

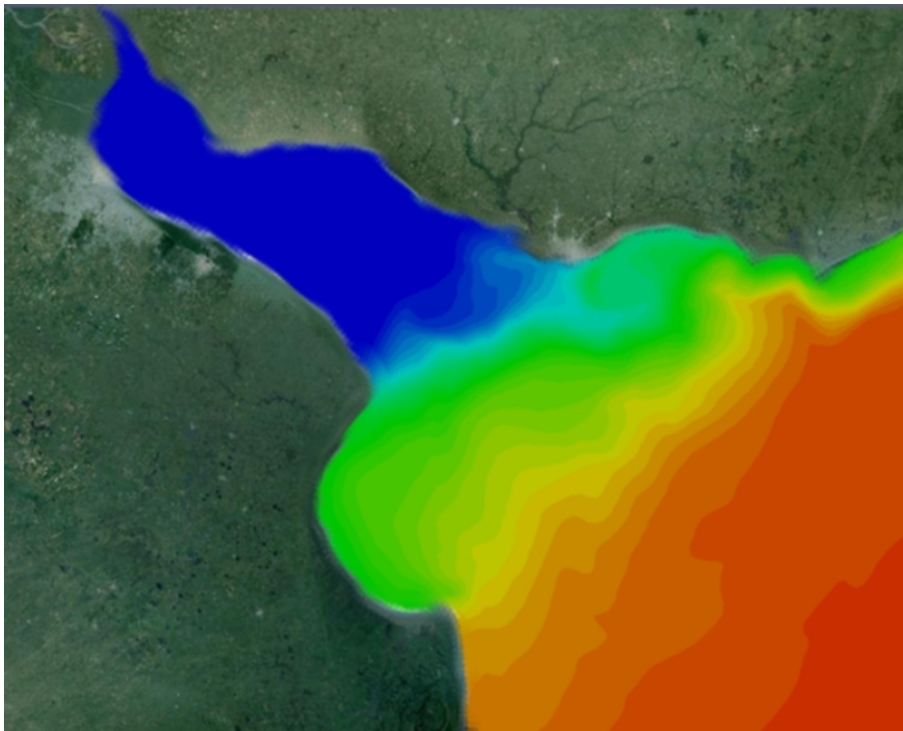


INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD HIDRODINÁMICA



*Proyecto LHA 296
Informe LHA 05-296-10
Ezeiza, Octubre de 2010*

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. Mariano RE

Martín SABAROTS GERBEC

Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata

ANALISIS DE SENSIBILIDAD HIDRODINAMICA

Informe

Mariano Re y Martín Sabarots Gerbec

RESUMEN

Se presenta un análisis de sensibilidad para el modelo hidrodinámico del Río de la Plata, implementado con el Sistema de Modelación MARS-3D. Se presentan distintos resultados de niveles en Buenos Aires y de indicadores de la estratificación en el frente salino, de acuerdo a variaciones en el coeficiente de arrastre por el viento.

Descriptores temáticos: Modelación Hidrodinámica, MARS-3D, Análisis de Sensibilidad.

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

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	3
2.1	Coeficiente de arrastre en la superficie	3
2.2	Sensibilidad de niveles en Buenos Aires	4
2.3	Sensibilidad de estratificación en el frente salino	10
3	CONCLUSIONES	22

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, agosto de 2010) se presentó la implementación del modelo hidrodinámico y una validación realizada a partir de observaciones de velocidades de corriente y niveles. En este Quinto Informe se presenta un análisis de sensibilidad de distintas variables respecto de la interacción del viento con la superficie.

2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

2.1 Coeficiente de arrastre en la superficie

La interacción de la superficie libre con la atmósfera, en MARS-3D se representa a partir del accionar de los campos de vientos y presiones sobre la primera. La tensión de corte generada por el viento en la superficie libre se expresa en términos de la velocidad del viento:

$$\tau_{surf}^x = \rho_a \cdot C_{da} \cdot u_w \cdot \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$$

$$\tau_{surf}^y = \rho_a \cdot C_{da} \cdot v_w \cdot \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$$

siendo τ_{surf}^x y τ_{surf}^y las componentes horizontales de la tensión, ρ_a la densidad del aire (1.25 kg/m³), C_{da} el coeficiente de arrastre en la superficie, u_w y v_w las velocidades del viento a 10 m sobre la superficie del mar.

MARS-3D presenta cinco opciones para la elección de la parametrización del coeficiente de arrastre en la superficie: las formulaciones presentadas por Large y Pond (1981), Smith y Blanke (1975), Geernaert et al. (1986), Charnock (1955), y la opción de un valor constante independiente de la intensidad del viento ($U = \sqrt{u_w^2 + v_w^2}$).

Large y Pond (1981)

$$C_{da} = 10^{-3} \cdot (0.49 + 0.065 \cdot U) \quad U > 11 \cdot m/s$$

$$C_{da} = 0.0012 \quad U \leq 11 \cdot m/s$$

Smith y Blanke (1975)

$$C_{da} = 10^{-3} \cdot (0.63 + 0.066 \cdot U)$$

Geernaert et al. (1986)

$$C_{da} = 10^{-3} \cdot (0.43 + 0.097 \cdot U)$$

Charnock (1955)

Para una condición atmosférica estable, el perfil de la velocidad del viento en la capa del borde puede ser descrito por una ley logarítmica, entonces el perfil vertical del viento es:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

donde $U(z)$ es la velocidad del viento a una altura z determinada, u_* es la velocidad de corte del viento y está dada por $(\tau/\rho_a)^{1/2}$, con τ la tensión superficial y ρ_a la densidad del aire, z_0 la altura de rugosidad y κ la constante de von Karman. Entonces, la velocidad de corte u_* se puede relacionar con el coeficiente de arrastre por viento, C_{da} , y con la velocidad del viento a diez metros de la superficie, U_{10} , de la siguiente manera:

$$u_* = C_{da} \cdot U_{10}^2$$

Combinando las dos últimas ecuaciones, se obtiene una relación entre z_0 y C_{da} :

$$z_0 = z_{10} / \exp\left(\kappa / C_{da}^{1/2}\right)$$

donde z_{10} es la altura de 10 m por sobre la superficie. En general, en aguas abiertas, el valor de z_0 no es conocido, y deber ser determinado indirectamente. Charnock (1955) asume una altura de rugosidad, z_0 , función de la velocidad de corte, proponiendo la siguiente relación:

$$z_0 = \beta \cdot u_*^2 / g$$

siendo β el coeficiente adimensional de Charnock (que en MARS-3D vale 0.014) y g la aceleración de la gravedad. Entonces, asumiendo un perfil vertical logarítmico de la velocidad del viento, la expresión de z_0 resulta en una relación no lineal entre el coeficiente de arrastre C_{da} y la velocidad del viento U_{10} .

2.2 Sensibilidad de niveles en Buenos Aires

La evaluación de la sensibilidad de los niveles en Buenos Aires, respecto de la utilización de diferentes coeficientes de arrastre de viento se realizó mediante la simulación de la ventana de tiempo 01/Ene/2002 – 31/Dic/2004 (se cuentan con observaciones en ese período de tiempo). En la Figura 2.1 se muestran los diferentes coeficientes de arrastre utilizados en las simulaciones: las cuatro opciones de MARS-3D (que dependen de la intensidad del viento) y tres valores de C_{da} constantes (0.0016, 0.0024 y 0.0032; independientes de la intensidad del viento).

La Figura 2.2 presenta los niveles en Buenos Aires simulados, utilizando coeficientes de arrastre variables respecto de la intensidad del viento, versus los observados. En general, prácticamente no se observan diferencias entre las distintas simulaciones. Además, se puede ver que los niveles simulados no presentan la misma amplitud que los valores observados.

En cuanto a los niveles en Buenos Aires simulados utilizando coeficientes de arrastre constantes (Figura 2.3), se pueden ver mayores diferencias entre las simulaciones y un acuerdo mejor con la amplitud de los valores observados.

