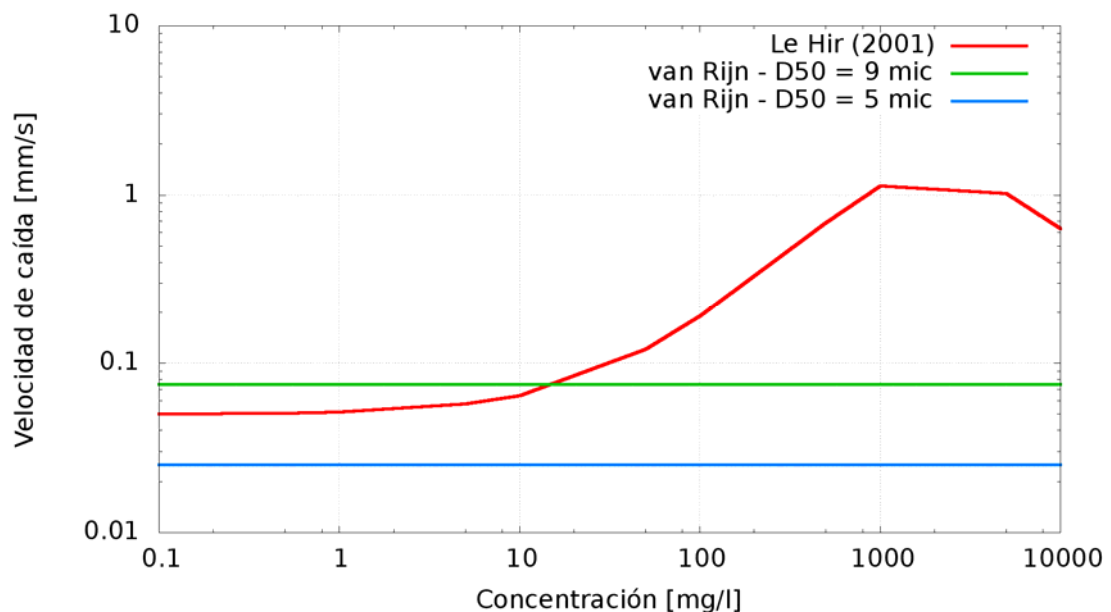


Figura 2.7 Velocidades de caída de los sedimentos finos del Río de la Plata utilizadas para la modelación.

2.2.2 Tensiones críticas de erosión y deposición

En los trabajos antecedentes sobre modelación sedimentológica en el Río de la Plata Interior desarrollados en el INA – tal como se informa en FIUBA (1999), Menéndez y Castellano (2000a, 2000b), Menéndez (2001), y Menéndez y Sarubbi (2007)) – los valores de tensiones críticas de erosión y deposición utilizados se basaron en el trabajo de Harrison y Owen (1971), en el que se estudió el caso particular de los limos del río Támesis (Inglaterra) mediante ensayos de laboratorio, estimándose las siguientes velocidades de corte críticas de erosión y deposición:

$$u_{cr,e} = 18 \text{ mm/s} \quad (\tau_{cr,e} = 0.324 \text{ N/m}^2)$$

$$u_{cr,d} = 8 \text{ mm/s} \quad (\tau_{cr,d} = 0.064 \text{ N/m}^2)$$

EGASAT (1978), mediante ensayos en un erosímetro con muestras de suelos no perturbadas, obtuvo valores de tensión crítica de erosión para los sedimentos de la zona del Canal Costanero, cerca del puerto de Buenos Aires, ubicándose en el rango 0,000 – 0,150 N/m². Warner et al. (2005) y Chen y Sanford (2009) propusieron $\tau_{cr,e} = 0.050$ N/m². Le Hir et al. (2007) obtuvieron tensiones críticas de erosión en el rango de 0,100 - 1,000 N/m² para barros en consolidación y en el rango 1,000-10,000 N/m² para barros consolidados. Vanhonacker (2004) utiliza el valor 15 mm/s para la velocidad de corte crítica de erosión. Soulsby (1997) propone valores en función del d_{50} del sedimento (por ejemplo, 0,100 N/m² para $d_{50} = 100$ μ m).

2.2.3 Coeficiente de erosibilidad

La referencia más citada respecto de los valores del coeficiente de erosibilidad es van Rijn (1993), en donde indica que el rango informado en la literatura se extiende desde 1×10^{-5} a 40×10^{-5} kg.m⁻².s⁻¹.

En el estudio de impacto ambiental sedimentológico del puente Buenos Aires – Colonia sobre el Río de la Plata (FIUBA, 1999), el coeficiente de erosibilidad E_0 fue utilizado como un parámetro de calibración, de modo de lograr que la tasa de erosión media anual balanceara la tasa de deposición media anual, resultando un valor de valor $11,24 \times 10^{-5}$ kg.m⁻².s⁻¹, valor consistente con el rango indicado por van Rijn (1993).

De los ensayos de EGASAT (1978) surgieron valores muy altos de este factor, en el rango de 100 a 5500×10^{-5} kg.m⁻².s⁻¹, estimándose que éstos podrían deberse a condiciones de menor consolidación, ya que se trata de una zona con deposiciones relativamente recientes, o a perturbaciones de las muestras analizadas.

Algunas otras referencias se detallan en la Tabla 2.1, y en Krestenitis et al. (2006) se puede encontrar una minuciosa revisión.

Tabla 2.1 Valores del Coeficiente de erosibilidad

<i>Coeficiente de Erosibilidad [kg.m⁻².s⁻¹]</i>	<i>Referencias</i>
2×10^{-5}	Courmalt (1971)
2×10^{-3}	Harrison y Owen (1971)
$1 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-2}$	EGASAT (1978)
$1 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-4}$	van Rijn (1993)
5×10^{-3}	Unclest y Smith (2005)
1×10^{-3}	Xu et al. (2010)

3 MODELACIÓN

3.1 Condiciones de los ensayos

Las simulaciones fueron realizadas con la versión 6.25 del Sistema de Modelación MARS3D. La ventana temporal simulada corresponde a la totalidad del año 2002. Solo se tuvieron en cuenta las descargas de sedimentos finos en el Río de la Plata. Las series de descargas sólidas fueron generadas según la metodología presentada en Re et al. (2009).

Las condiciones iniciales en la composición del material de fondo se tomaron a partir del trabajo de López Laborde y Nagy (1999), siguiendo el Triángulo Textural (Shepard, 1954). Los tipos de variables sedimentarias que componen el fondo son: 1) Arenas Finas (*Sables Fins* – Sedimentos Gruesos) y 2) Limos (*Vases* – Sedimentos Finos).

Los parámetros sedimentológicos que debieron ser especificados para las simulaciones son los siguientes:

- *Velocidad de caída del sedimento en suspensión:* Se utilizaron las dos opciones anteriormente descritas: la formulación dependiente de la concentración y dos valores constantes (0.025 mm/s y 0.075 mm/s)
- *Constante de erosibilidad:* Se utilizó $E_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ [kg.m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$.
- *Tensión crítica de deposición:* Se utilizó el valor $\tau_{cr,d} = 0.1 \text{ N/m}^2$ para todos los ensayos.
- *Tensiones críticas de erosión:* Para los casos en que se consideró erosión, se trabajó con los valores $\tau_{cr,e} = 0.50 \text{ N/m}^2$ – considerado un extremo superior –, 0.15 N/m^2 – valor obtenido de EGASAT (1978) –, y 0.30 N/m^2 – valor ampliamente utilizado en diversos trabajos en el Río de la Plata (Harrison y Owen, 1971).
- *Capa inicial de sedimentos de fondo:* Dado que no se considera consolidación, se incluyó una única capa de 0.15 m de espesor.

En la Tabla 3.1 se indican las tensiones críticas consideradas para los cuatro ensayos realizados. Nótese que para el ensayo ERO 0 no se incluye erosión.

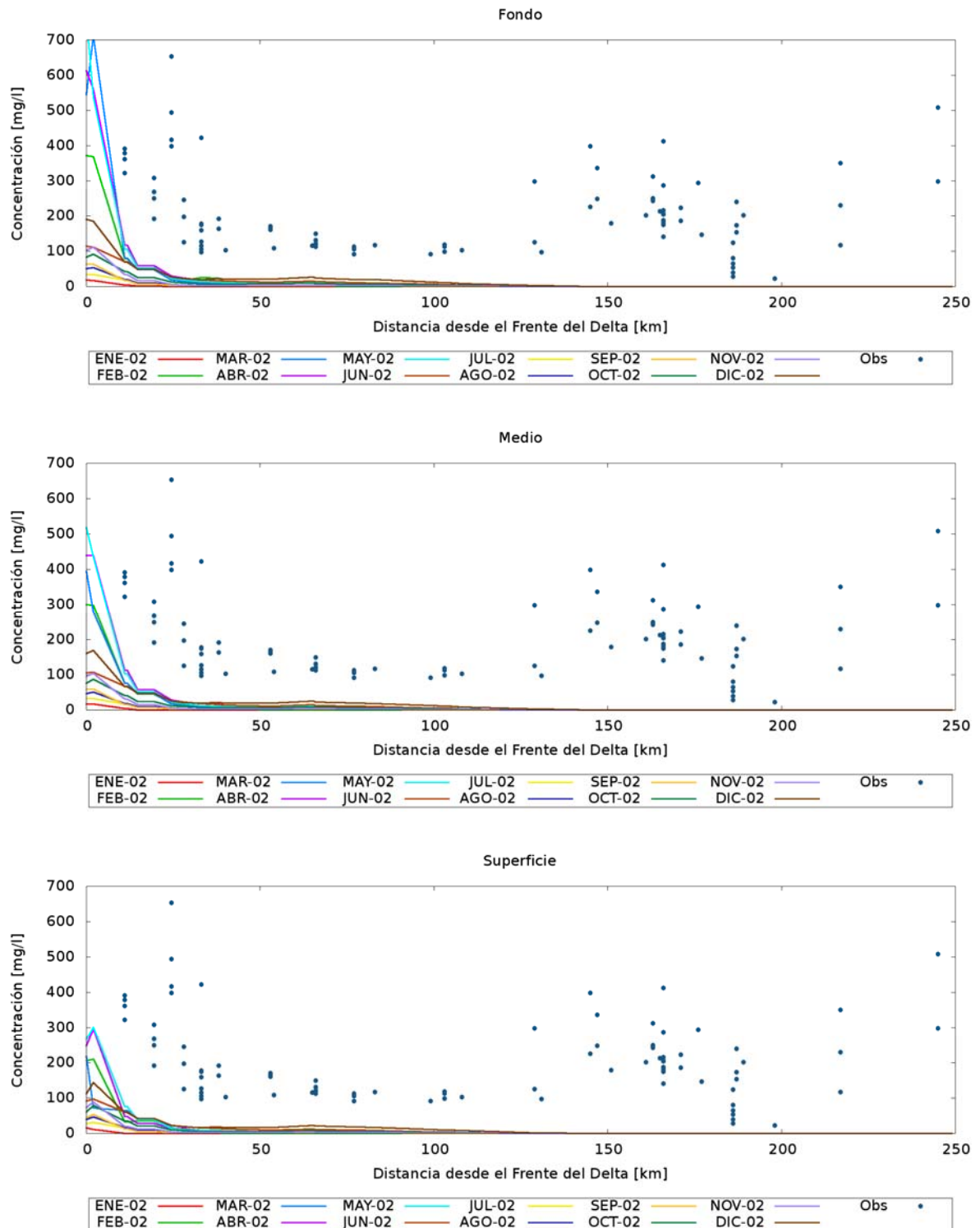
Tabla 3.1 Denominación del ensayo según las tensiones críticas de deposición y erosión

Ensayo	Tensión crítica de erosión – $\tau_{cr,e}$ [N/m^2]	Tensión crítica de deposición – $\tau_{cr,d}$ [N/m^2]
ERO 0	-	0.10
ERO 1	0.50	0.10
ERO 2	0.15	0.10
ERO 3	0.30	0.10

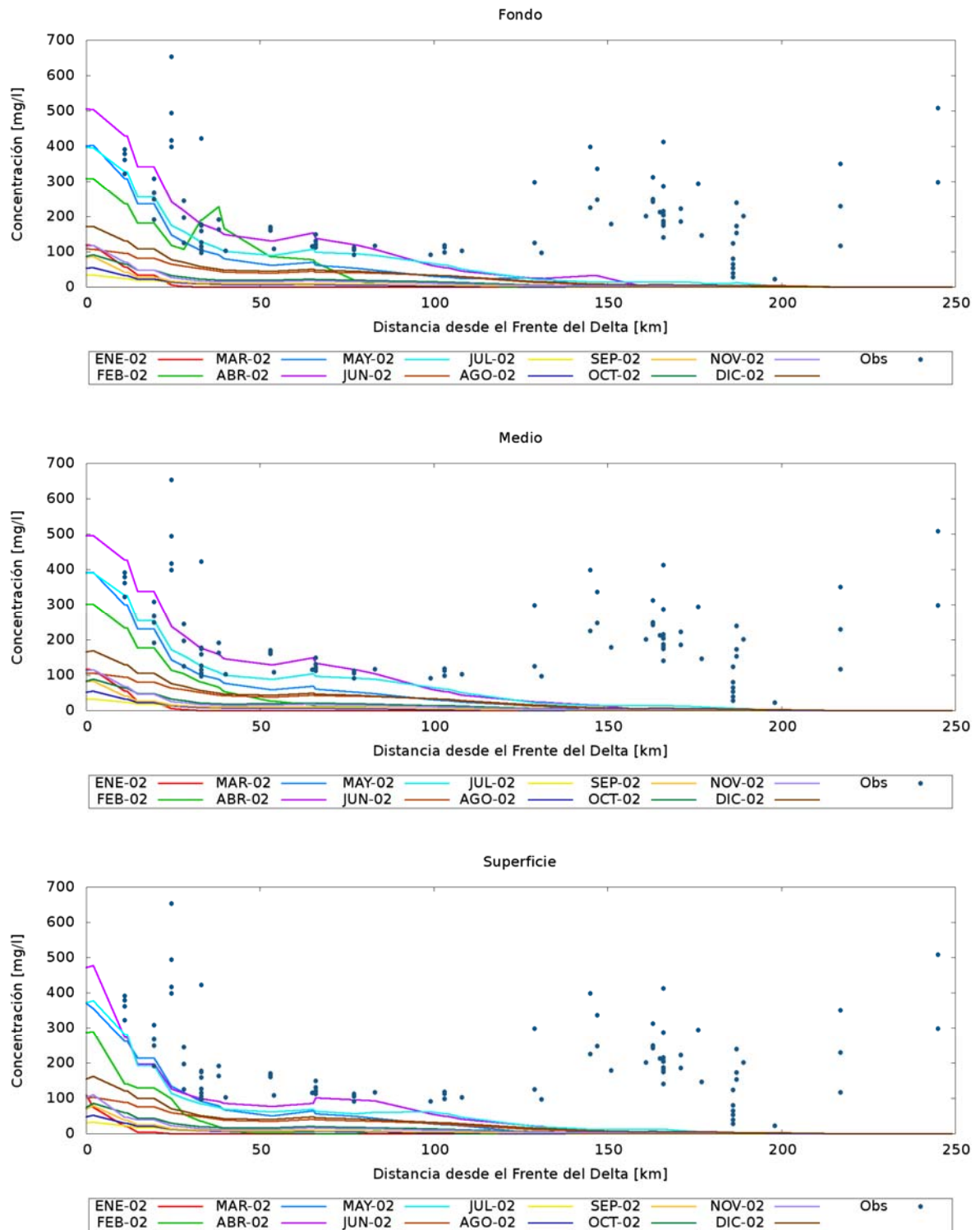
Se tomó como ventana temporal de simulación todo el año 2002. No se incluyó la acción del viento, lo que principalmente se manifiesta en la ausencia de bajantes y crecientes extraordinarias. La decisión de modelar un año entero se tomó para considerar la estacionalidad de la descarga de sedimentos finos proveniente del tributario principal (río Paraná).