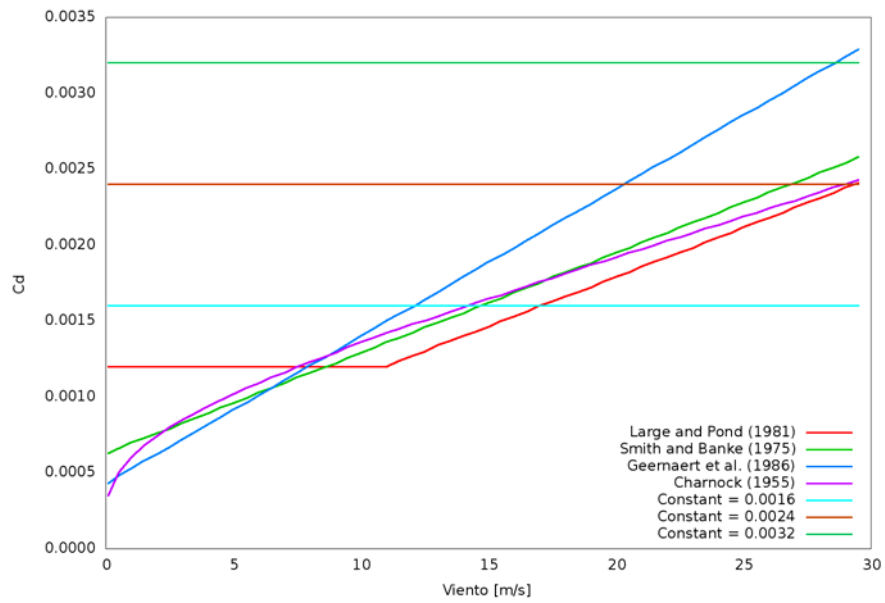
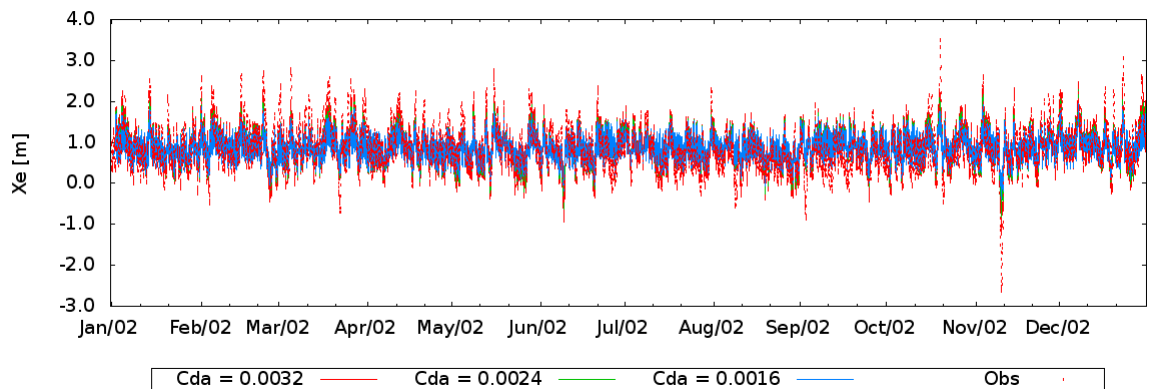
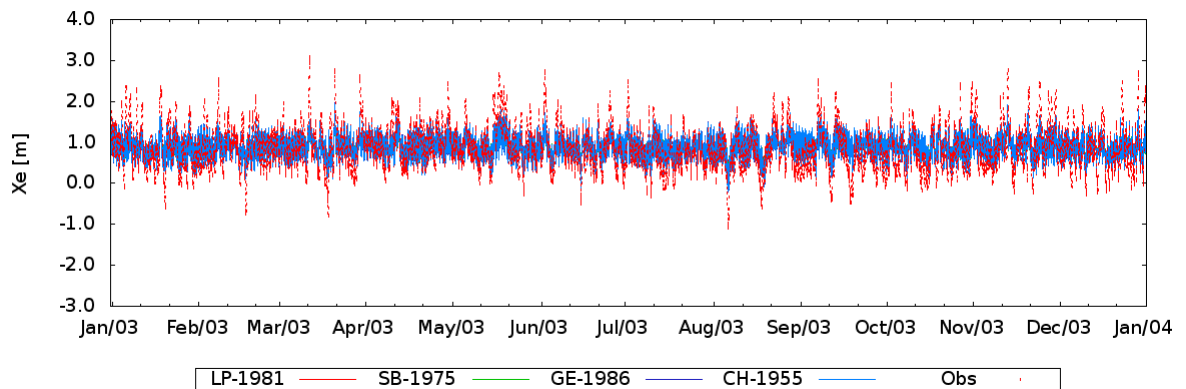


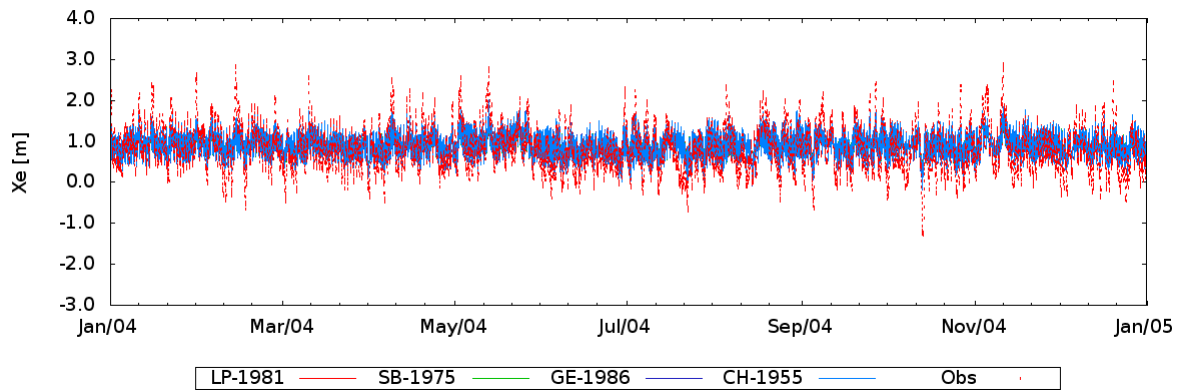
Figura 2.1. Coeficientes de arrastre utilizados en las simulaciones.



a) Año 2002

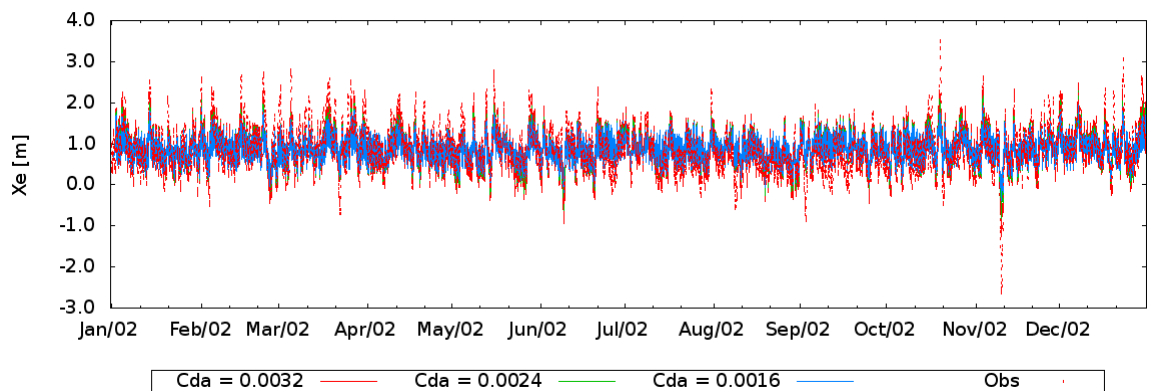


b) Año 2003

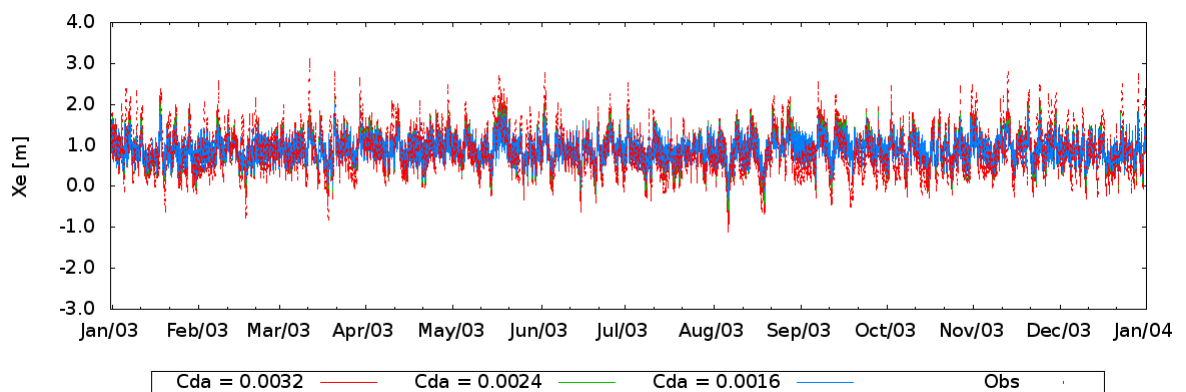


c) Año 2004

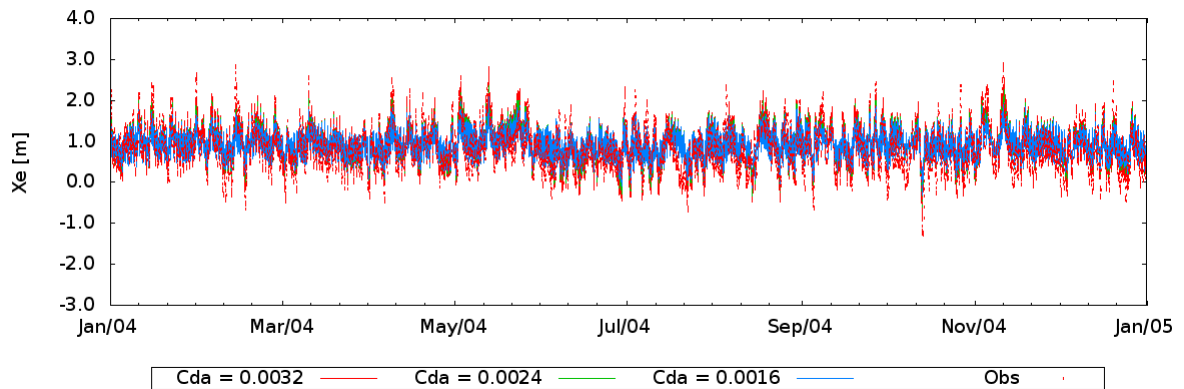
Figura 2.2. Niveles en Buenos Aires (C_{da} variables respecto de la intensidad del viento).