3.2 Resultados

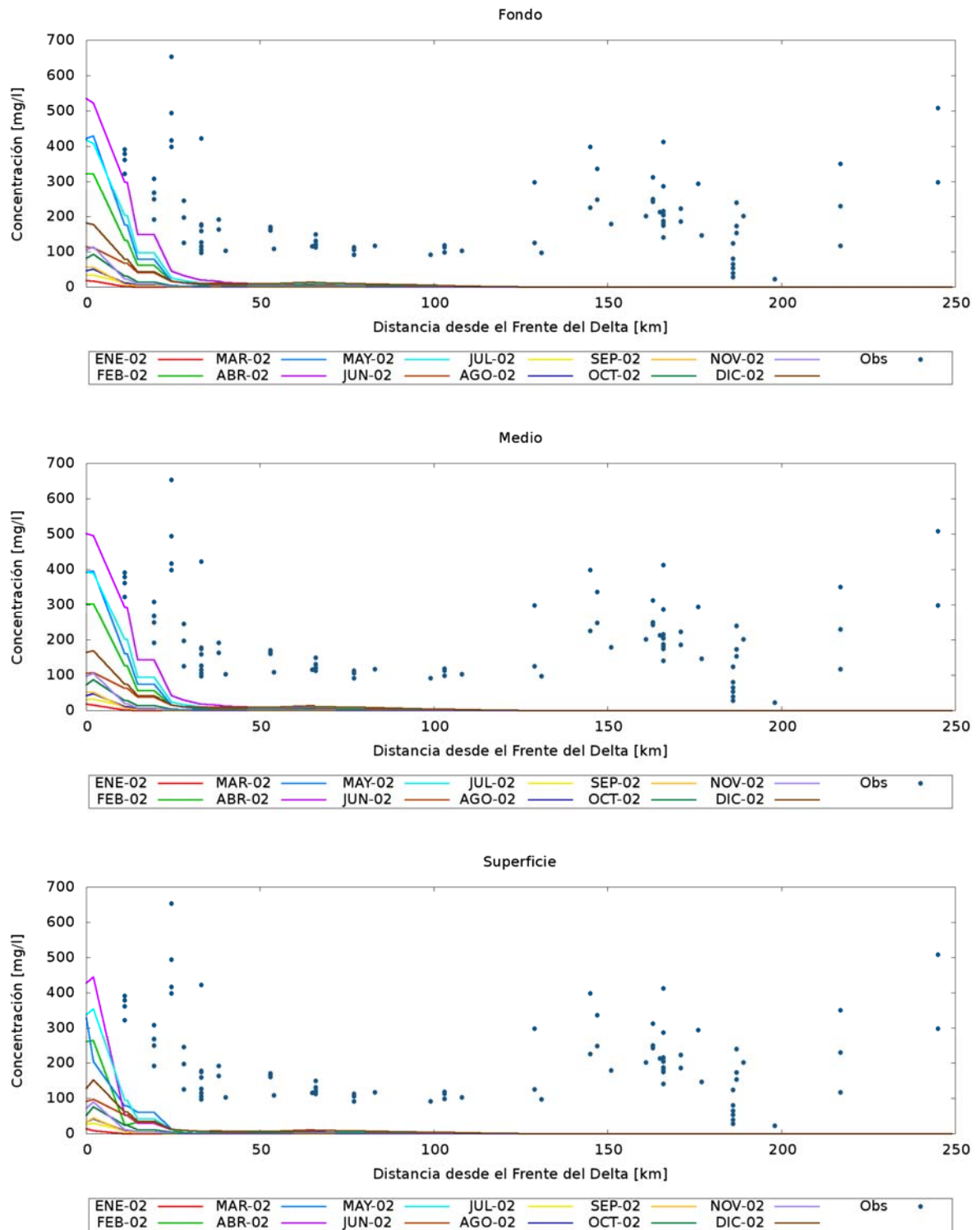
La Figura 3.1 muestra la distribución de concentraciones de sedimento en suspensión, a tres profundidades, a lo largo de la ruta de navegación para los distintos ensayos numéricos, y se la compara con los valores de Royal Boskalis y Ballast Ham Dredging (1992). La primera batería de ensayos (ERO 0), en donde no se considera el proceso erosivo, permite destacar las diferencias en el mecanismo de deposición en función de la velocidad de caída de sedimento que se considere. La formulación dependiente de la concentración (Figura 3.1a) muestra una caída brusca de las concentraciones, indicando una deposición de prácticamente la totalidad de lo suspendido en los primeros 30 km. Un comportamiento similar, pero con concentraciones en suspensión diferentes, se observa en el caso de la velocidad de caída constante relacionada con un $d_{50} = 9 \mu m$ (Figura 3.1 c). En cambio, la velocidad de caída relacionada con $d_{50} = 5 \mu m$ representa satisfactoriamente el decaimiento de las concentraciones de sedimentos en suspensión en los primeros 120 km desde el Frente del Delta del río Paraná. Un comportamiento similar al anteriormente descrito se observa para la batería de ensayos ERO 1 (Figuras 3.1d, e y f), donde, a pesar de haberse habilitado la opción de erosión, la tensión crítica de erosión es tan grande ($0.50 N/m^2$) que prácticamente no permite erosionar en ningún tramo de la ruta de navegación. Lo mismo ocurre con los ensayos ERO 3 (Figuras 3.1i y j), ya que la tensión crítica de erosión de $0.30 N/m^2$ tampoco permite erosionar. En los ensayos ERO 2 se observa la actuación del mecanismo erosivo (Figuras 3.1g y h), advirtiéndose una zona de erosión en la ruta de navegación, entre los km 130 y 200 aproximadamente, que produce un aumento de las concentraciones de sedimento consistente con las observaciones. En estos se ensayos se pone en evidencia la sensibilidad de los resultados a la velocidad de caída del sedimento y la tensión crítica de erosión. Resulta claro que el mejor acuerdo se obtiene para una velocidad de caída de 0.025 mm/s y una tensión crítica de erosión de $0.15 N/m^2$. De hecho, en este caso el acuerdo es bastante satisfactorio para los meses de marzo y abril, que son los correspondientes a las mediciones, y que están asociados al período en que hay mayor aporte de sedimentos suspendidos desde el río Paraná. Los valores relativamente altos de concentración que se producen al final se consideran que están asociados a sedimentos de origen oceánico.



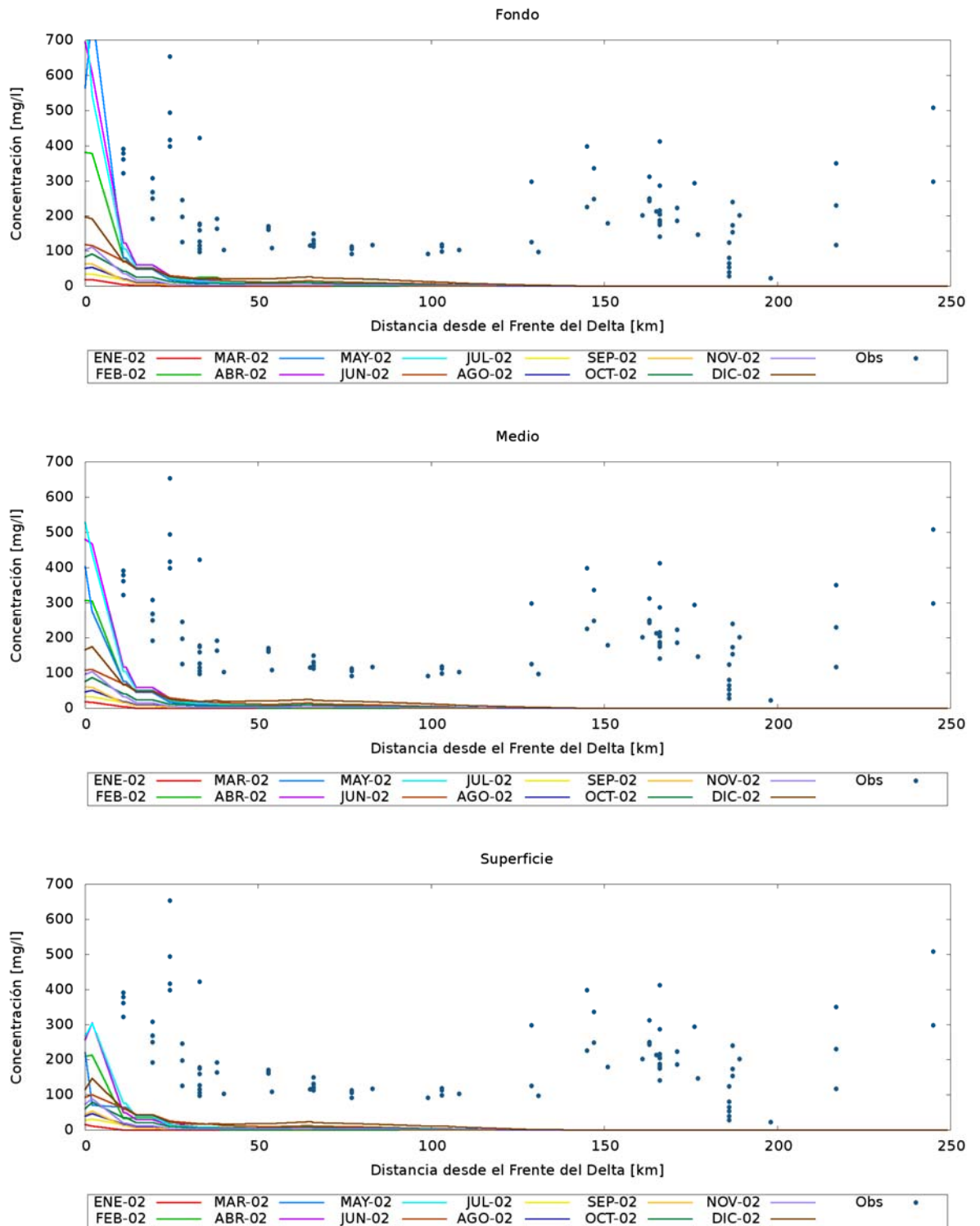
a) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída función de la concentración



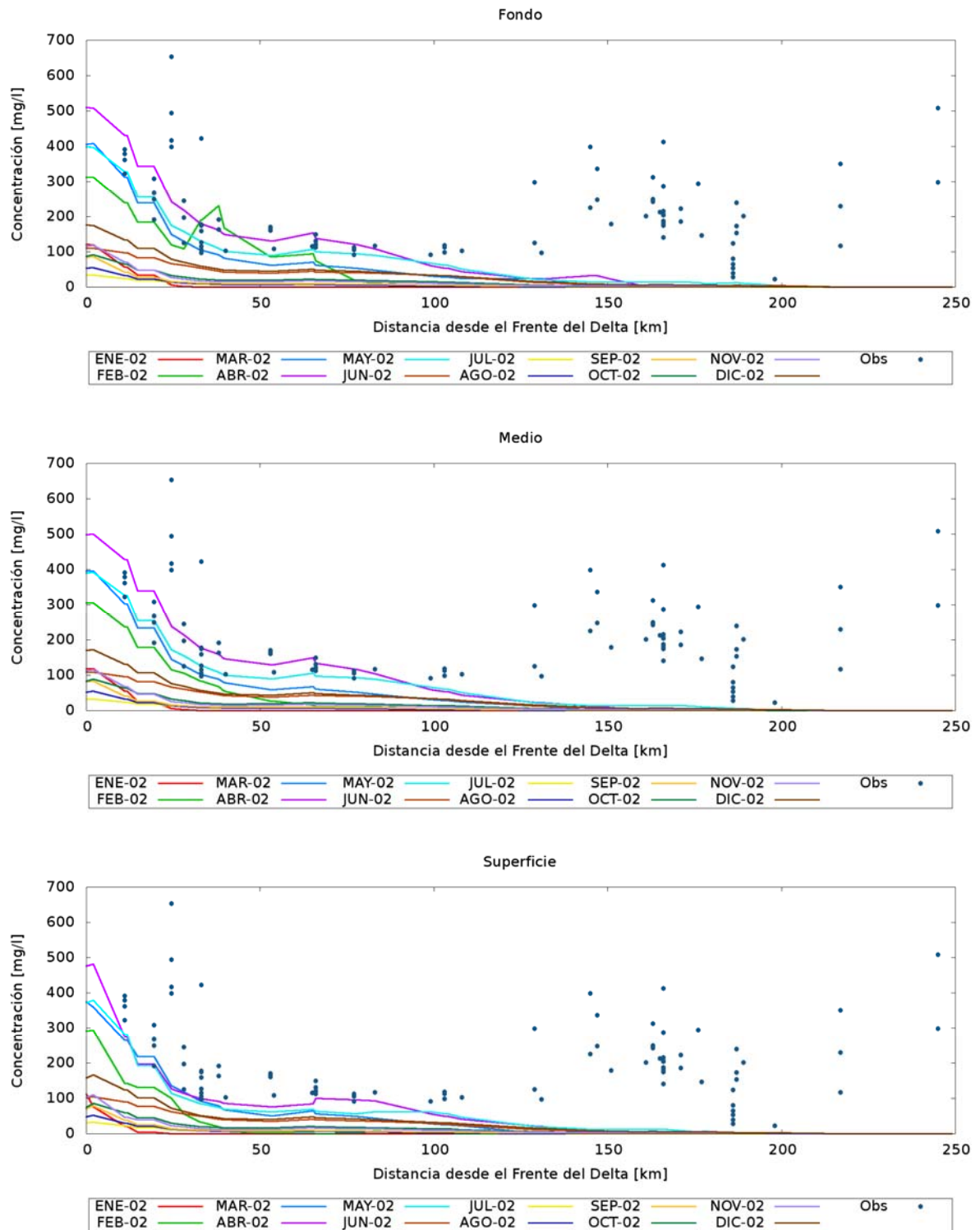
b) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



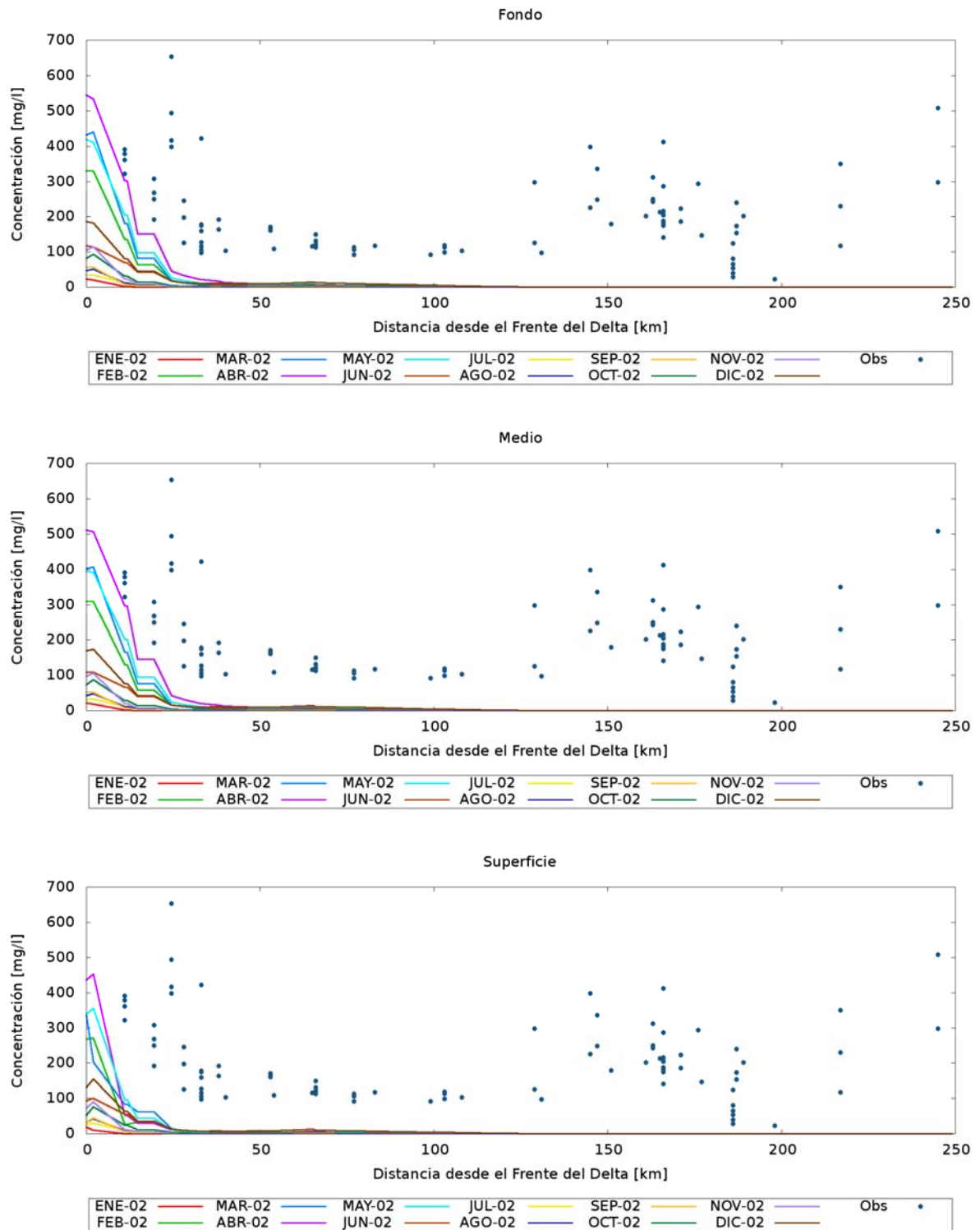
c) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