a) Año 2002



b) Año 2003

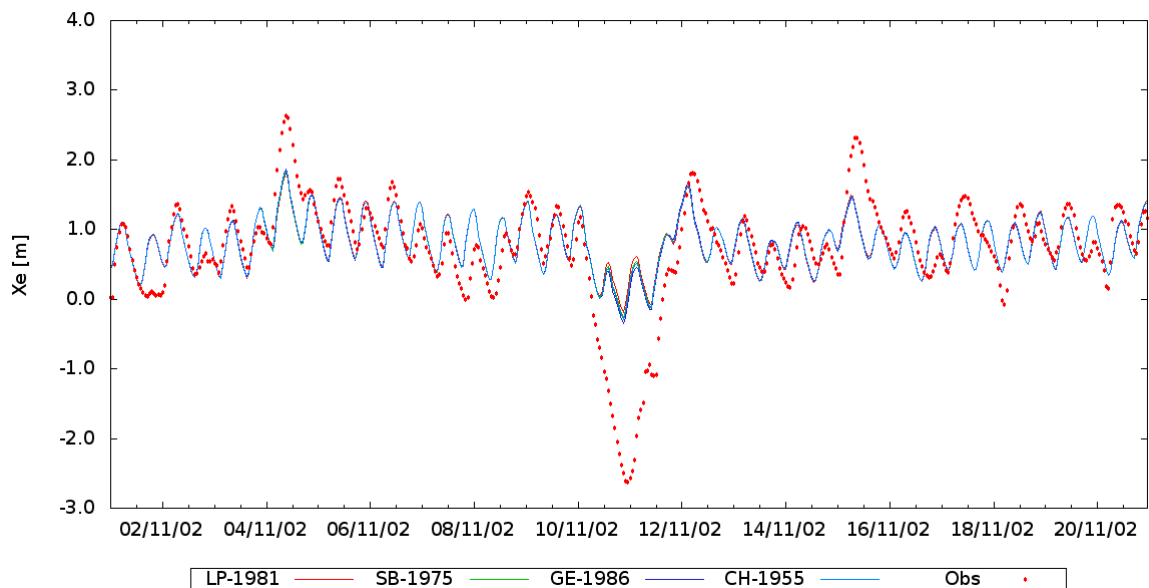


c) Año 2004

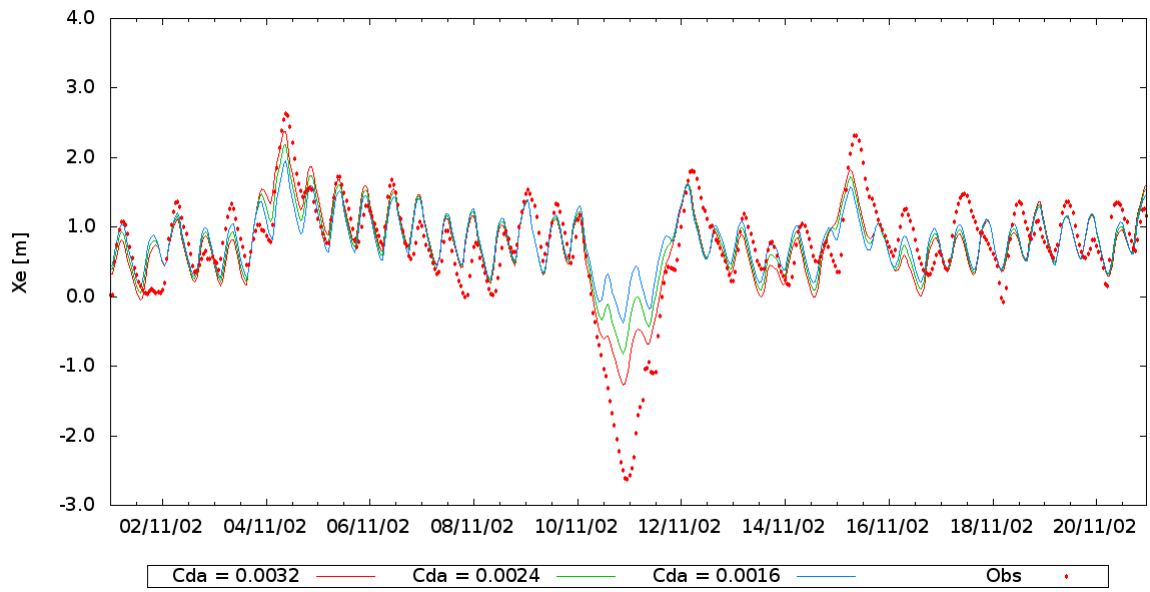
Figura 2.3. Niveles en Buenos Aires (C_{da} constantes respecto de la intensidad del viento).

Para ilustrar mejor las diferencias y observar los comportamientos de los niveles simulados en situaciones extremas, se recortaron de la ventana temporal simulada dos períodos diferentes: uno correspondiente a una bajante (11 de Noviembre 2002, -2.60 m en Buenos Aires) y otro a una sudestada (20 de Octubre 2002, 3.5 m en Buenos Aires).

El caso de la bajante se presenta en la Figura 2.4 y el de la sudestada en la Figura 2.5. En ambas situaciones se observa que los coeficientes de arrastre constantes responden mejor al nivel extremo, mientras que los coeficientes variables con la intensidad del viento muestran simulaciones prácticamente iguales mostrándose lejos de los valores pico.

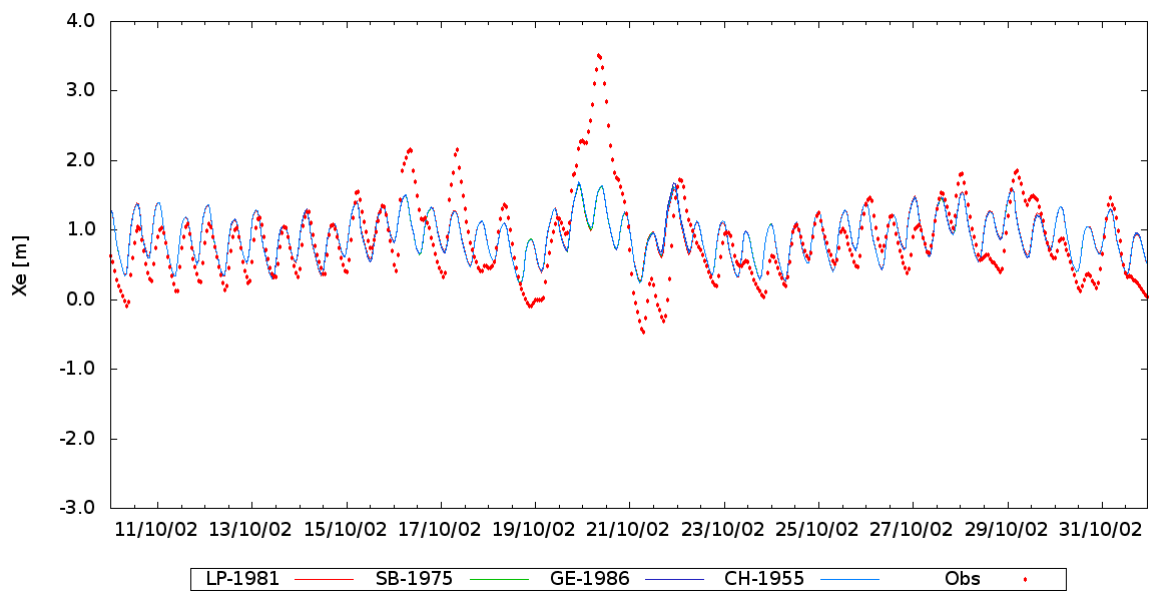


a) Utilizando coeficientes de arrastre variables respecto de la intensidad del viento.

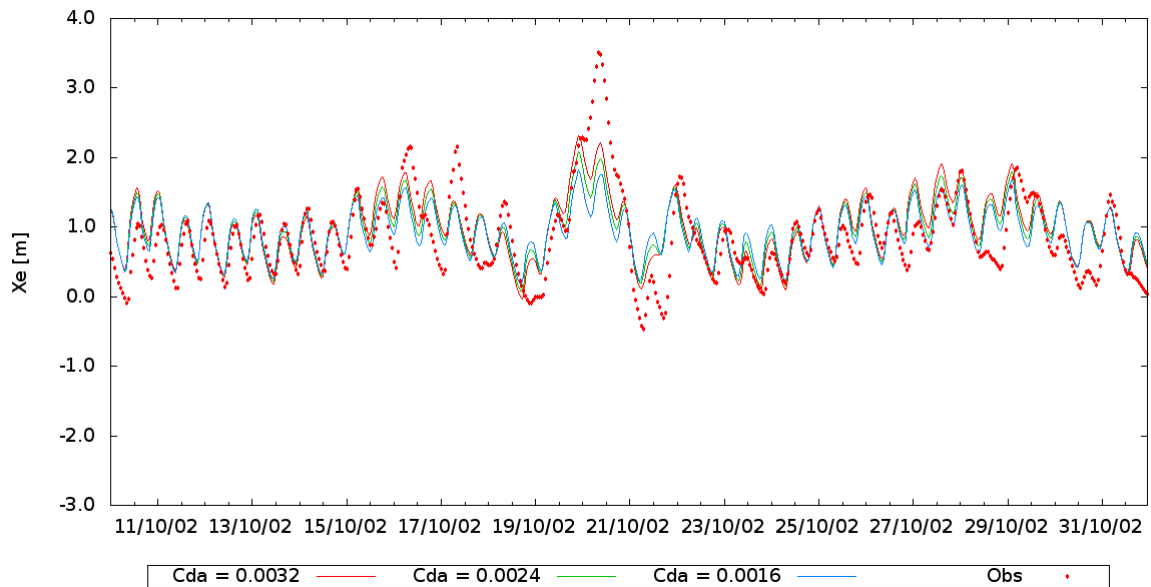


b) Utilizando coeficientes de arrastre constantes respecto de la intensidad del viento.

Figura 2.4. Niveles en Buenos Aires, Bajante de Noviembre de 2002.



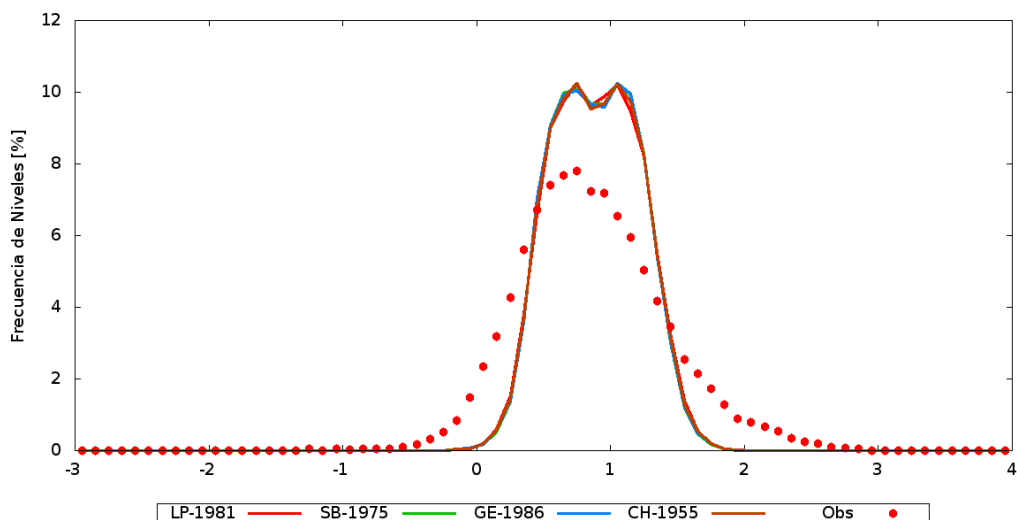
a) Utilizando coeficientes de arrastre variables respecto de la intensidad del viento.



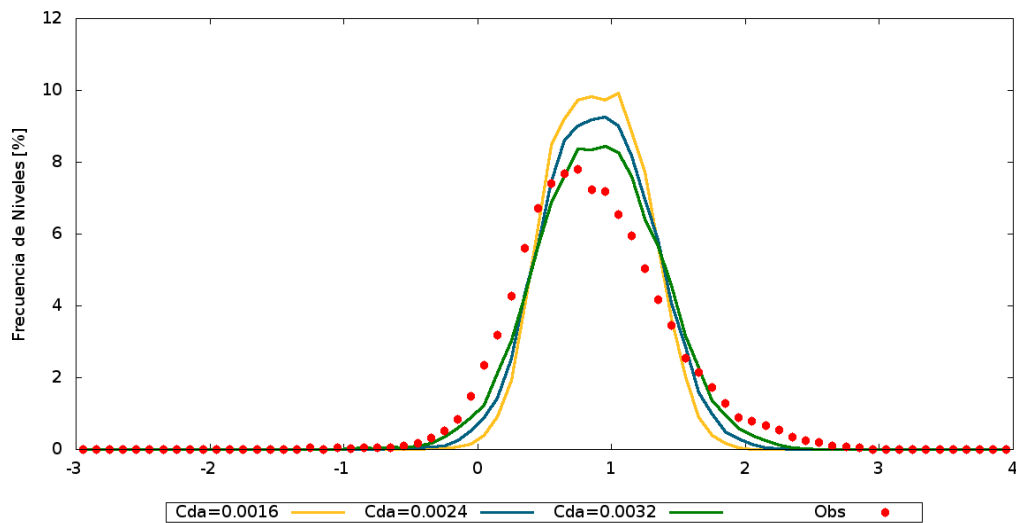
b) Utilizando coeficientes de arrastre constantes respecto de la intensidad del viento.

Figura 2.5. Niveles en Buenos Aires. Sudestada de Octubre de 2002.

En la Figura 2.6 se analizan las frecuencias de niveles observadas versus las simuladas. Aquí se refuerza la observación de que las simulaciones con los coeficientes variables respecto de la intensidad del viento están lejos de mostrar el mismo rango de ocurrencia de niveles que las mediciones. En cambio, en las simulaciones con los coeficientes de arrastre constantes se muestra un mucho mejor acuerdo en la frecuencia de niveles y un mayor rango de niveles ocurridos.



a) Utilizando coeficientes de arrastre variables respecto de la intensidad del viento.



b) Utilizando coeficientes de arrastre constantes respecto de la intensidad del viento.

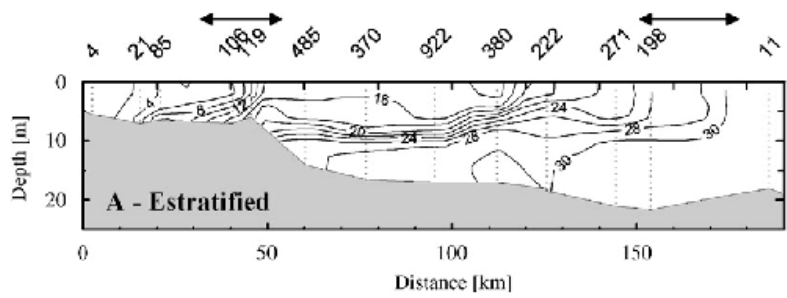
Figura 2.6. Niveles en Buenos Aires. Bajante de Noviembre de 2002.

2.3 Sensibilidad de estratificación en el frente salino

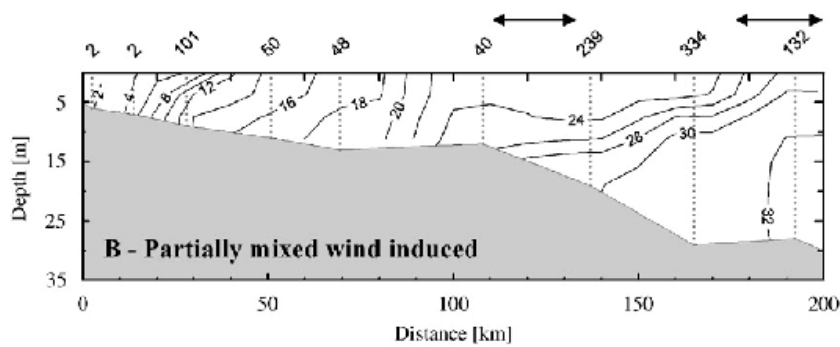
La estratificación en el frente salino del Río de la Plata varía en un rango de escalas de tiempo que involucran distintos forzantes. Particularmente, según lo que se muestra en la Figura 2.7, tomando al viento como el forzante de interés, se dan situaciones de estratificación durante la acción de vientos bajos, mezcla parcial inducida por vientos moderados y mezcla total por fuertes vientos.

Entre otras razones, resulta interesante analizar esta cuestión, desde el punto de vista biológico ya que la estratificación tiene diferentes consecuencias ecológicas, por ejemplo controlando la luz ambiente necesaria para los productores primarios, o determinando las propiedades de retención del estuario de organismos planctónicos (Acha et al., 2008).

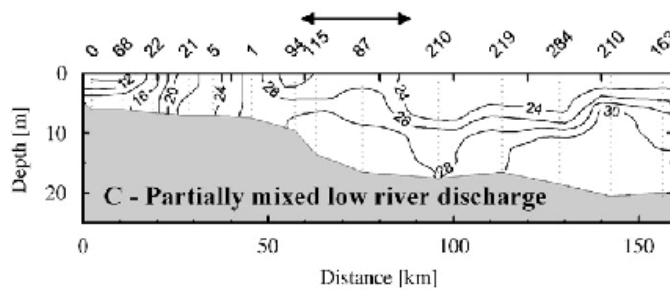
Para evaluar cuan sensible resulta la estratificación en el frente salino del Río de la Plata a los distintos valores del coeficiente de arrastre por viento, se analizaron tres tipos de indicadores durante la ventana temporal 01/Ene/2003 – 31/Dic/03: a) Densidad media de la columna de agua, b) Indicador de estratificación, y c) Salinidad superficial y de fondo. Todos los indicadores se analizan sobre el perfil de 300 km de longitud ubicado aproximadamente en el eje del Río de la Plata que se presenta en la Figura 2.8.



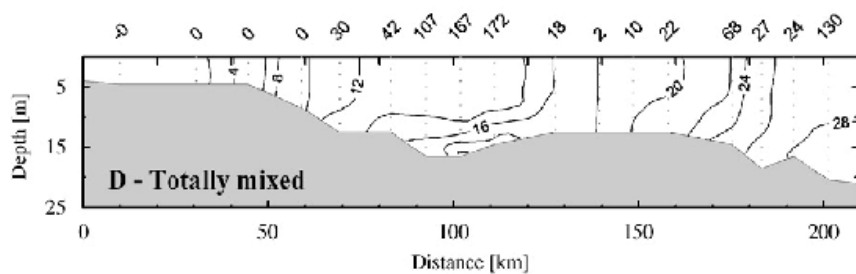
a) Estratificado (cuña salina)



b) Mezcla parcial forzada por el viento



c) Mezcla parcial inducida por las bajantes extremas en el forzante caudal



d) Mezcla total debida a fuertes vientos

Figura 2.7. Caracterización de los perfiles de salinidad en el Río de la Plata.
 Tomado de Acha et al., 2008.