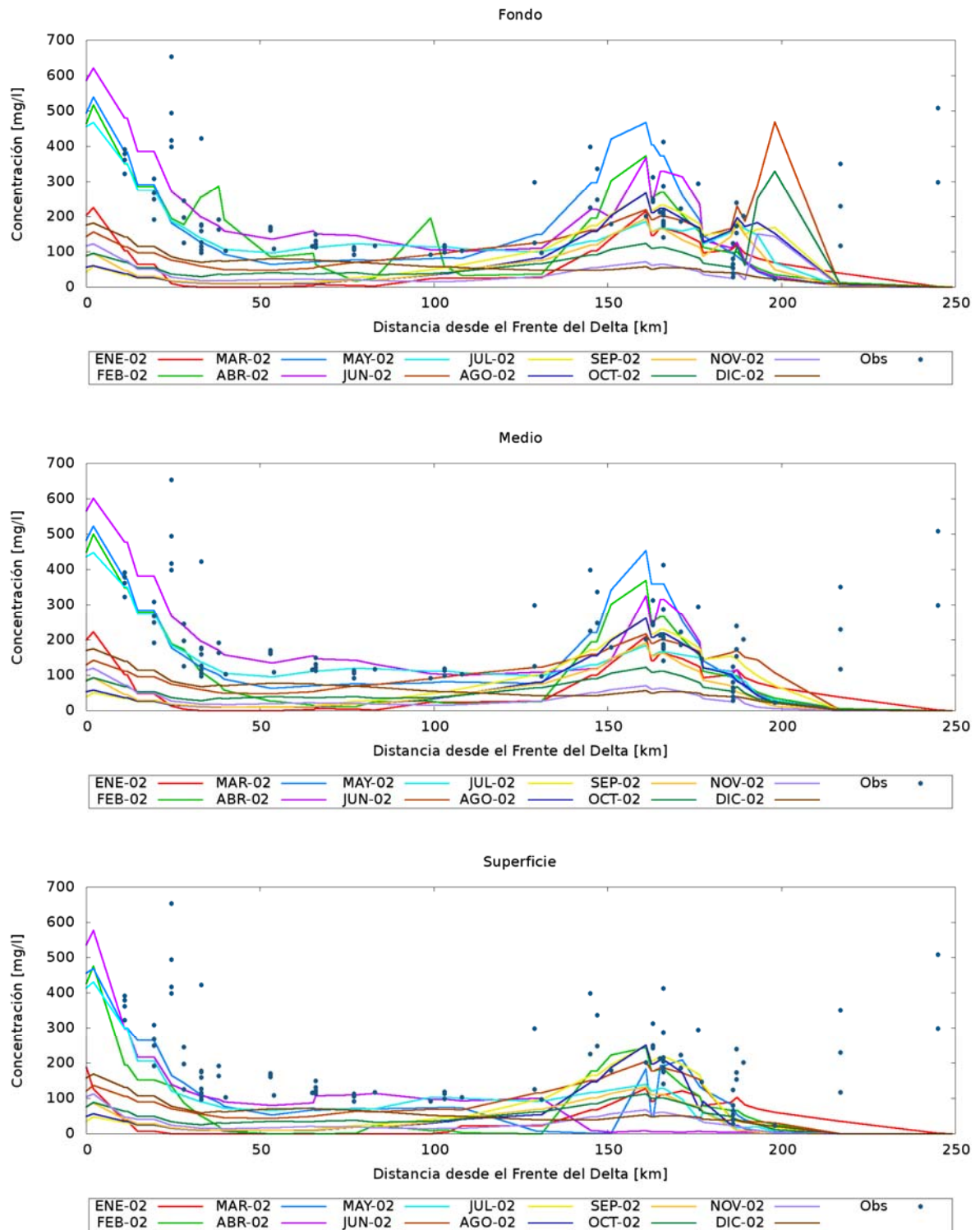
d) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída función de la concentración



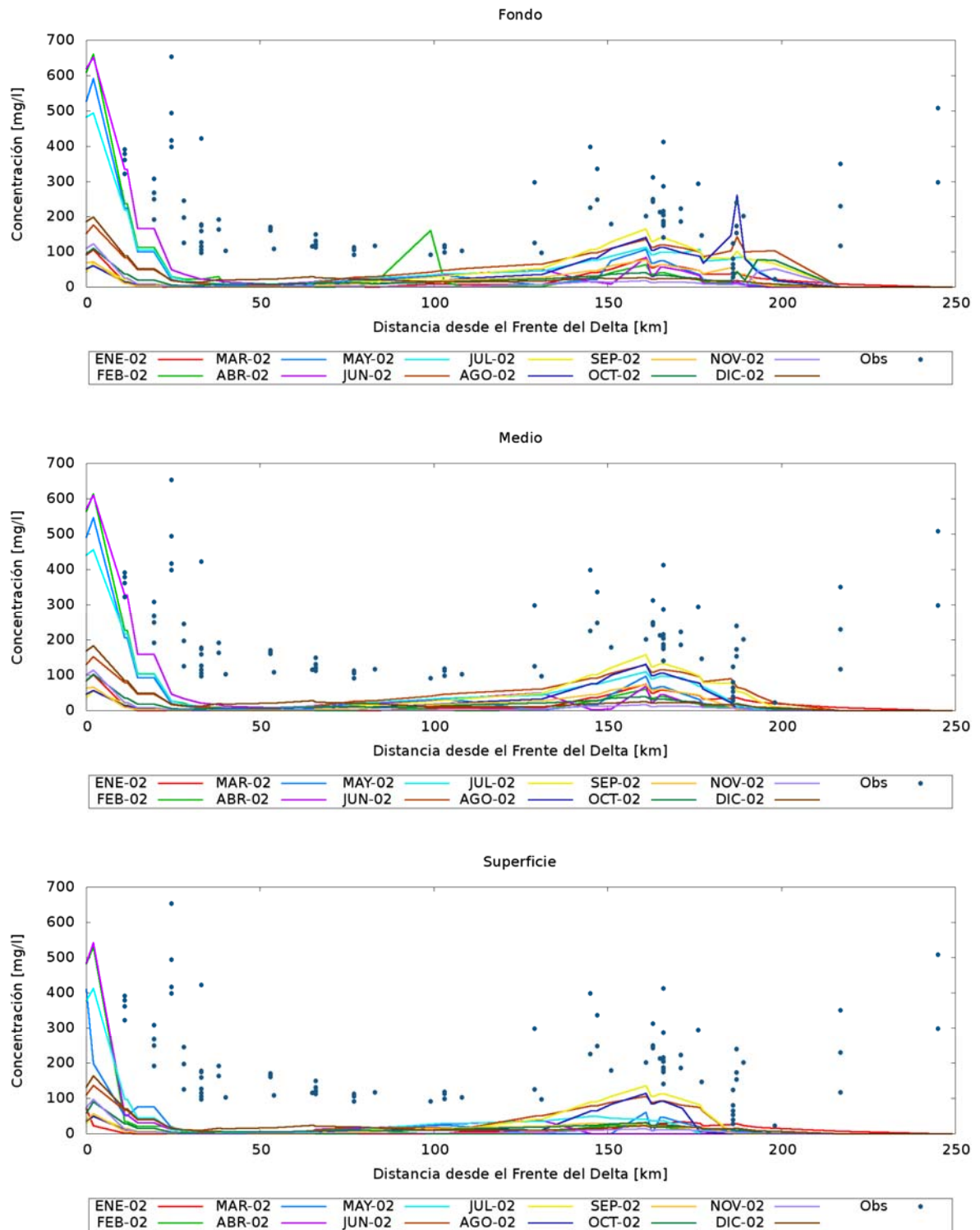
e) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



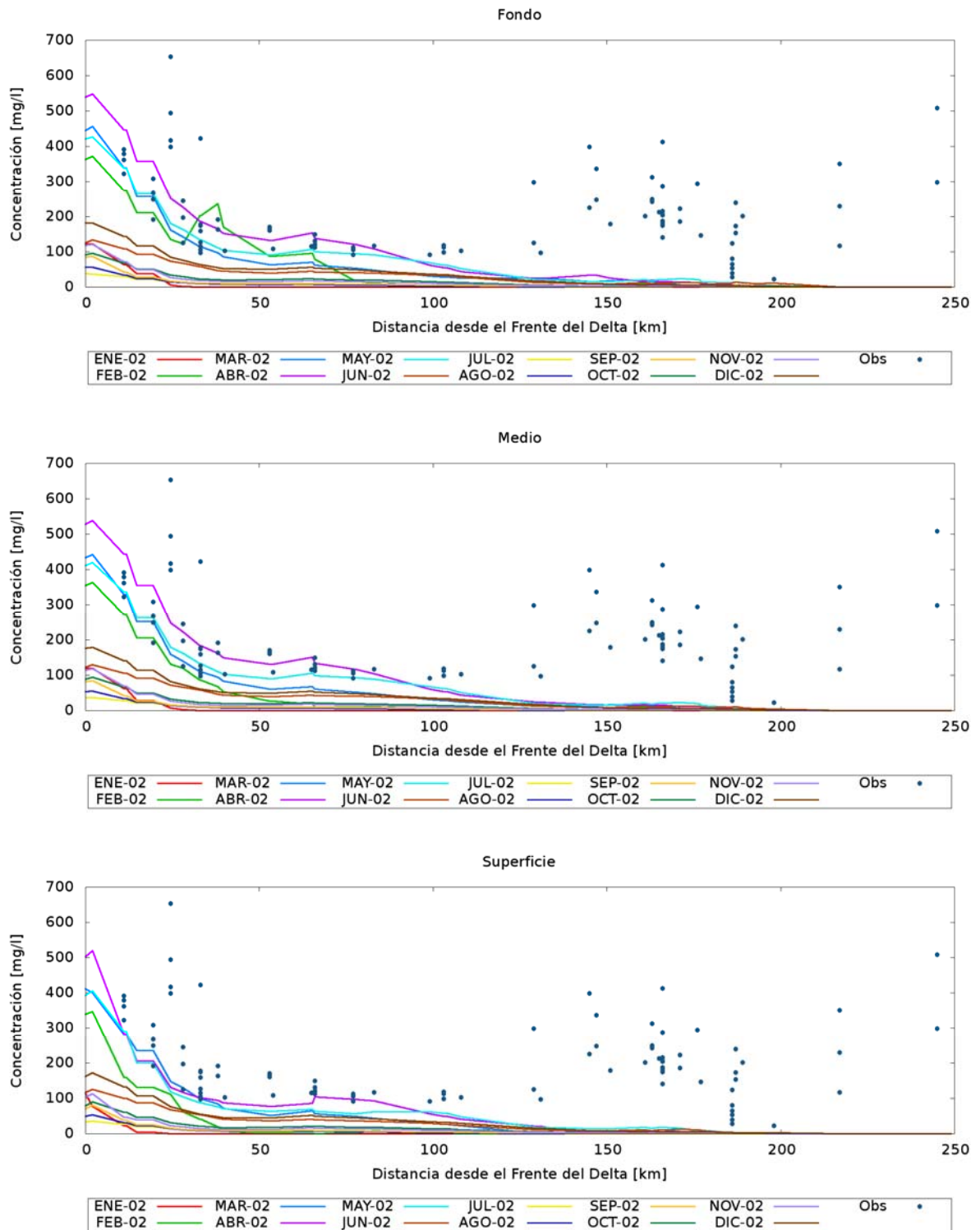
f) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



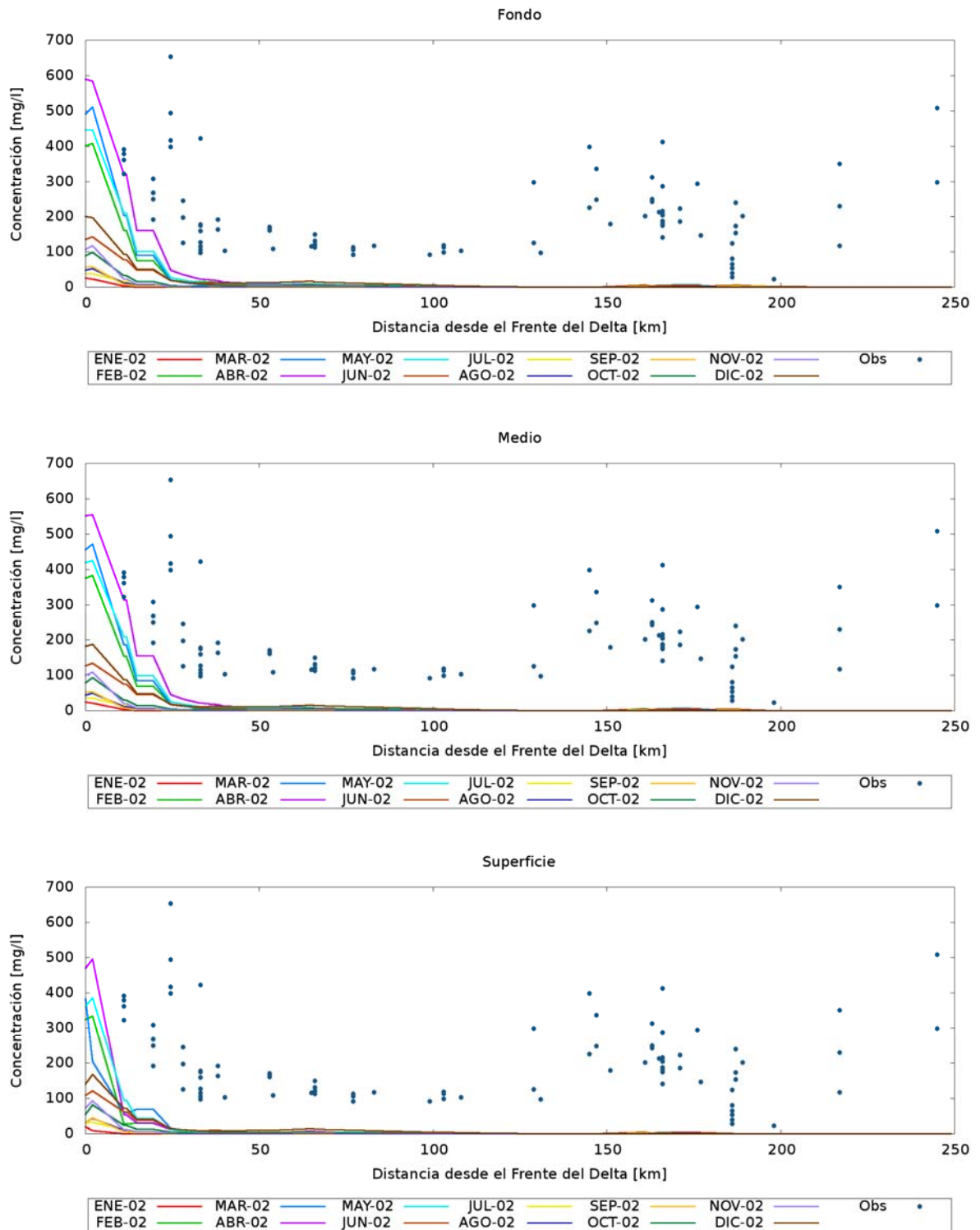
g) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



h) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



i) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s

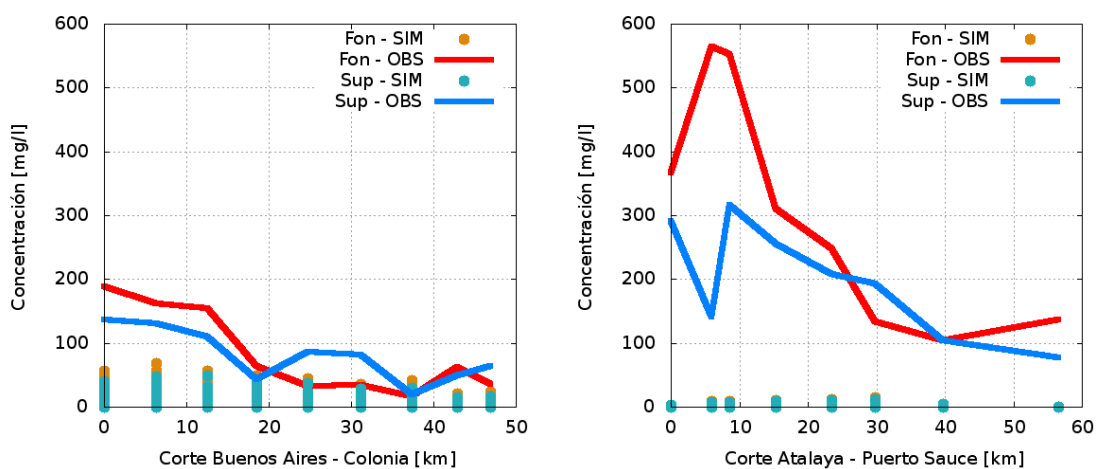


j) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s

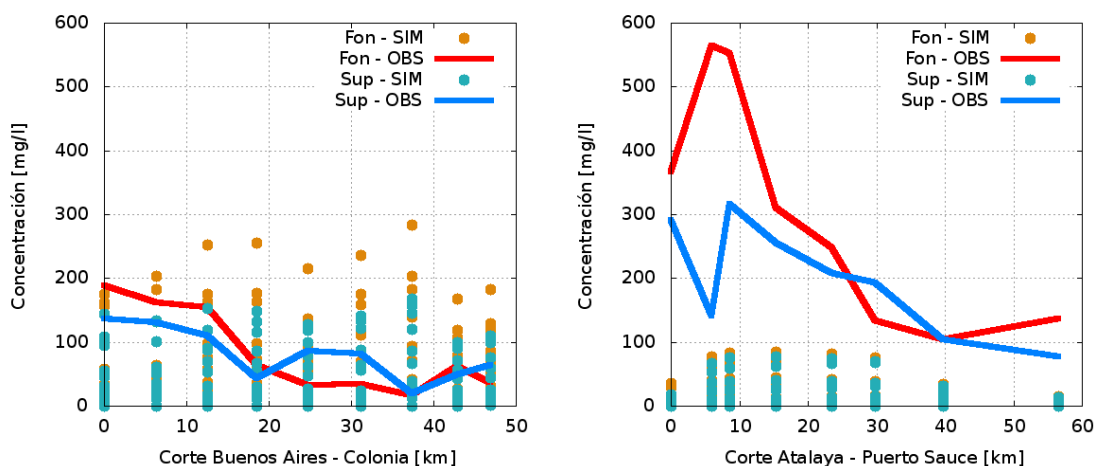
Figura 3.1. Concentración de sedimentos en suspensión a lo largo de la ruta de navegación.

En la Figura 3.2 se presentan las comparaciones de las simulaciones con datos correspondientes a dos de los cortes transversales observados por Ottmann y Urien (1966). Los puntos que representan los valores simulados corresponden a cada mes del año modelado, mostrando la variabilidad estacional. El Corte A (Buenos Aires – Colonia) está vinculado a la zona de deposición del río (primeros 50 km desde el Frente del Delta del río Paraná), mientras que el Corte C, en el Río de la Plata Intermedio, atraviesa la zona de erosión, es por eso que se dan algunos valores de alrededor de 500 mg/l en las mediciones del fondo. Se observa que el acuerdo más satisfactorio se da para el mismo juego de valores de parámetros que antes (0.025 mm/s y 0.15 N/m²).

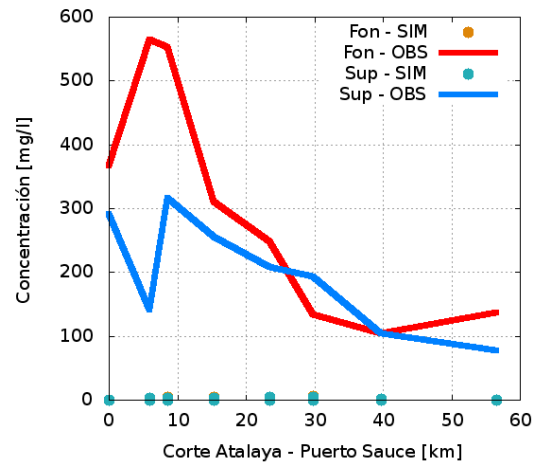
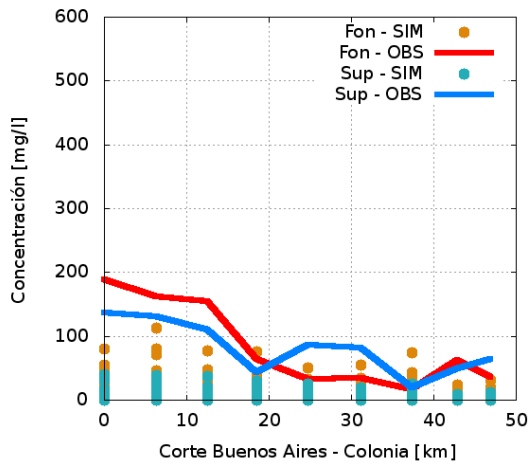
Los diferentes ensayos son consistentes con la observación de que en este tramo del río se puede asumir la mezcla vertical como completa.



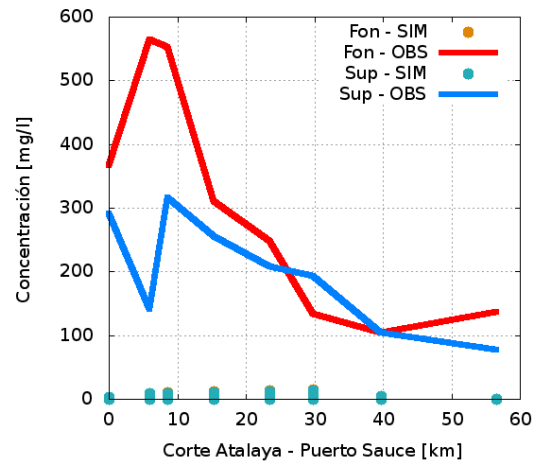
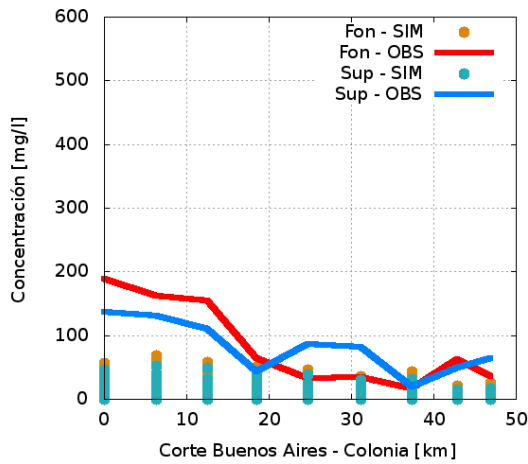
a) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída función de la concentración



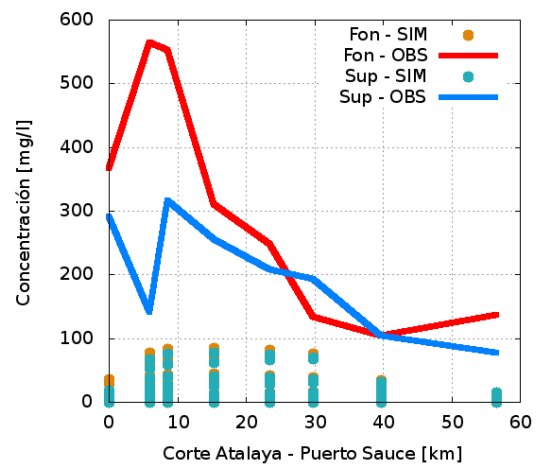
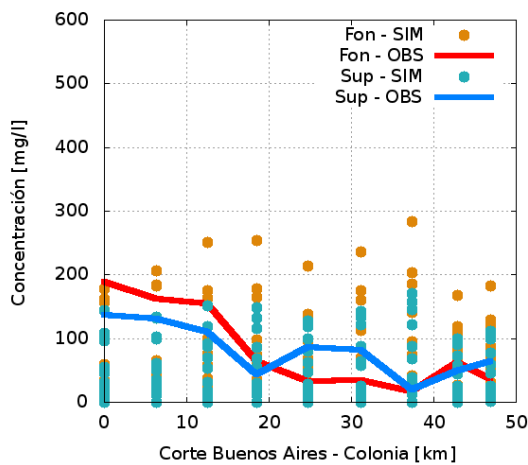
b) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



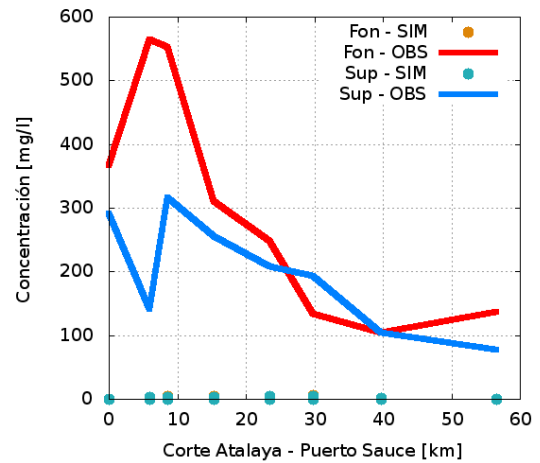
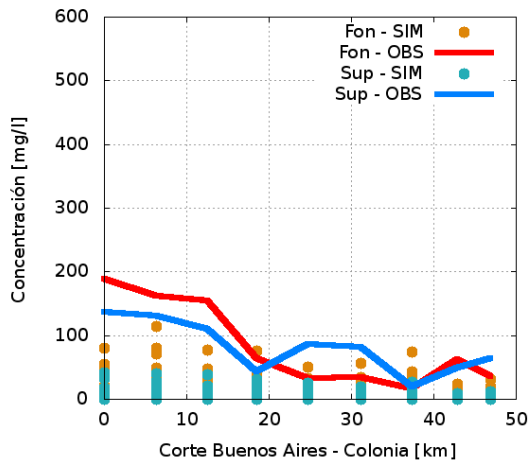
c) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



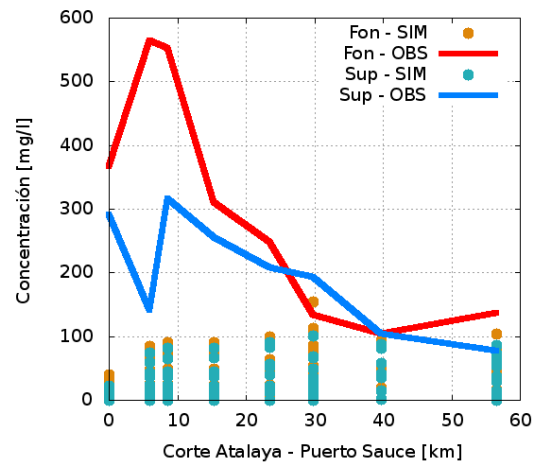
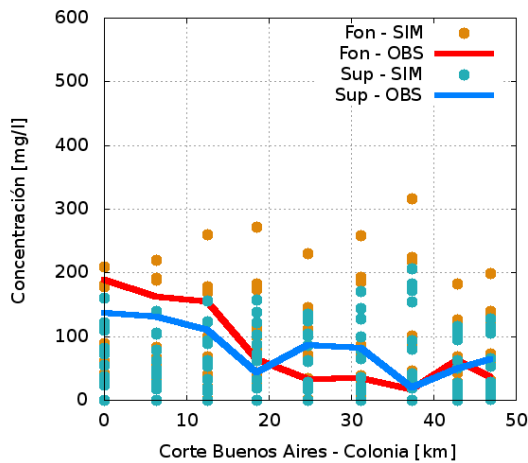
d) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída función de la concentración



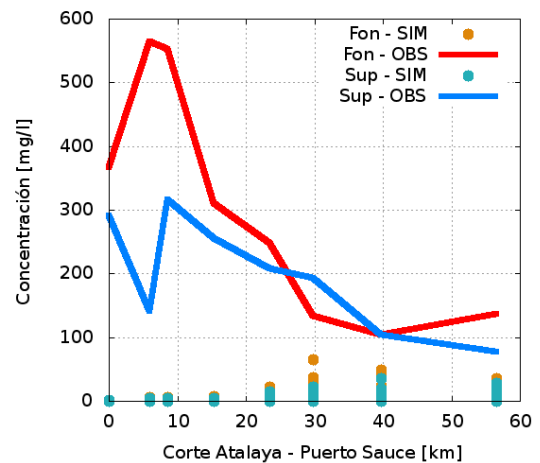
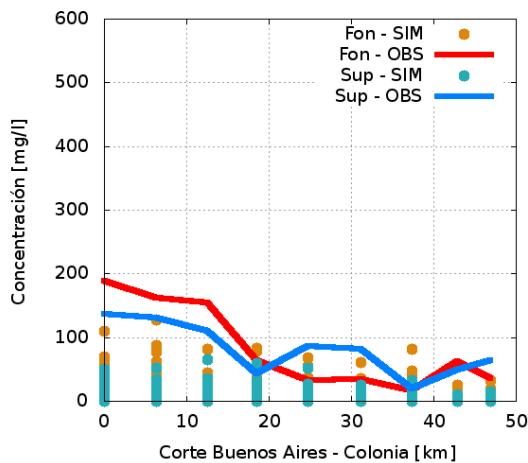
e) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



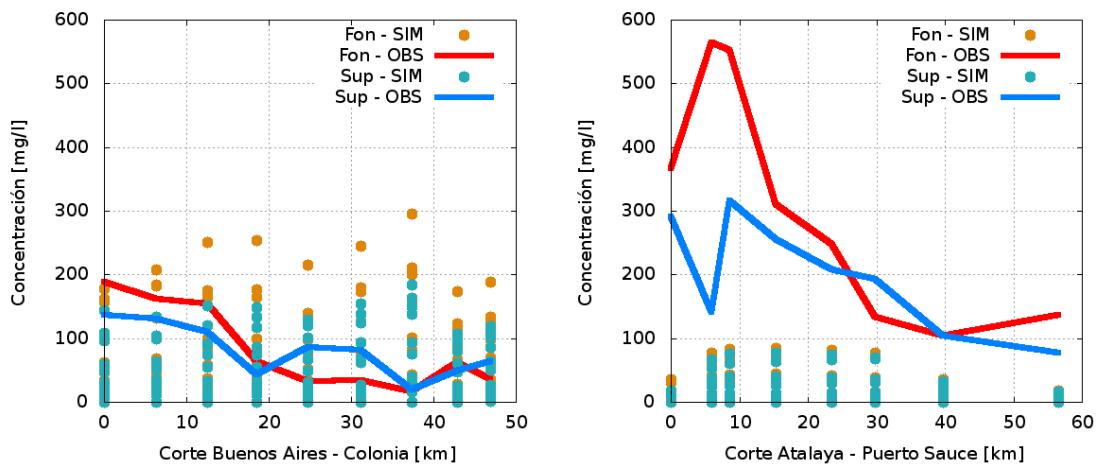
f) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