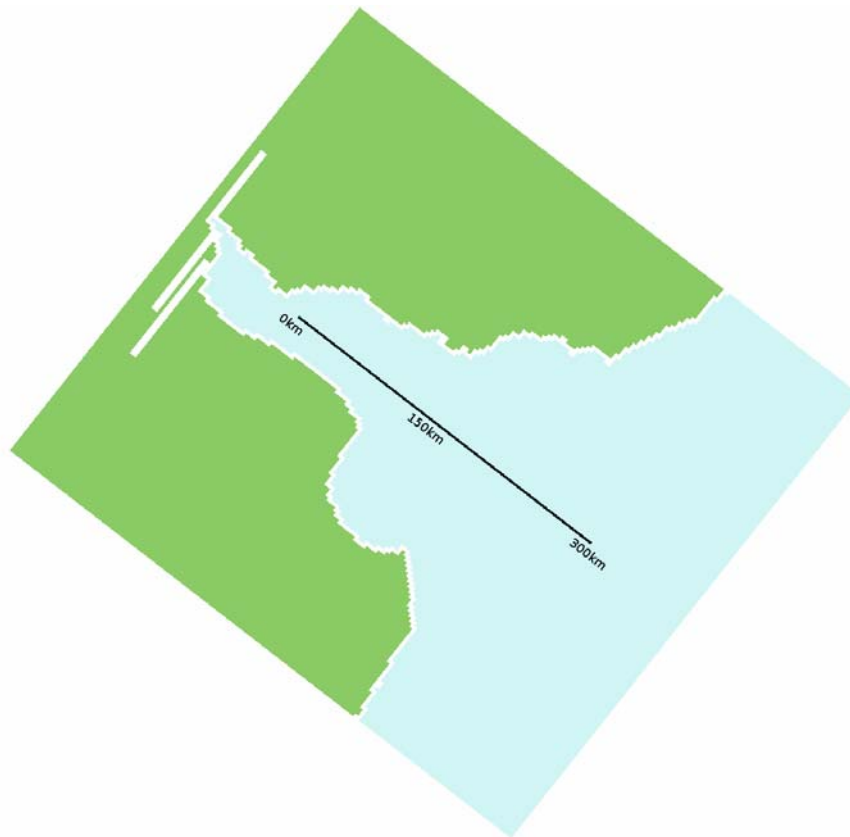
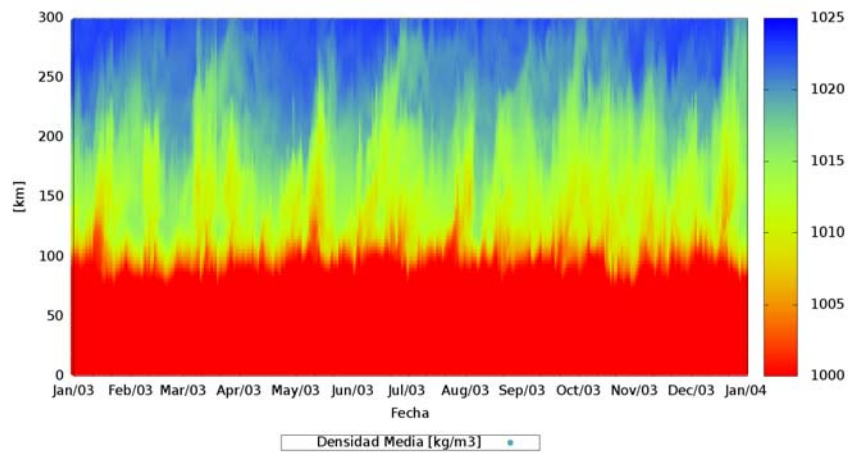
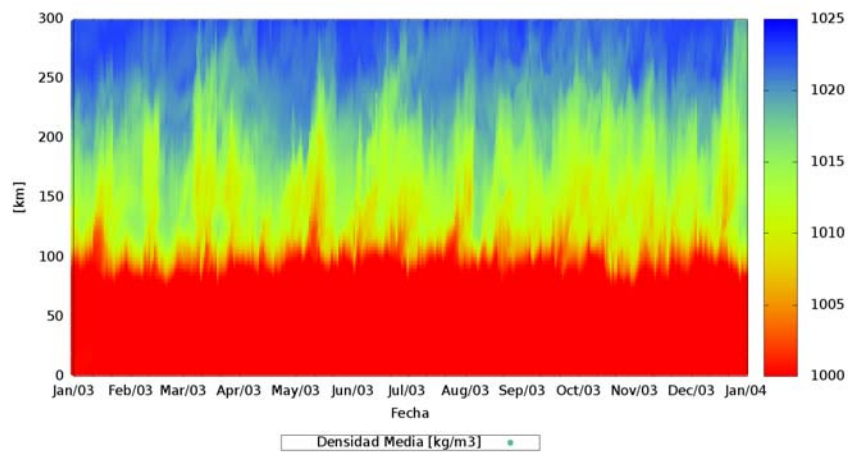


Figura 2.8 Línea de Corte Vertical.

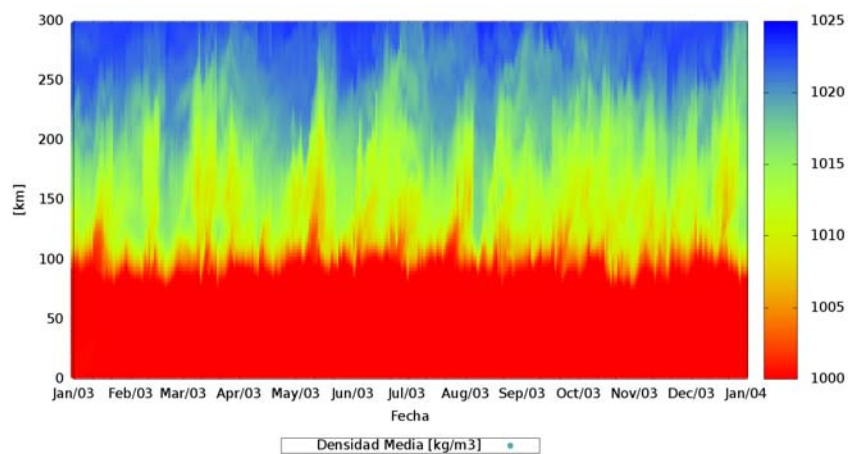
La densidad media fue obtenida post-procesando los resultados de las simulaciones. Para cada celda del dominio se tienen diez niveles en la discretización vertical de tipo *n-sigma*. Por lo tanto, se ponderó la densidad en cada celda vertical de acuerdo a la porción *n-sigma* de esa capa (desde el fondo a la superficie: 0.040, 0.035, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.150, 0.125). En la Figura 2.9 se presenta la serie temporal de densidad media en toda la longitud del corte para cada uno de los coeficientes de arrastre simulados. Surge de estos resultados que las simulaciones con los coeficientes de arrastre variables se muestran similares, con poca influencia del campo de vientos y con una zona media de transición de aproximadamente 150 km (consistente con la caracterización de perfil estratificado). Los resultados de las simulaciones con los coeficientes de arrastre constantes se muestran diferentes entre si, observándose una disminución de la zona de transición de acuerdo al aumento de los mismos (la zona media de transición disminuye aproximadamente de 150 km a 100 km).



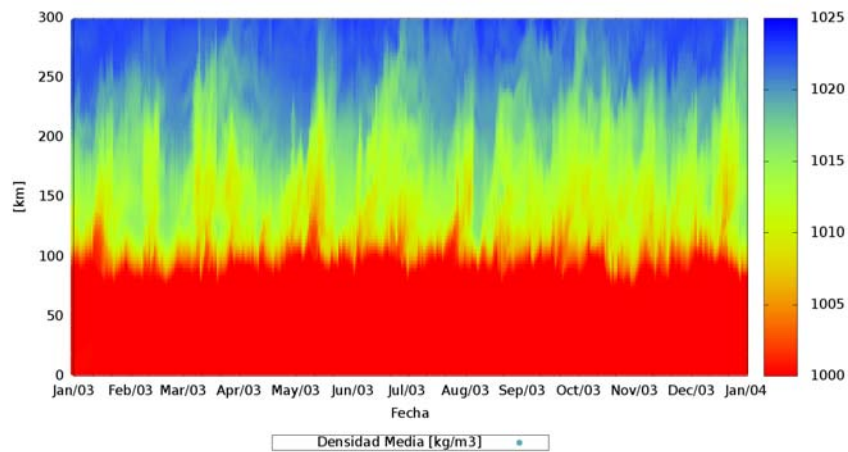
a) $C_{da} = LP-1981$



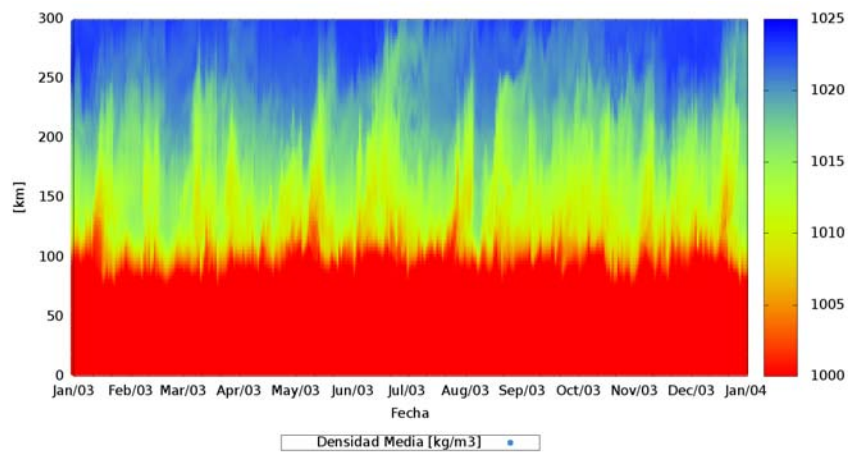
b) $C_{da} = SB-1975$



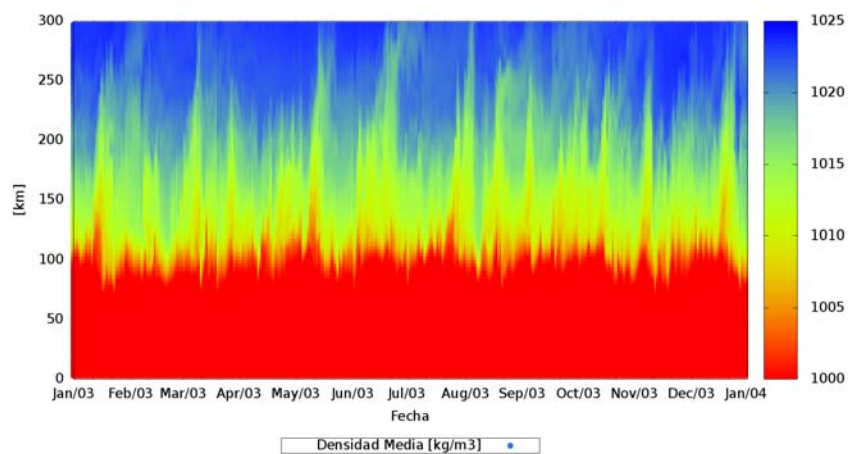
c) $C_{da} = GE-1986$



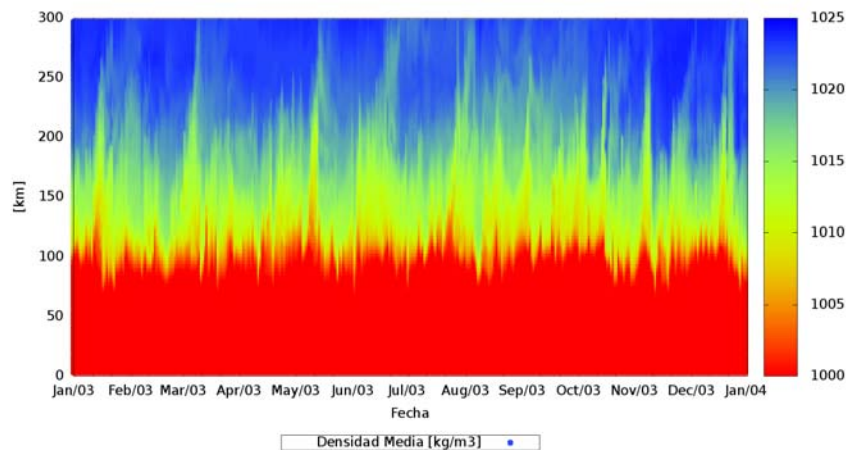
d) $C_{da} = CH-1955$



e) $C_{da} = 0.0016$



f) $C_{da} = 0.0024$



g) $C_{da} = 0.0032$

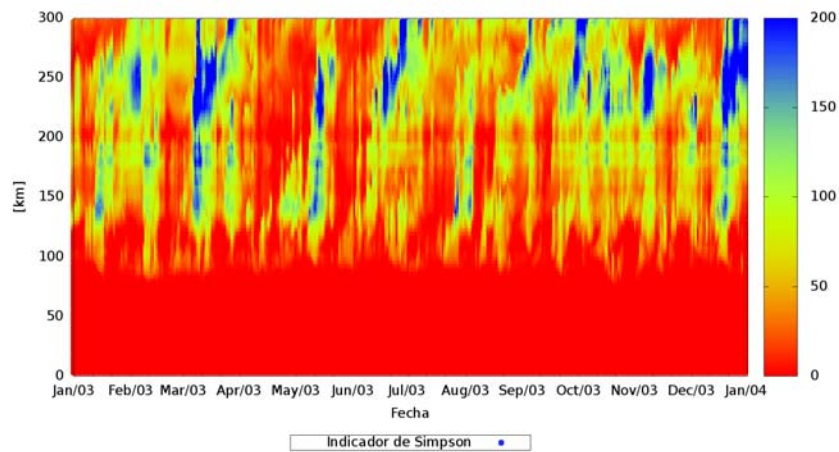
Figura 2.9 Densidad Media.

Un indicador de estratificación en un estuario es el parámetro de estabilidad de Simpson (Φ) (Simpson, 1981). Este parámetro cuantifica la energía necesaria para quebrar un gradiente de densidad hacia una condición de mezcla total en una columna de agua estratificada, y se calcula de la siguiente manera:

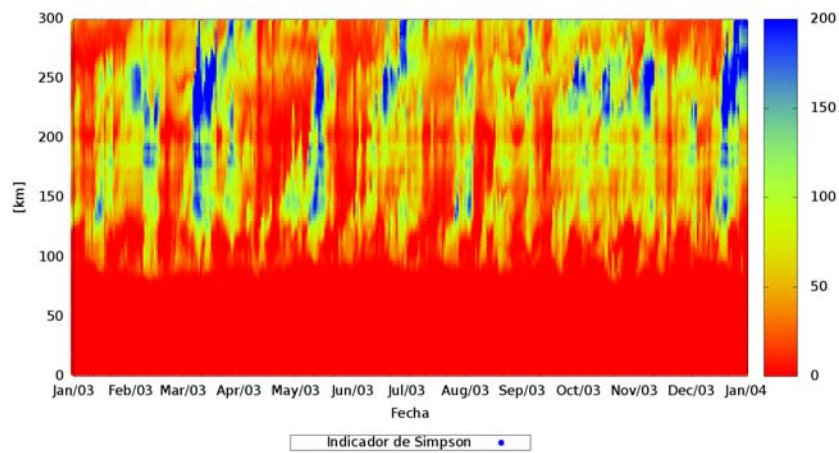
$$\Phi = \frac{1}{h} \cdot \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho) \cdot g \cdot z \cdot dz ; \quad \bar{\rho} = \frac{1}{h} \cdot \int_{-h}^0 \rho \cdot dz$$

donde g es la aceleración de la gravedad, h la profundidad total, ρ la densidad in situ, $\bar{\rho}$ la densidad media de la columna de agua, y z la profundidad. En cada perfil de la Figura 2.7 los números del eje superior muestran los valores del parámetro de estabilidad de Simpson y las flechas dobles indican la transición entre regiones estables (estratificada) e inestables (mezclados), por lo tanto se dirá que existe estratificación cuando los valores del indicador de Simpson tomen valores mayores que 200 J/m^2 .

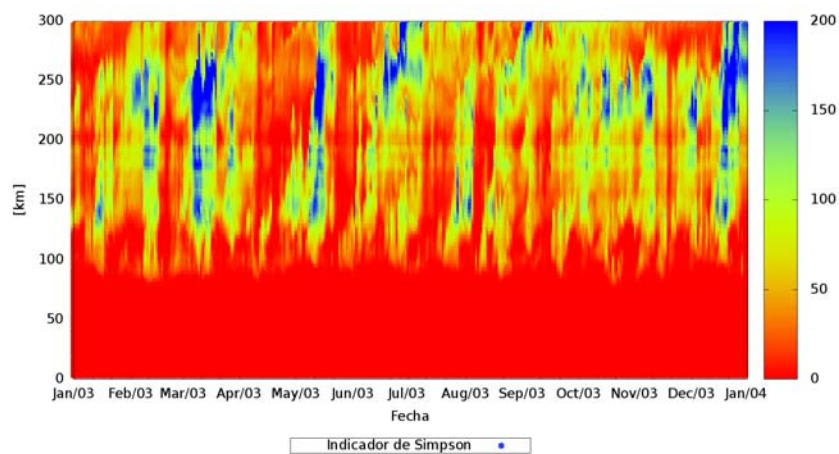
En la Figura 10 se muestran las series temporales del indicador de estratificación. En general se advierten pocos momentos de fuerte estratificación de acuerdo a lo esperable (Guerrero et al., 1997; Acha et al., 2008), esto puede deberse a la discretización vertical con la que están realizando las simulaciones. Particularmente, para el caso de los coeficientes de arrastre constantes se observa que a medida que aumentan estos el indicador de estratificación disminuye hasta casi no mostrar momentos con el perfil estratificado, con lo que se estaría sobreestimando la mezcla producida por el viento.