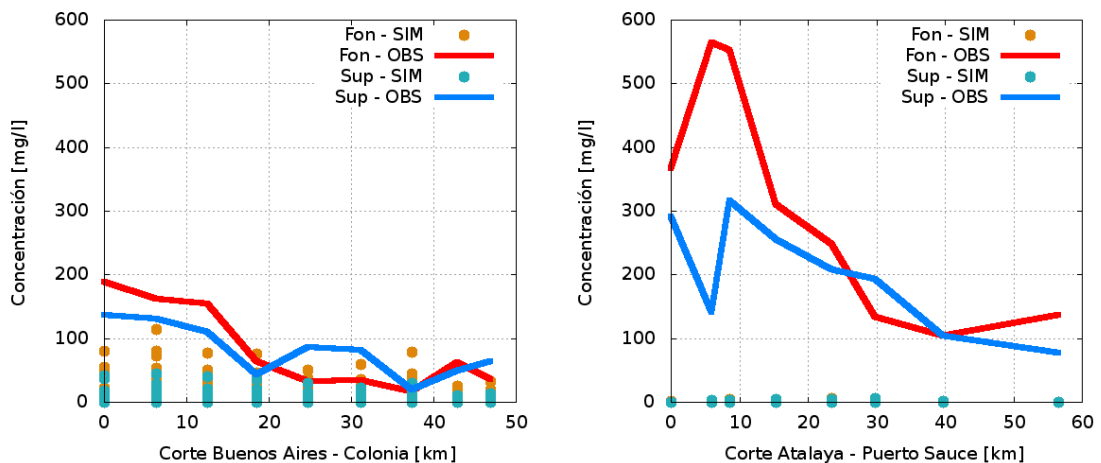
g) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



h) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



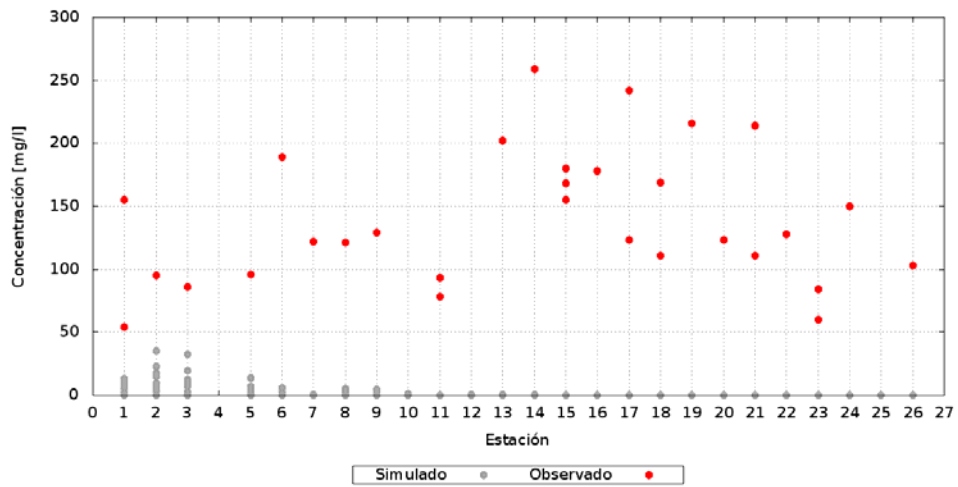
i) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



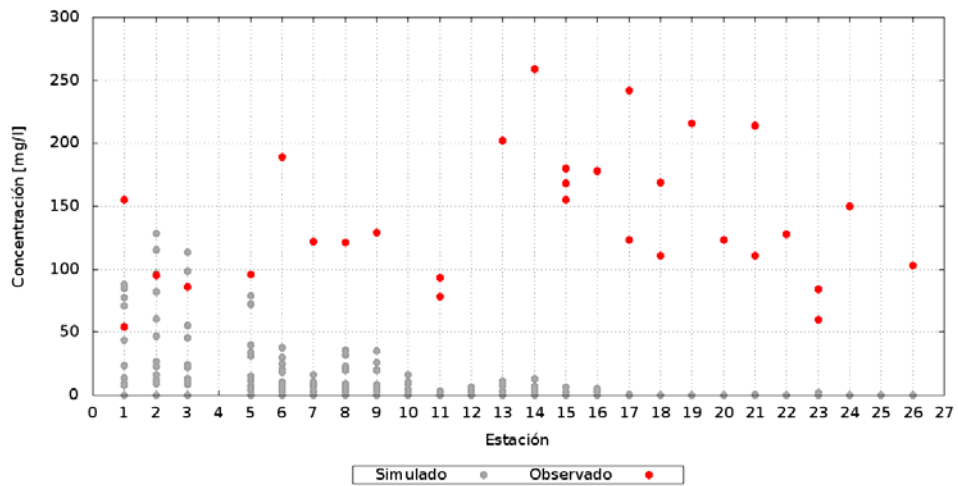
j) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s

Figura 3.2. Concentración de sedimentos en suspensión. Cortes transversales (Ottmann y Urien, 1966).

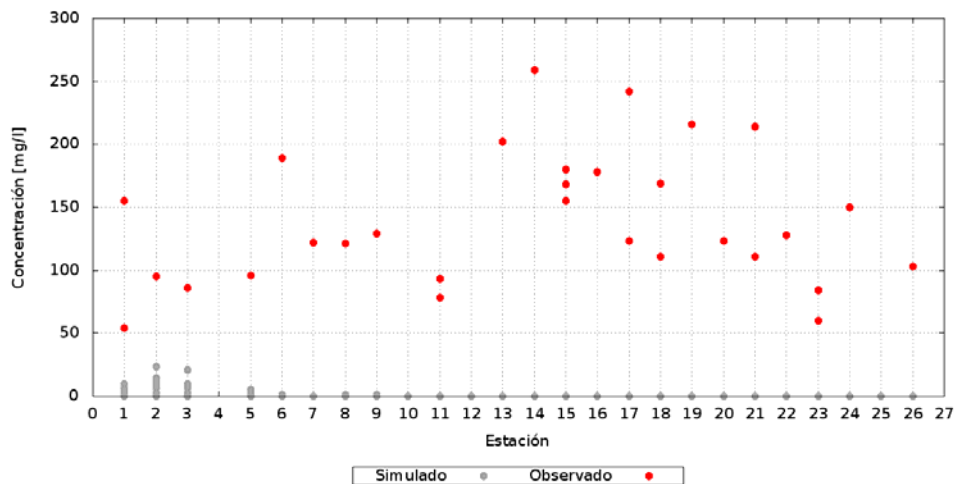
La comparación de los resultados de los distintos ensayos con las observaciones de los puntos de la campaña FREPLATA-FFEM de noviembre de 2009 se presenta en la Figura 3.3. Las conclusiones son consistentes con las obtenidas en relación a los otros juegos de datos. La Figura 3.4 muestra la comparación para el ensayo ERO2 con velocidad de caída de 0.025 mm/s, pero representada con su ubicación geográfica. El desempeño cuali-cuantitativo se considera adecuado, aún cuando no se efectuó esfuerzo alguno en ajustar los parámetros de calibración. Los valores relativamente altos de concentración medidos en la zona exterior del río, no explicados por el presente modelo, se considera que están asociados a sedimentos provenientes del Océano.



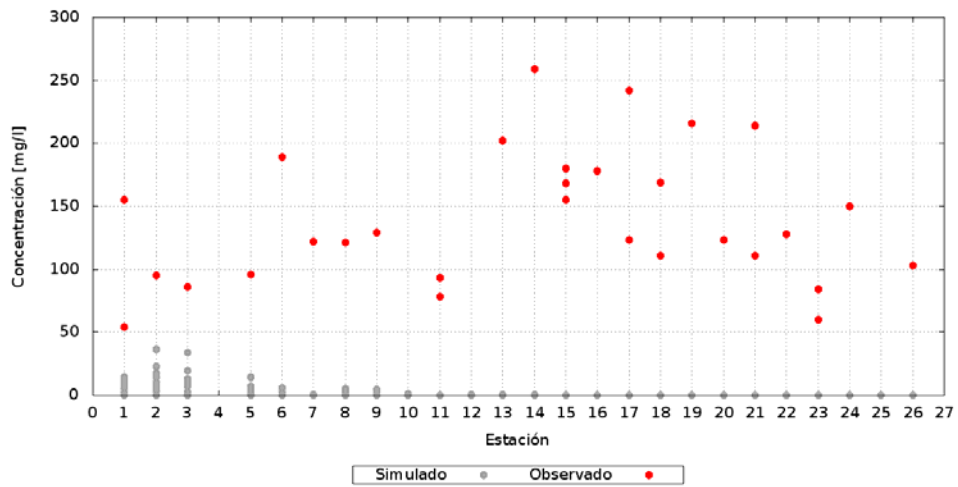
a) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída función de la concentración



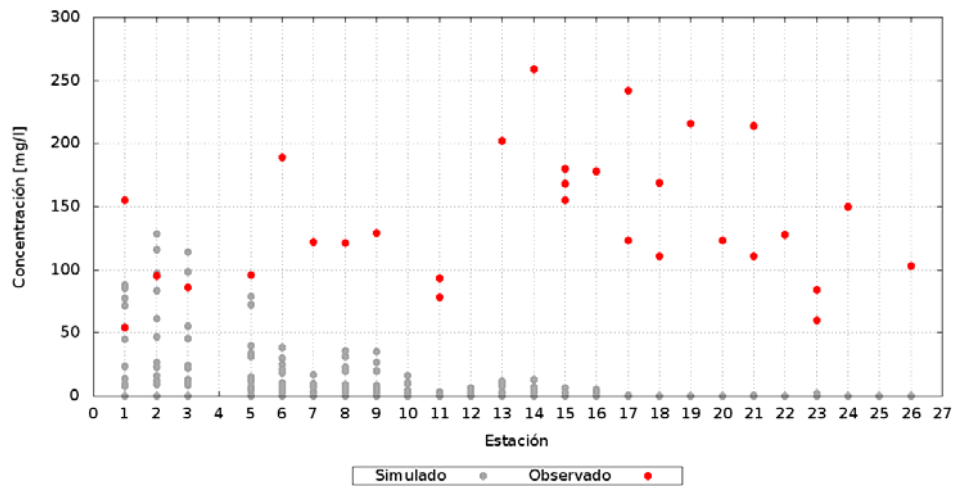
b) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



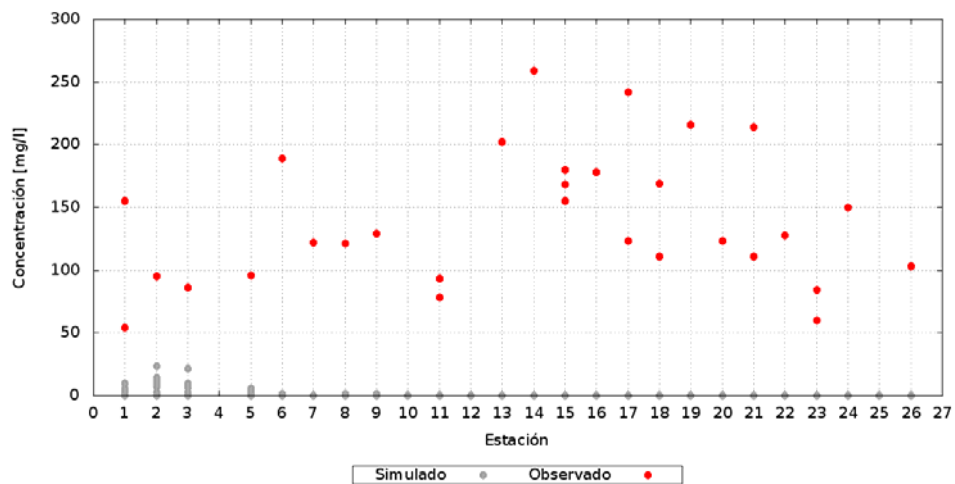
c) Ensayo: ERO 0 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



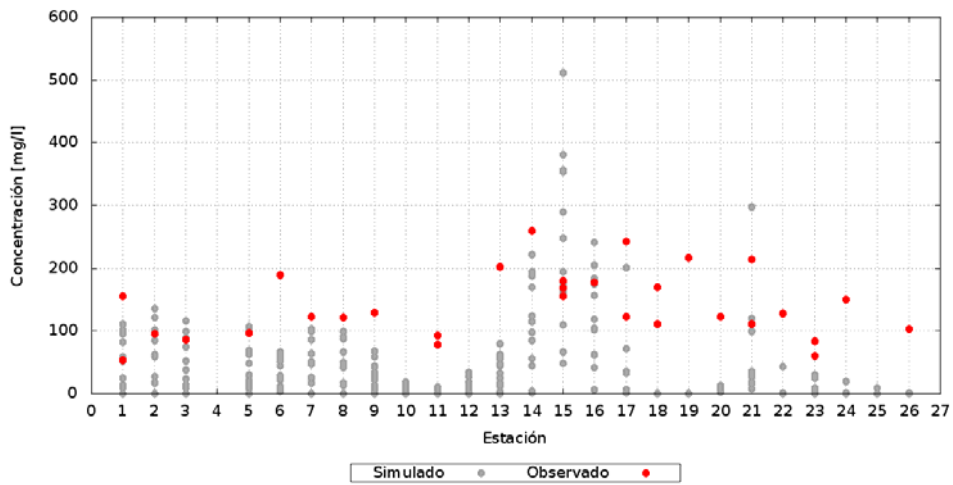
d) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída función de la concentración



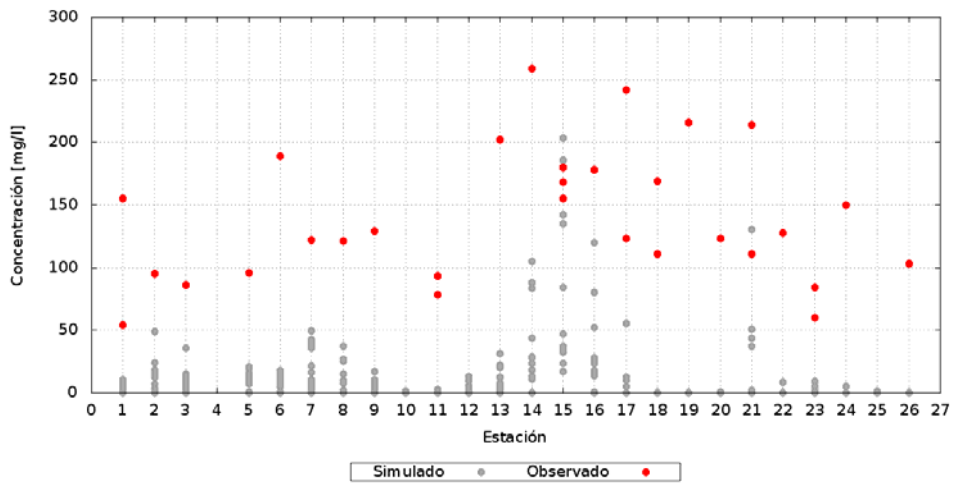
e) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



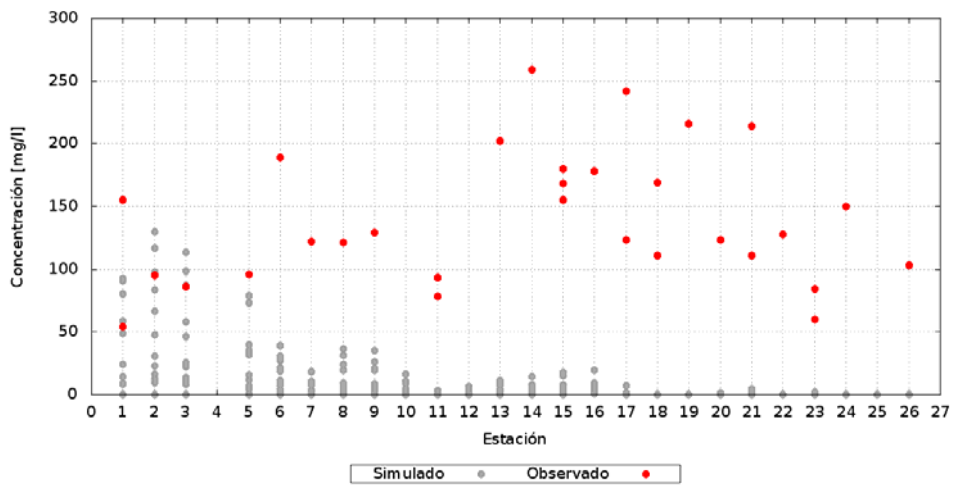
f) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



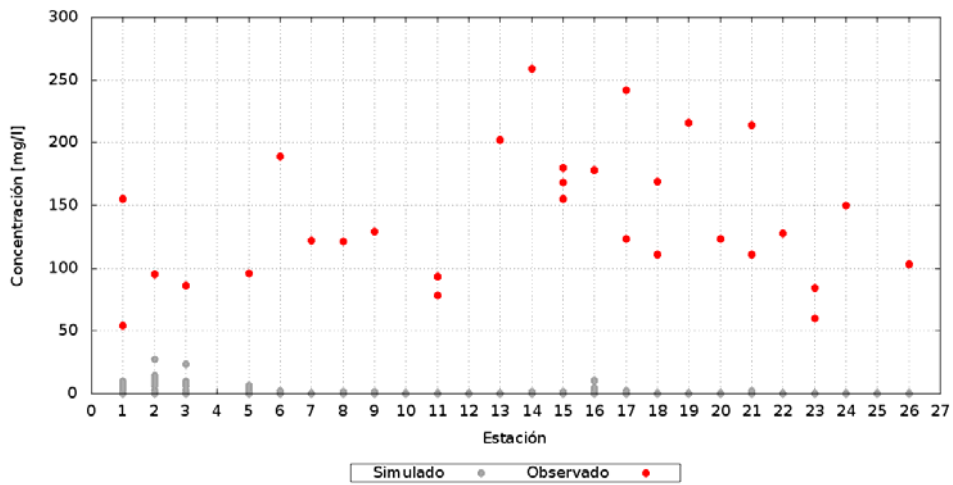
g) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



h) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



i) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



j) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s

Figura 3.3. Concentración de sedimentos en suspensión. Puntos de la campaña FREPLATA-FFEM Noviembre 2009.

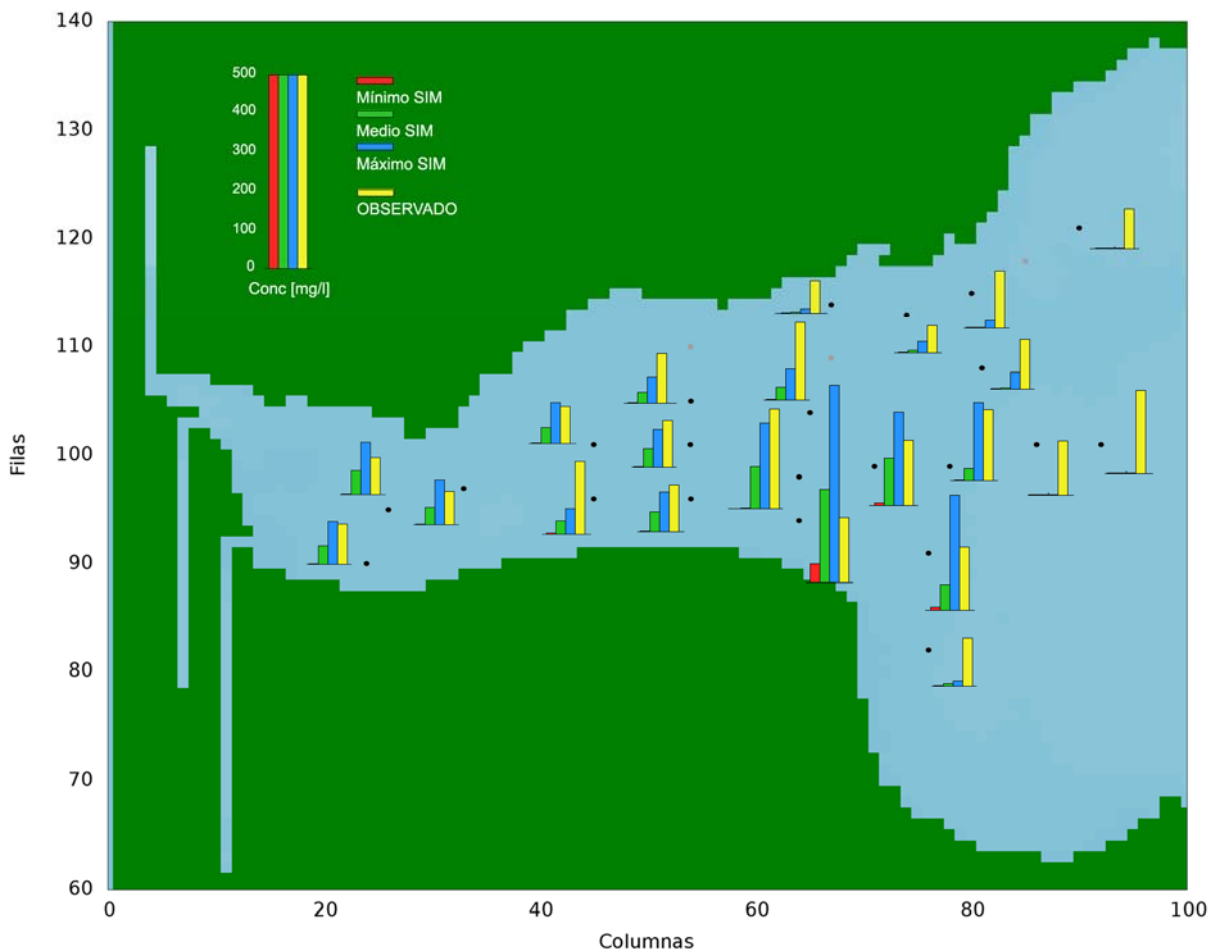
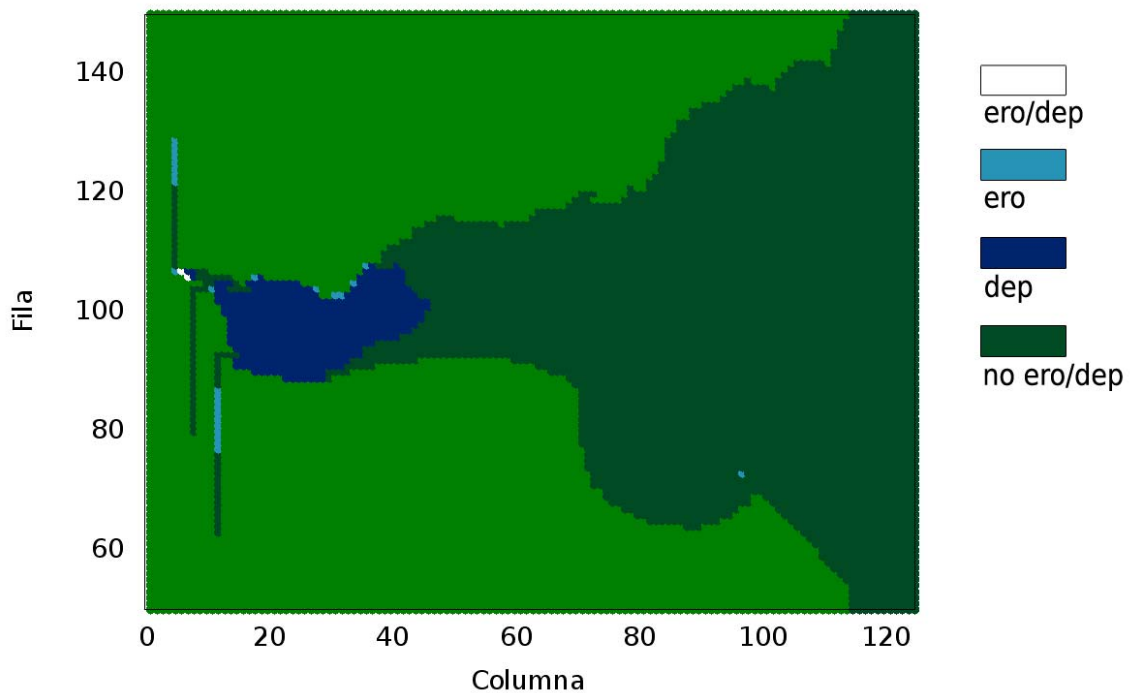


Figura 3.4. Concentración de sedimentos en suspensión. Resumen. Puntos de la campaña FREPLATA-FFEM Noviembre 2009.

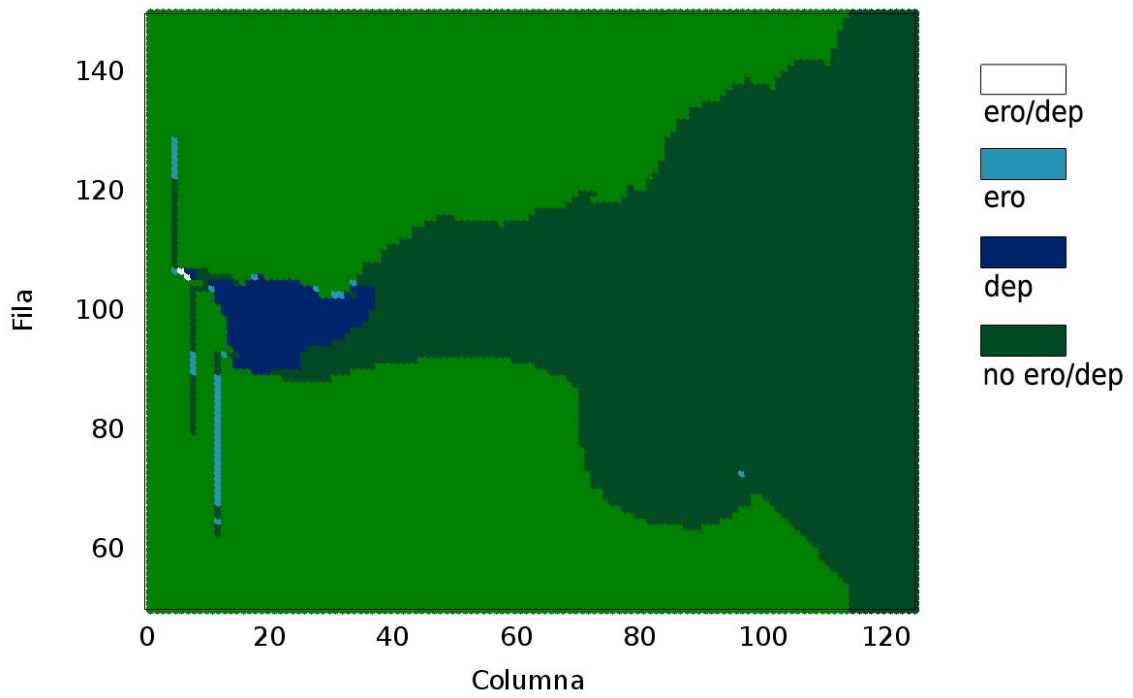
3.3 Análisis de resultados

A pesar de la relativa simplicidad del planteo del modelo sedimentológico, los resultados obtenidos permiten comprender los mecanismos básicos que intervienen en la dinámica de los sedimentos suspendidos del Río de la Plata Interior durante condiciones hidrometeorológicas normales: la deposición de una gran parte del material en el tramo superior, que produce una consecuente disminución en la concentración, y erosión en la parte inferior (Río de la Plata Intermedio), que conduce a un incremento de la concentración.

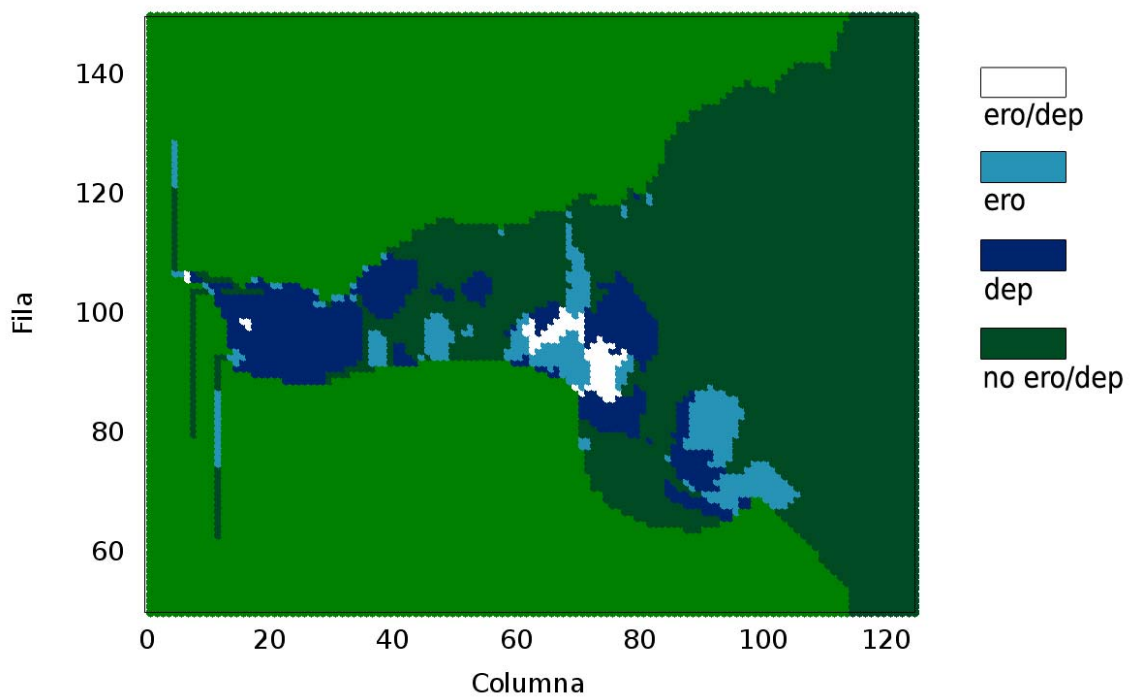
Para complementar esta descripción, en la Figura 3.5 se identifican las zonas donde, durante la ventana temporal de simulación, solo actuó el mecanismo de deposición, el de erosión, ambos o ninguno de ellos dos. Se observa la amplia zona de deposición que se desarrolla aguas abajo del Frente del Delta para todos los casos, y la práctica ausencia de erosión para los ensayos ERO 1 y ERO 3. Sólo el ensayo ERO 2 muestra zonas definidas de erosión en el Río de la Plata Intermedio, seguidas de zonas de deposición de ese material aguas abajo, en la zona de la Barra del Indio. Este patrón de erosión/deposición es consistente con la interpretación efectuada por Parker et al. (1987) en base a mediciones, la cual se muestra en la Figura 3.6.



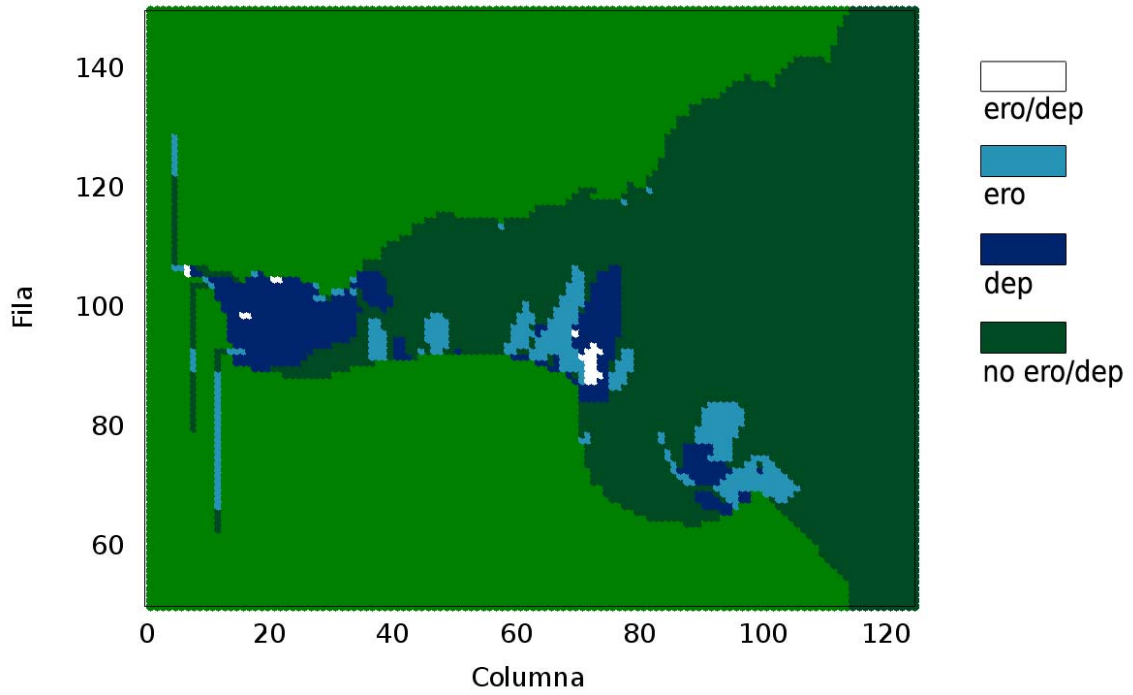
a) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