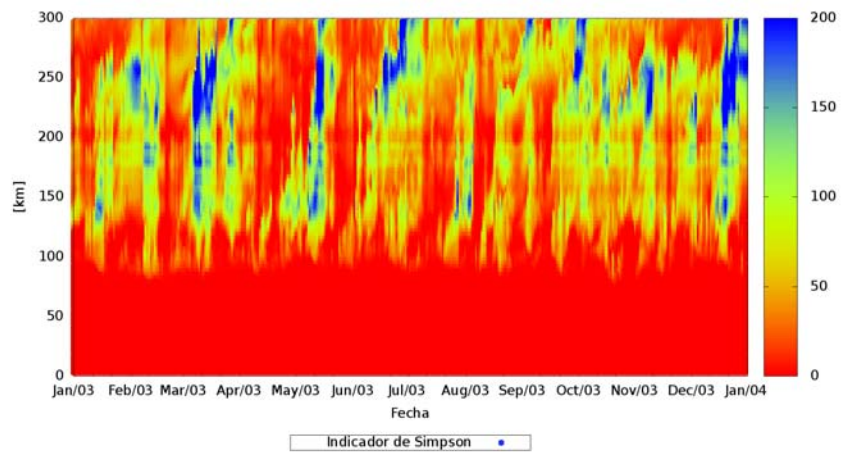
a) $C_{da} = LP-1981$



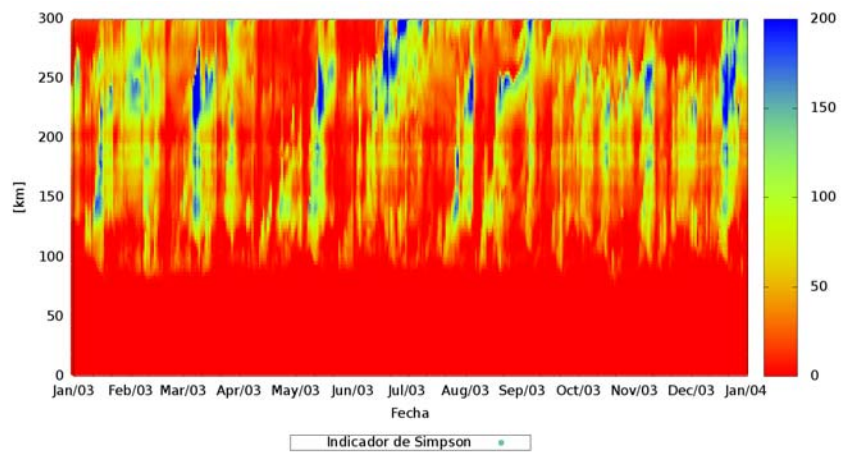
b) $C_{da} = SB-1975$



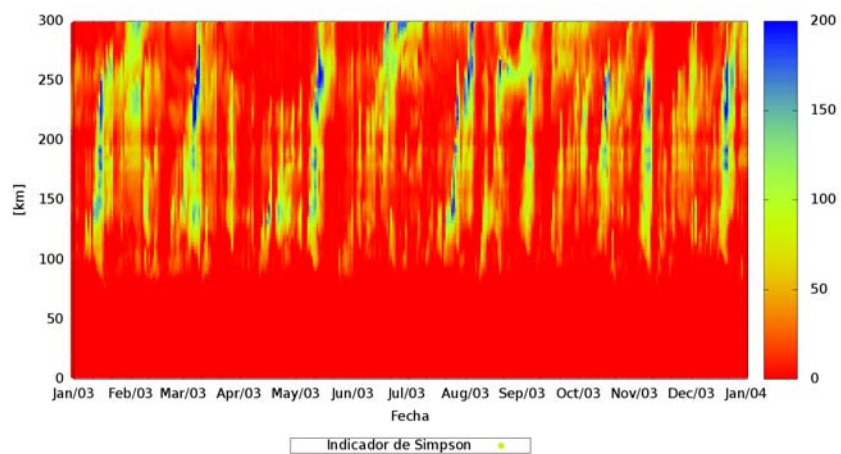
c) $C_{da} = GE-1986$



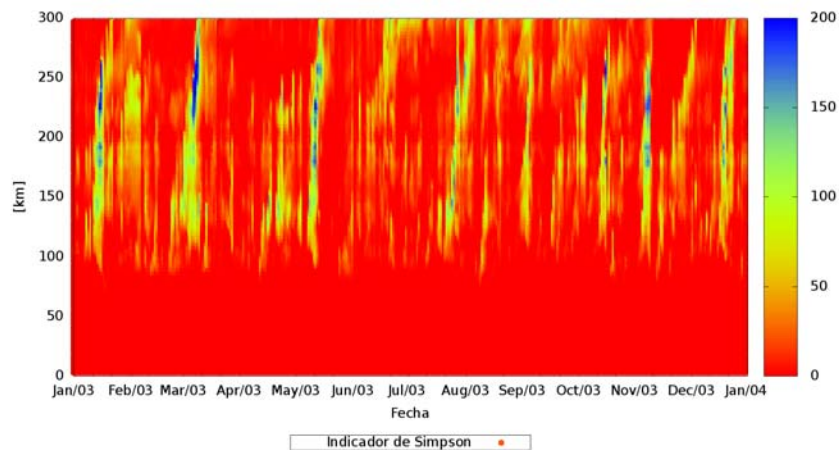
d) $C_{da} = CH-1955$



e) $C_{da} = 0.0016$



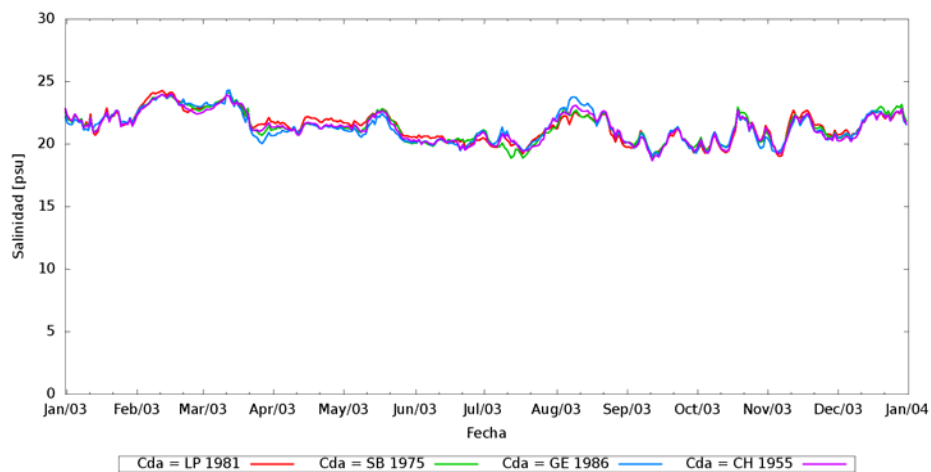
f) $C_{da} = 0.0024$



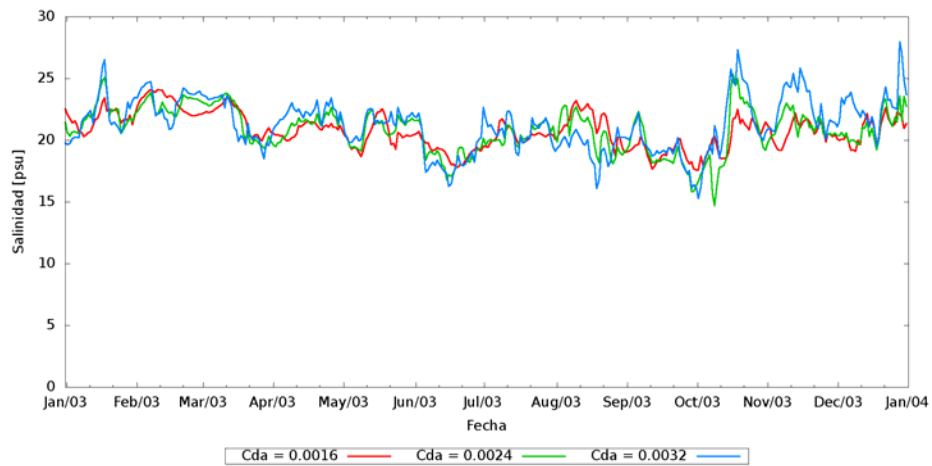
g) $C_{da} = 0.0032$

Figura 2.10. Indicador de estratificación de Simpson.

El tercer indicador tiene que ver con las diferencias de salinidad en el perfil. Esta evaluación se realiza a partir de las series de salinidad en la capa de fondo y en la superficie en el *km* 150 del perfil propuesto (Figuras 2.11 y 2.12). Se acompaña este análisis con los perfiles de salinidad para una fecha determinada (Figura 2.13). Consistentemente con lo que muestran los otros indicadores, no se observan diferencias entre las simulaciones con coeficiente de arrastre variable y se advierten mezclas crecientes de acuerdo al aumento de los coeficientes de arrastre constantes.

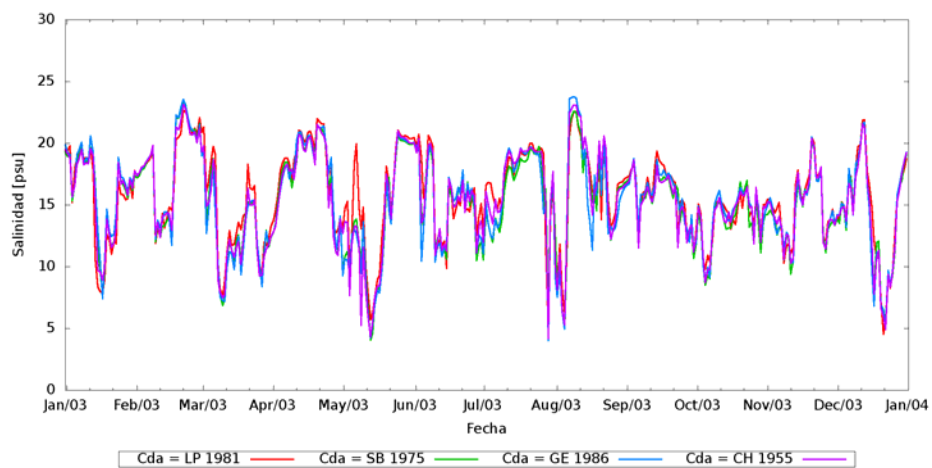


a) C_{da} variables. Km 150.

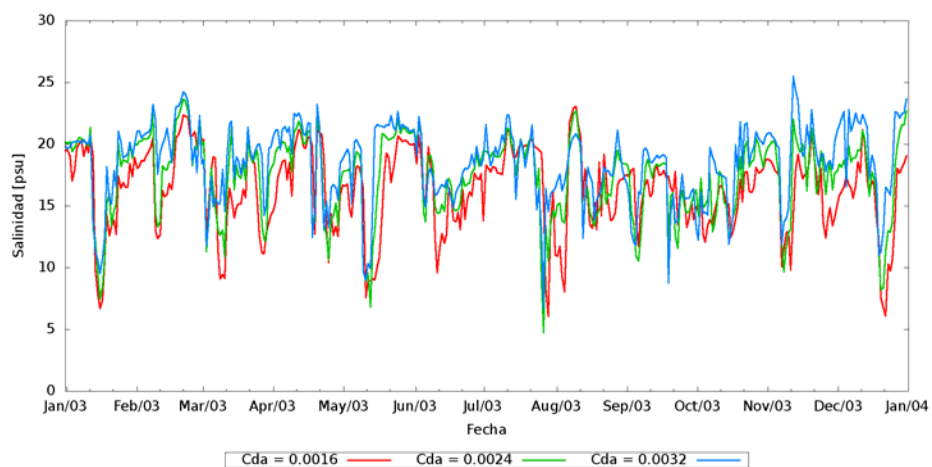


b) C_{da} constantes. Km 150

Figura 2.11. Series de salinidad en la capa de fondo.

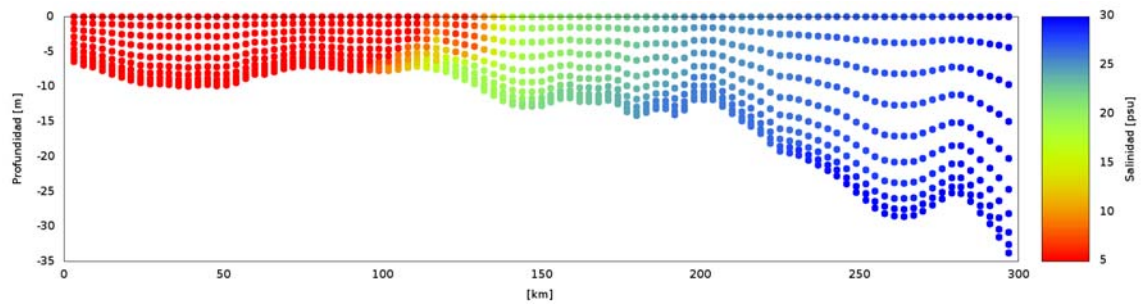


a) C_{da} variables. Km 150.