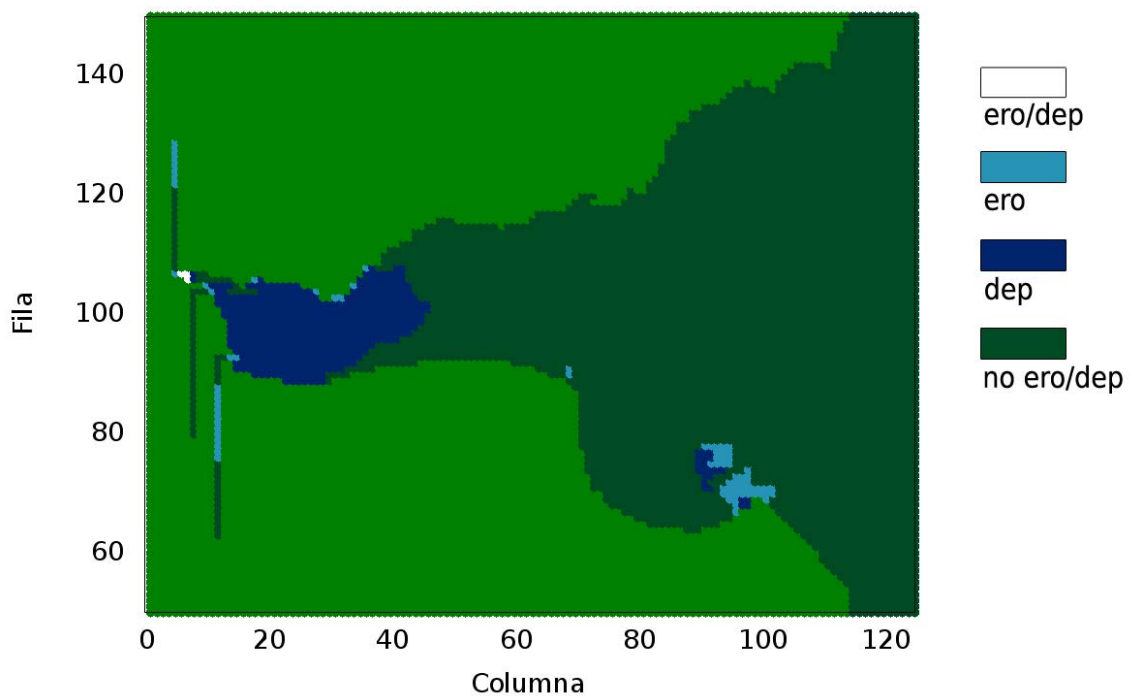
b) Ensayo: ERO 1 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



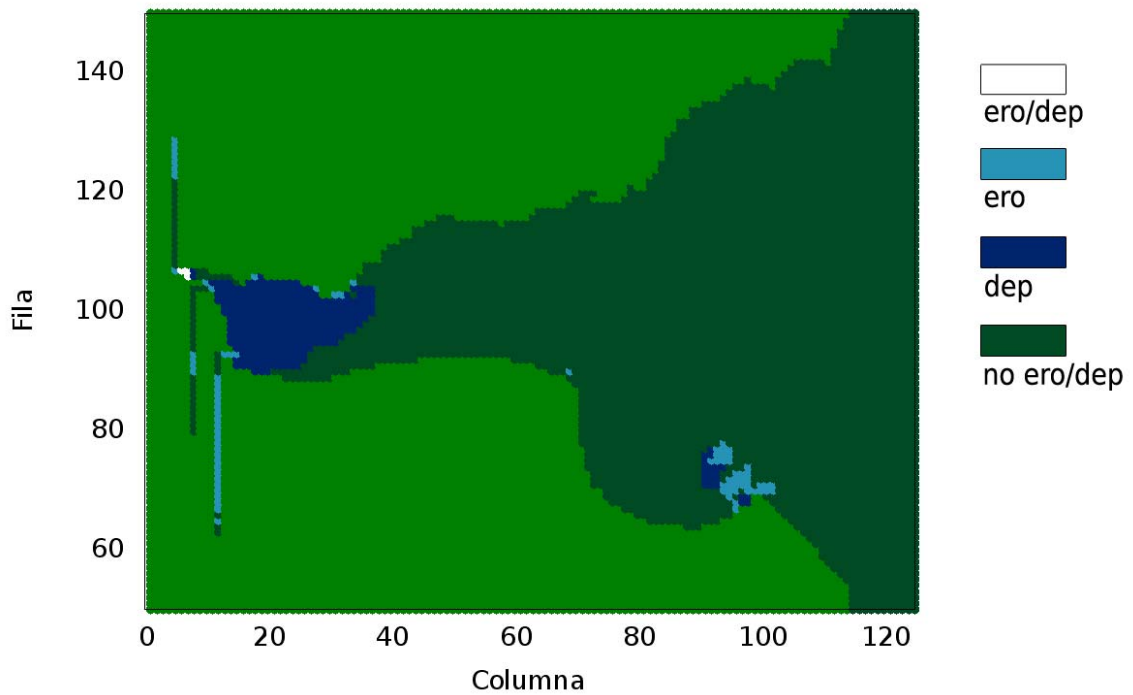
c) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



d) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s



e) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



f) Ensayo: ERO 3 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s

Figura 3.5. Zonas de erosión y deposición.

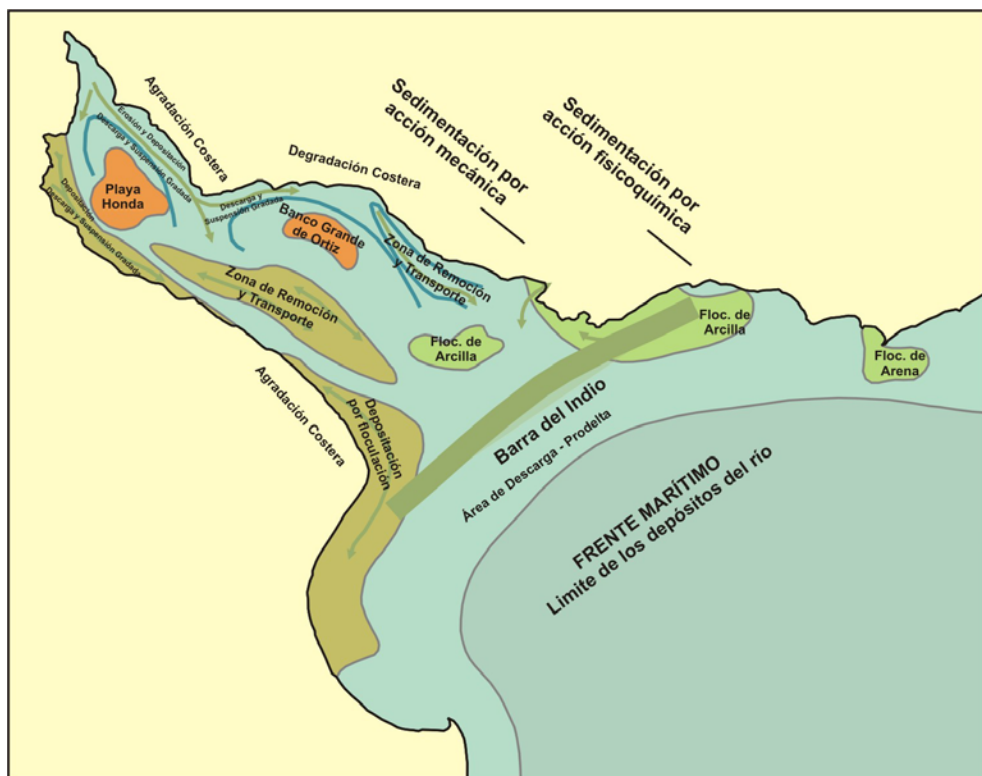
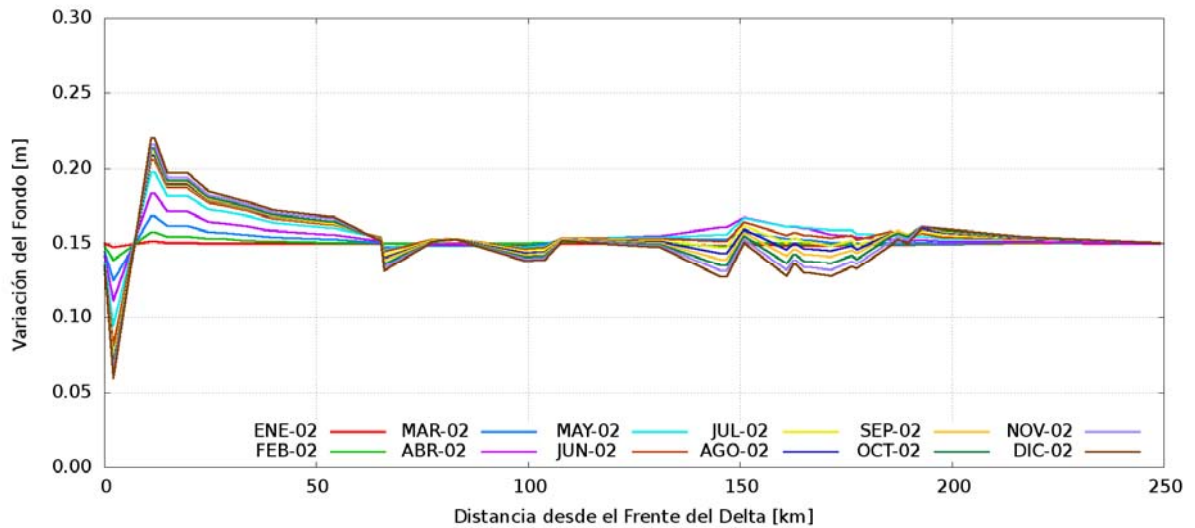
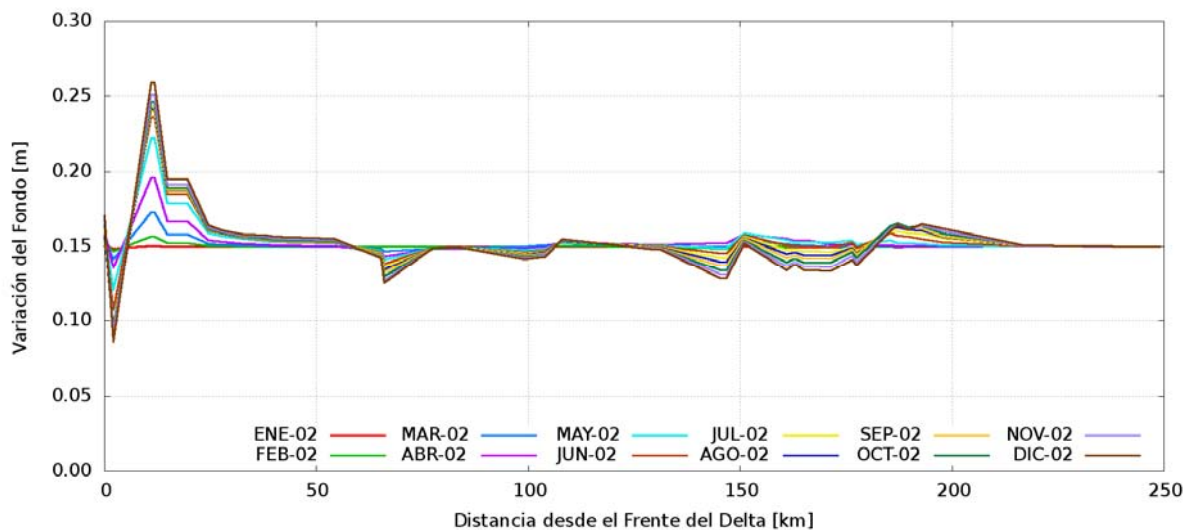


Figura 3.6 Modelo esquemático del transporte y dispersión de sedimentos en el Río de la Plata (Parker et al., 1987).

En la Figura 3.7 se presenta la evolución mensual del espesor de la capa de fondo (inicialmente igual a 0.15 m) a lo largo de la ruta de navegación para los ensayos tipo ERO 2. Se observa la agradación en la zona superior. En el resto predomina la erosión, aunque aparecen zonas con efectos combinados. Una mayor velocidad de caída del sedimento concentra las zonas de deposición luego del Frente del Delta y a continuación de la zona de erosión del Río de la Plata Intermedio.



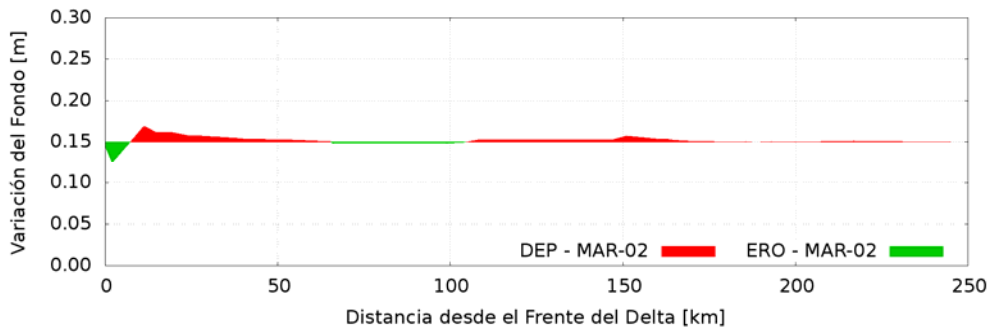
a) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.025 mm/s



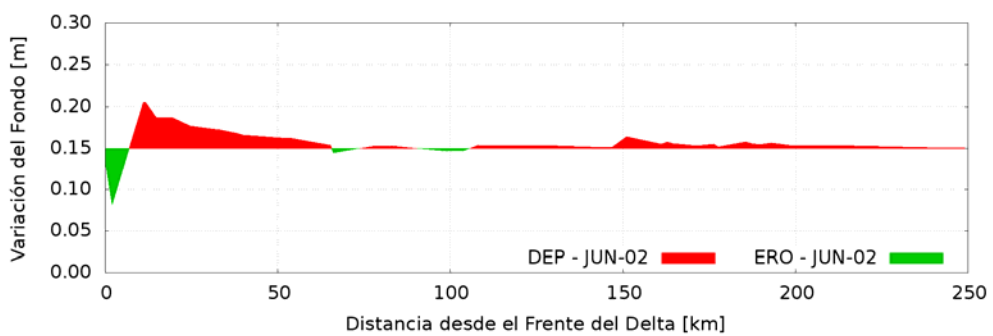
b) Ensayo: ERO 2 – Velocidad de Caída = 0.075 mm/s

Figura 3.7. Evolución temporal del espesor de la capa de fondo de sedimentos en la ruta de navegación.

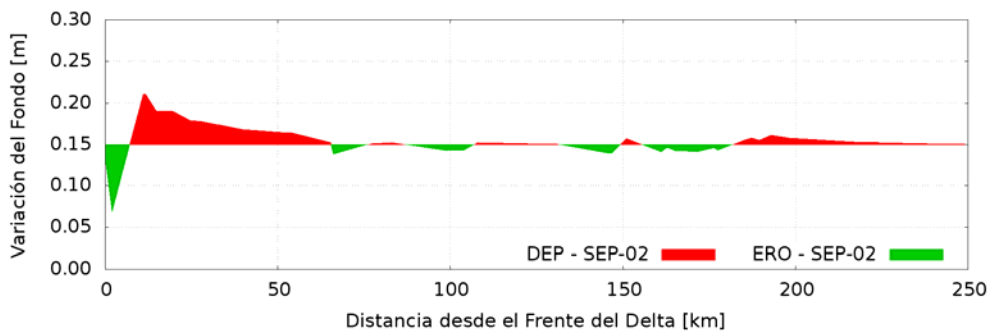
La Figura 3.8 muestra la evolución temporal del espesor de la capa de fondo de sedimentos sobre una ventana temporal de simulación de dos años (2002-2003). Se observa que, a la larga, se afianzan las zonas de deposición y erosión netas.



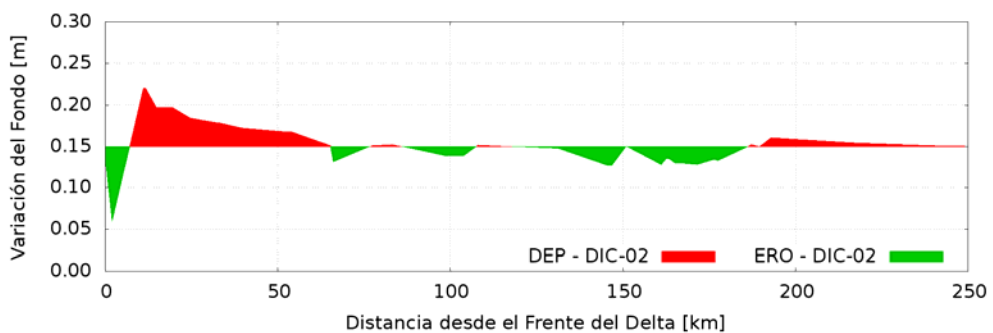
a) Marzo 2002



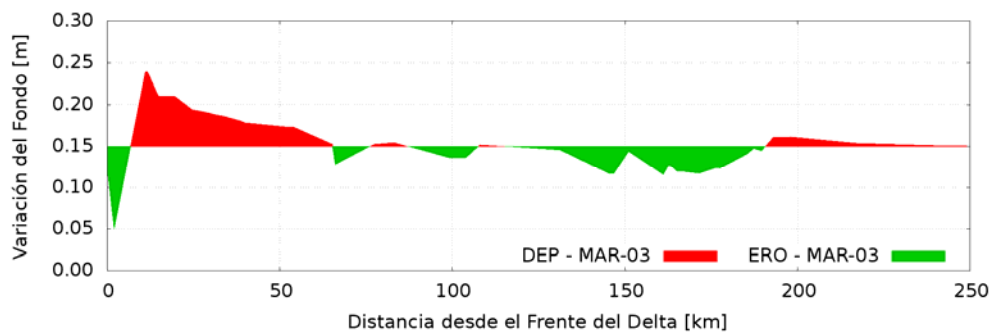
b) Junio 2002



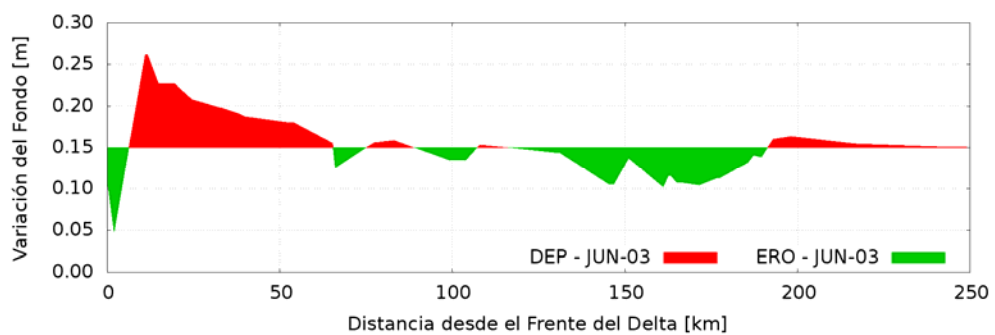
c) Septiembre 2002



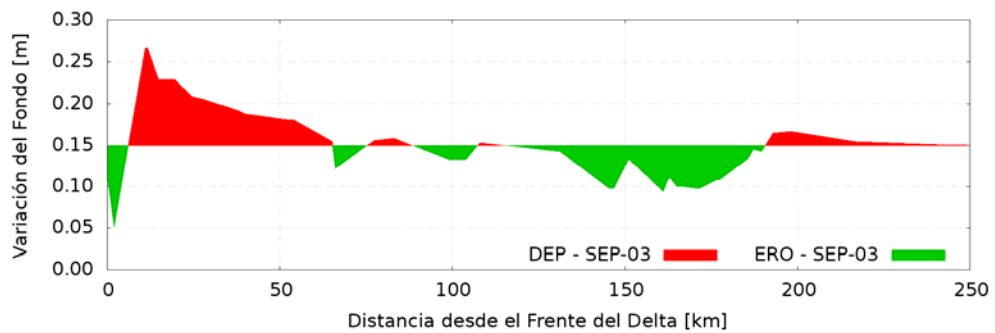
d) Diciembre 2002



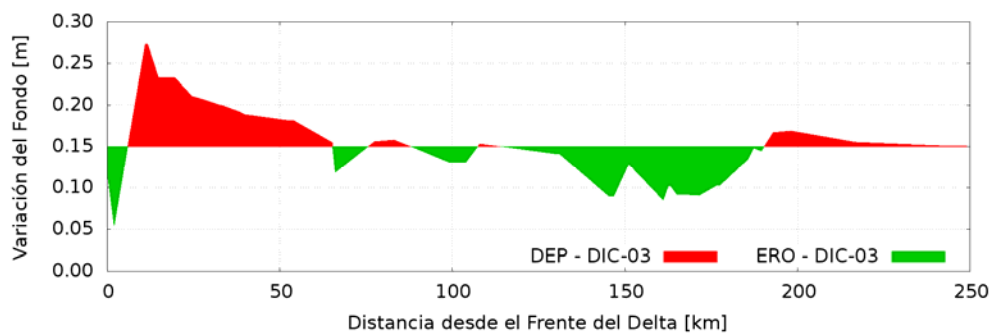
e) Marzo 2003



f) Junio 2003



g) Septiembre 2003

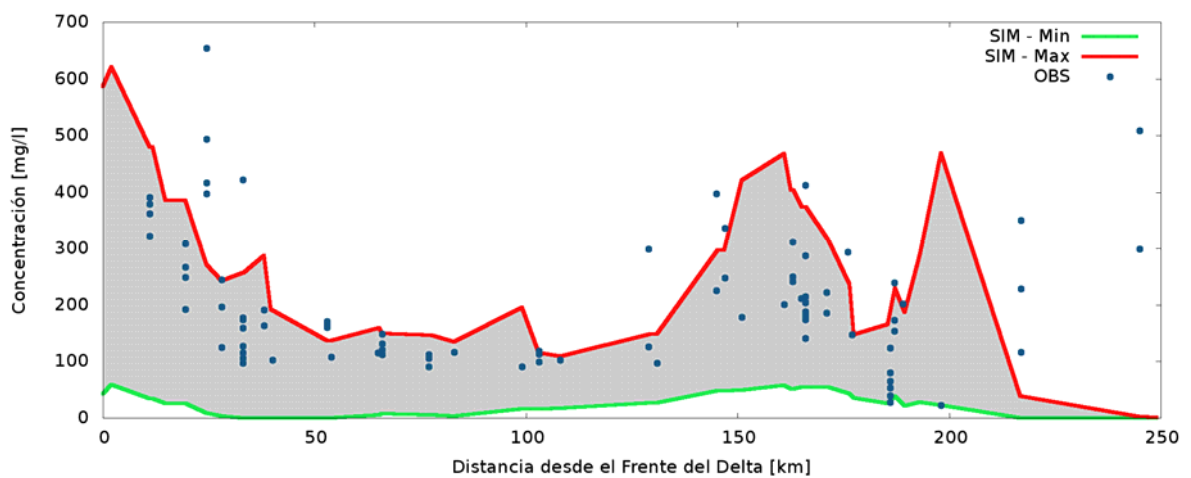


h) Diciembre 2003

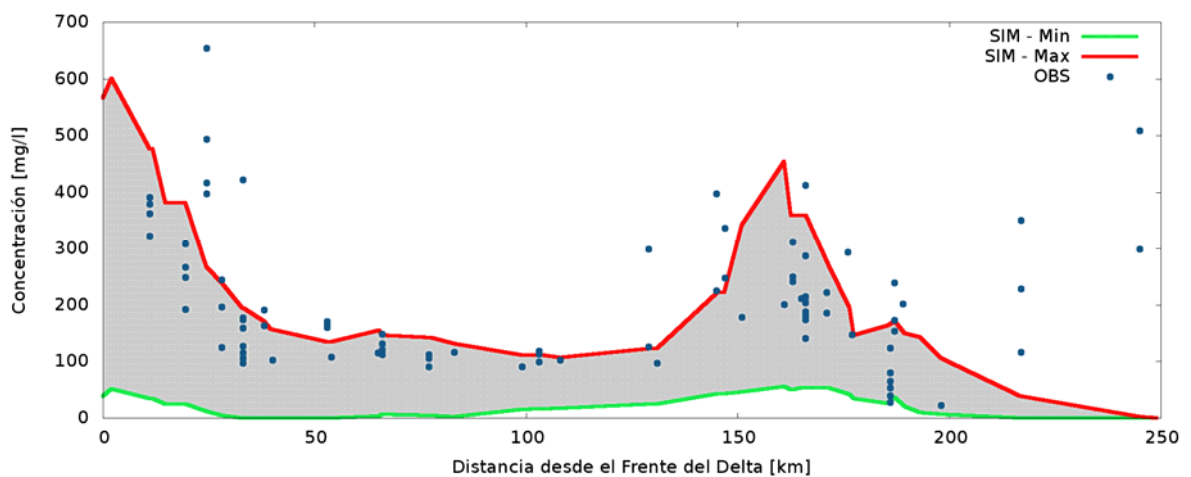
Figura 3.8. Evolución temporal del espesor de la capa de fondo de sedimentos en la ruta de navegación. Ventana temporal de simulación: 2002-2003.

Ahora bien, es obvio que este patrón de evolución no es sustentable en el tiempo, ya que significaría una erosión sostenida en el Río de la Plata Intermedio, que no se observa. Dado que los cálculos han representado condiciones hidrometeorológicas normales, se especula con que durante las grandes tormentas (asociadas a Sudestadas) se produce una redistribución de material de fondo, que vuelve a rellenar las zonas de erosión.

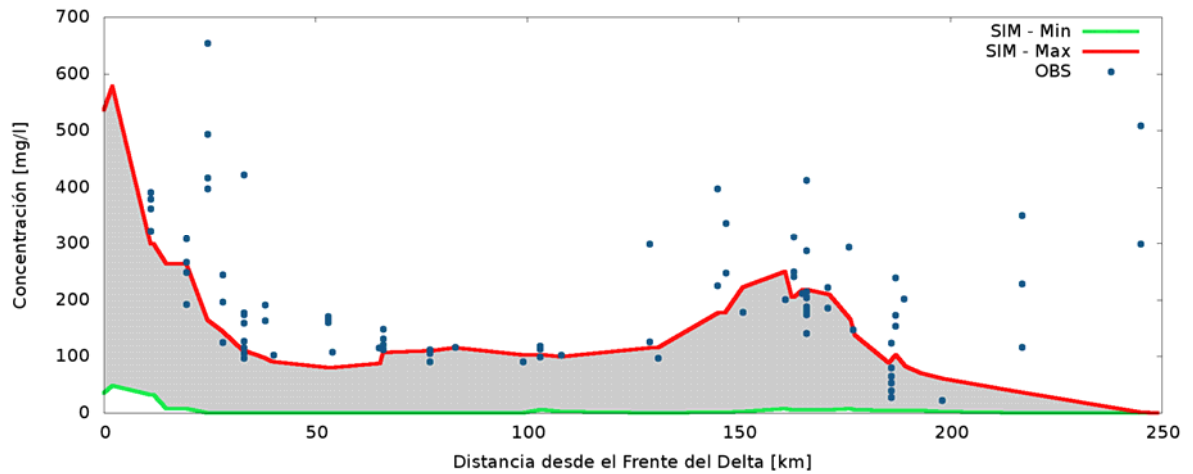
La Figura 3.9 presenta las envolventes de concentración de sedimentos para el año de simulación (2002), junto con las mediciones de Boskalis y Ballast. El hecho de que los valores medidos tiendan a ser algo superiores a la envolvente de máximos puede atribuirse a una mayor descarga de sedimentos durante el año de observación (1992), para el cual el caudal del río era mayor que para el año simulado (2002). La escasa diferencia entre las envolventes de fondo y superficie es consistente con la idea de mezcla completa en la vertical en el Río de la Plata Interior.



a) Fondo



b) Medio



c) Superficie

Figura 3.9. Envolventes de concentración de sedimentos en suspensión. Ventana temporal de simulación: 2002.

4 CONCLUSIONES

En base a un modelo sedimentológico relativamente simple, se ha establecido el siguiente patrón de comportamiento para la dinámica sedimentaria del Río de la Plata Interior bajo condiciones hidrometeorológicas normales:

- i. una gran parte del material suspendido inyectado desde el río Paraná se deposita en el tramo superior, produciendo una consecuente disminución en la concentración de sedimento en suspensión;
- ii. se produce erosión en la parte inferior (Río de la Plata Intermedio), lo cual conduce a un incremento de la concentración de sedimento en suspensión;
- iii. ese material proveniente de la erosión tiende a depositarse aguas abajo de la zona de erosión.

Se especula con que durante las grandes tormentas (asociadas a Sudestadas) se produce una redistribución de material de fondo, que vuelve a rellenar las zonas de erosión. En consecuencia, lo que se ha denominado erosión es, en rigor, una resuspensión de ese material de relleno en condiciones hidrometeorológicas normales. Esta hipótesis podría investigarse en el futuro utilizando este mismo modelo hidro-sedimentológico.

Los valores relativamente altos de concentración de material suspendido que se producen en la zona exterior del río se consideran que están asociados a sedimentos de origen oceánico.

REFERENCIAS

- Cormault, P., 1971, *Determination experimentale du debit solide d'erosion dessediments fins cohesifs*, IAHR XIV Congress.
- EGASAT, 1978, Estudio de suelos y fundaciones y estudios hidráulicos por modelos matemáticos del Canal Costanero Norte en el Río de la Plata, DIGID.
- FIUBA, 1999, Estudio del impacto ambiental sedimentológico de las pilas del puente principal de la conexión Buenos Aires - Colonia. Informe Ejecutivo. Agosto
- Harrison, A.J.M., Owen, M.W., 1971. *Siltation of fine sediments in estuaries*, IAHR XIV Congress.
- Krestenitis, Y.N., Kombiadou, K.D., y Savvidis, Y.G., 2006. Modelling cohesive sediment transport in the marine environment: The case of Thermaikos Gulf, *J. Ocean Sci. Disc.*, 3, 701–733.
- Krone, R.B., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes, Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California.
- Le Hir, P., Bassoullet, P., Jestin, H., 2001, Application of the continuous modeling concept to simulate high-concentration suspended sediment in a macrotidal estuary, Coastal and estuarine fine sediment transport processes, W.H. McAnally and Metha A.J. Eds., Elsevier, Amsterdam, 229-247.
- Le Hir, P., Monbet, Y., Orvain, F., 2007. Sediment erodability in sediment transport modelling: Can we account for biota effects?, *Continental Shelf Research*, 27, 1116–1142.
- Menéndez, A. N., Castellano, R., 2000a, Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island. 4th International Conference Hydroinformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July, 2000.
- Menéndez, A. N., Castellano, R., 2000b, Simulación numérica de problemas con escalas temporales disímiles: crecimiento de una barra de sedimentación. XI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. ENIEF'2000, Bariloche, Noviembre, 2000.
- Menéndez, A. N., 2001. Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Rio de la Plata River. VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, octubre.

- Menéndez, A. N., Sarubbi, A., 2007, A Model to Predict the Paraná Delta Front Advancement. Workshop on Morphodynamic Processes in Large Lowland Rivers, Santa Fe, Argentina, November.
- Nagy, G.J., López Laborde, J, Anastasia, L.H., 1987, Caracterización de ambientes del Río de la Plata Exterior (salinidad y turbiedad óptica), Invest. Oceanológ. 1 (1), 31:56.
- Parker, G., Marcolini, J., Cavalloto, J., Violante, R., 1987, Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de la Plata, Ciencia y Tecnología del Agua, Vol. 1, No. 4, pp. 68-80.
- Ottmann, F., Urien, C.M., 1966, Sur quelques problèmes sédimentologiques dans le Rio de la Plata, Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique (2), Vol. VIII, Fasc. 3, pp. 209-224, Paris.
- Parthenaides, E., 1962, A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water, PhD thesis, University of California.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2006, Desarrollo de capas de mezcla entre los corredores de flujo del Río de la Plata Interior, XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, octubre.
- Royal Boskalis & Ballast Ham Dredging, 1992, Ruta de Navegación de Ultramar San Martín - Océano, Informe para la licitación del dragado de la vía navegable, Dirección de Vías Navegables, Argentina.
- Unclest, R.J. y Smith, R.E., 2005. A Note on the Comparative Turbidity of Some Estuaries of the Americas, Journal of Coastal Research, 21 (4), 845-852.
- van Rijn, L.C., 1984, Sediment Transport, Part II: Suspended load transport, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, no 11.
- van Rijn, L.C., 1993, Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam.
- Xu, F., Wang, D.P., y Riemer, N., 2010. An idealized model study of flocculation on sediment trapping in an estuarine turbidity maximum, *Continental Shelf Research*, 30,1314–1323