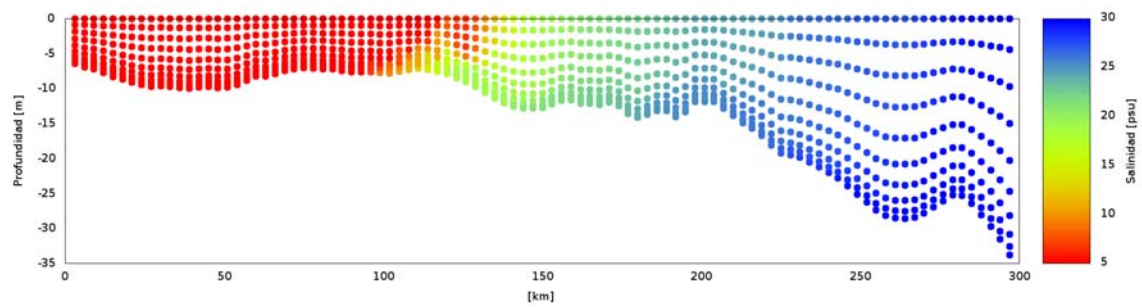


b) C_{da} constantes. Km 150

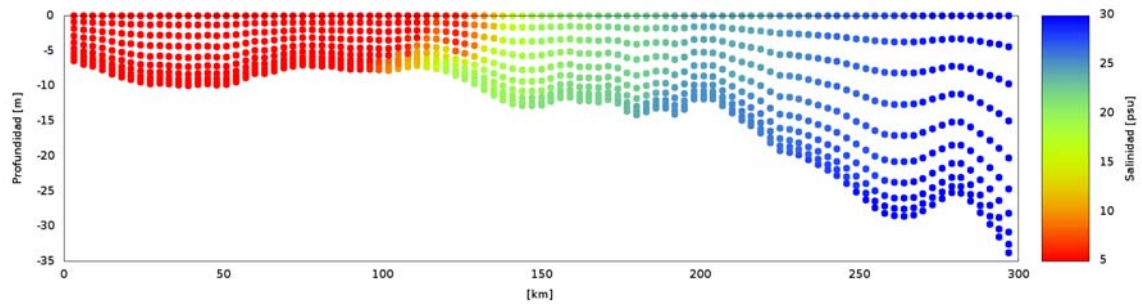
Figura 2.12. Series de salinidad en la capa superficial.



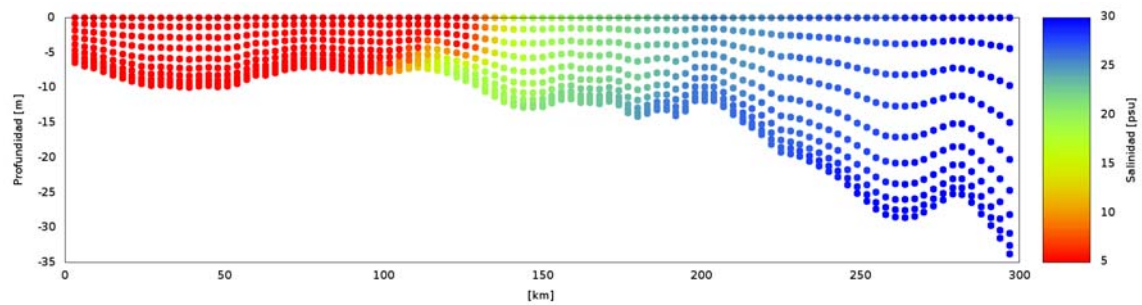
a) $C_{da} = LP-1981$



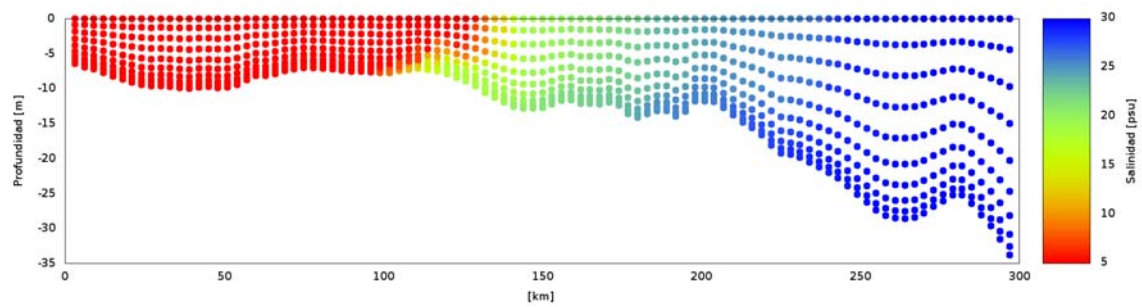
b) $C_{da} = SB-1975$



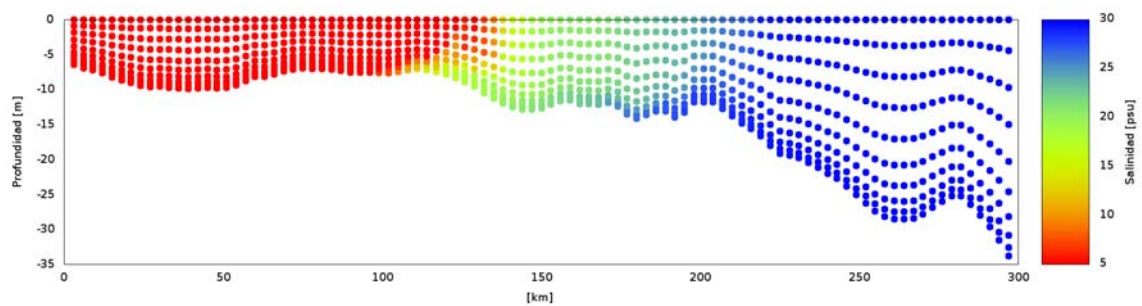
c) $C_{da} = GE-1986$



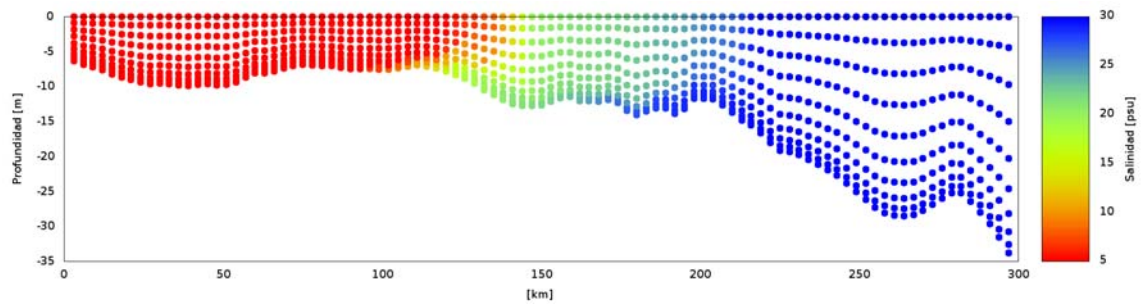
d) $C_{da} = CH-1955$



e) $C_{da} = 0.0016$



f) $C_{da} = 0.0024$



g) $C_{da} = 0.0032$

Figura 2.13. Perfil de salinidad (15 de Marzo de 2003).

3 CONCLUSIONES

La necesidad de lograr el mejor acuerdo con el amplio rango de niveles medidos, para el caso de las observaciones en Buenos Aires, obliga a pensar en utilizar coeficientes de arrastre con valores altos (consiguiéndose esto en el Sistema de Modelación MARS-3D con coeficientes de arrastre constantes).

Sin embargo, coeficientes de arrastre del viento con valores altos, mantienen al frente salino prácticamente en mezcla parcial la mayor parte del tiempo (con muy poca estratificación), lo cual resulta inconsistente con las observaciones.

Por lo tanto, si no se interviene sobre los datos de viento (los reanálisis de NCEP/NCAR tienden a subestimar la velocidad del viento, Meccia (2008)) la elección de la mejor forma de calcular el coeficiente de arrastre del viento debe surgir de un acuerdo global de validación. En el caso de este trabajo los mejores resultados se obtienen con la elección del $C_{da}=0.0024$ (constante).

REFERENCIAS

- Acha, E.M., Mianzan, H., Guerrero, R., Carreto, J., Giberto, D., Montoya, N., Carignan, M., 2008, An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary, *Continental Shelf Research*, 28, 1579– 1588.
- Charnock, H., 1955, *Wind Stress on a Water Surface*, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 81, 639-640.
- Geernaert, G.L., Katsaros, K.B., Richter, K., 1986, Variation of the Drag Coefficient and Its Dependence on Sea State, *J. Geophys. Res.*, 91 (C6), 7667–7679, doi: 10.1029/JC091iC06p07667.
- Guerrero, R.A., Acha, E.M., Framiñan, M.B., Lasta, C.A., 1997, Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17 (7), 727-742.
- Large, W.G., Pond, S., 1981, *Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds*, *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 324-336.
- Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31, 233–250.
- Meccia, V.L., 2008, Estudios de la circulación forzada por el viento en el estuario del Río de la Plata y sus implicancias en la estratificación: resultados del análisis de datos y simulaciones numéricas. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 151 pp.
- Simpson, J. H. 1981. The shelf-sea fronts: implications of their existence and behavior. *R. Soc. Lond. Phil. Trans. Series A* 302:531–546.
- Smith, S.D., Banke, E.G., 1975, *Variation of the Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed*, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, 665-673.