

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

DETERMINACION DE CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN
SUSPENSION A PARTIR DE PERFILADORES DE CORRIENTE
ACUSTICOS EN LA COSTA DE MONTEVIDEO, URUGUAY

Daniel Bellón, Francisco Pedocchi, Ismael Piedra-Cueva

Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. J.

Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay

dbrey@fing.edu.uy, kiko@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy.

RESUMEN:

Este artículo resume las investigaciones que se viene realizando para comprender el comportamiento de los sedimentos en suspensión en el Río de la Plata. En este ambiente continuamente cambiante, la toma directa de muestras habitualmente empleada para determinar la concentración de sólidos en suspensión en la columna de agua resulta de limitada utilidad. Un Perfilador de Corriente Acústico (ADCP) de 1200 kHz fue fondeado en la costa de Montevideo, Uruguay y el retorno acústico reportado por este instrumento fue utilizado para estimar la concentración de sólidos en suspensión. Con este fin se tomaron diversas muestras de agua para obtener una calibración entre la intensidad acústica y la concentración de sólidos en suspensión. Esta calibración fue posteriormente validada con un grupo independiente de las muestras y los errores obtenidos fueron en todos los casos inferiores al 10%, demostrando que el método descrito es adecuado para ser aplicado en este entorno. Utilizando esta calibración las interrelaciones ente las series temporales de la concentración de sólidos suspendidos y de las variables hidrodinámicas se estudiaron mediante inspección visual y el análisis espectral, y se pudo identificar una relación clara entre ellas.

ABSTRACT:

This article summarizes current efforts towards the advance of the understanding of the suspended sediments behavior in the Río de la Plata. In this changing environment the direct sampling, usually employed for the estimation of the suspended solid concentration in the water column is of limited use. A 1200 kHz Acoustic Current Profiler (ADCP) was deployed in front of the coast of Montevideo, Uruguay, and the acoustic backscatter reported by this instrument was used to estimate the suspended solids concentration. From the water samples a calibration curve between acoustic intensity and the suspended solids concentration was obtained. This calibration was then validated against an independent group of samples and the obtained errors were in all cases below 10%, demonstrating that the described method can be used with some confidence in this environment. Finally, using this calibration the time series of suspended solids and hydrodynamic variables were studied using visual inspection and spectral analysis and a direct link between them could be observed.

PALABRAS CLAVES:

Sólidos suspendidos, Ultrasonido, Hidroacústica, ADCP.

INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata es el cuerpo de agua más importante de la República Oriental del Uruguay. Sus propiedades físicas lo convierten en un estuario donde se mezclan las aguas saladas del Océano Atlántico y las aguas dulces provenientes de los ríos Paraná y Uruguay. La ubicación geográfica del área de estudio se muestra en la Figura 1. La compleja dinámica de este ambiente está dominada por la combinación del alto caudal fluvial proveniente de los ríos Paraná y Uruguay, la variación temporal de las componentes de marea astronómica y meteorológica del Océano Atlántico, los gradientes de salinidad resultantes de la mezcla de las aguas dulces y saladas, las variaciones batimétricas de la zona y los vientos locales.

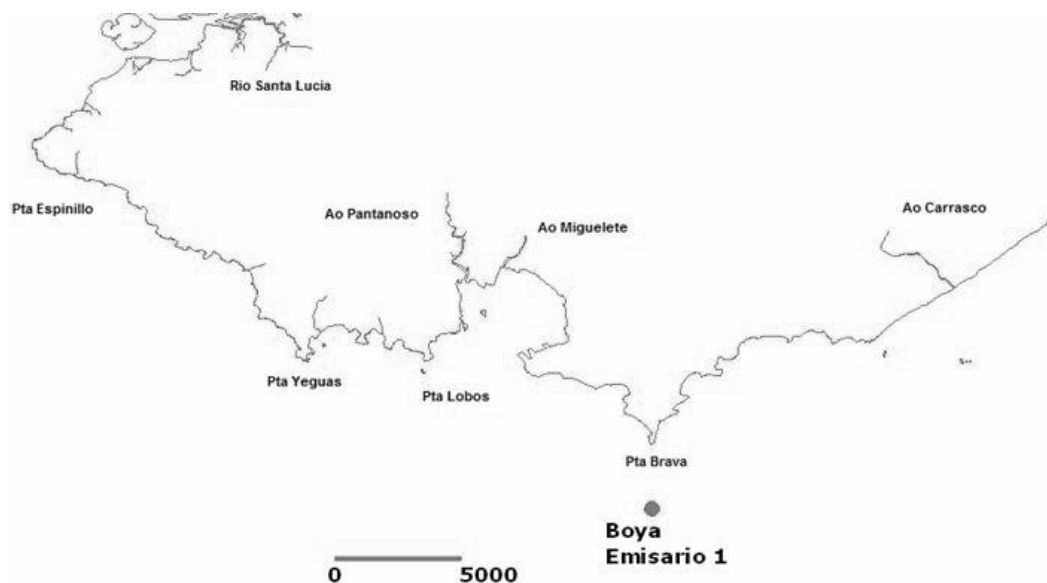


Figura 1.- Costa de Montevideo, los instrumentos se fondearon frente a Punta Brava..

Los sedimentos en suspensión son una parte importante del total del transporte de sedimentos en este ambiente, y por esto la importancia de contar con mediciones precisas de la concentración de sólidos en suspensión (CSS). Hay varios métodos que pueden utilizarse para estimar la CSS, a fin de seleccionar el más adecuado para el caso en estudio deben tenerse en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Un método clásico para la determinación de concentraciones de sedimentos consiste en tomar periódicamente muestras de agua en sitio para luego ser analizadas en laboratorio. Las principales ventajas de este método radican en que el valor obtenido consiste en una medida directa de la magnitud buscada y que como producto secundario puede conocerse la granulometría de los sedimentos de la zona. Las principales desventajas de esta metodología radican en que requiere la presencia de personal en el lugar para la extracción de las muestras y que el tiempo que transcurre entre la toma de muestras hace imposible captar la dinámica de varios de los procesos de interés de pequeña y mediana escala, así como la toma de muestras en condiciones extremas.

Otro de los métodos utilizados consiste en analizar las muestras mediante sensores ópticos, en particular sensores que utilizan la retrodispersión óptica (OBSs). Esta técnica permite obtener series continuas de datos y además no es intrusiva, no afectando los procesos que se intentan medir. Como una de las principales desventajas se destaca que las medidas de estos sensores son particularmente afectadas por condiciones de alta turbidez y por el biofouling (Hamilton et al, 1998). Además la medición de los sólidos suspendidos se obtiene a través de una magnitud indirecta, la cual depende fuertemente del tamaño de grano y del color de los sedimentos (Downing, 1996). Esto requiere contar con calibraciones para cada condición del ambiente de estudio, limitando su utilidad en ambientes tan cambiantes como el Río de la Plata.

En los últimos años se ha generalizado el uso de perfiladores de corriente acústicos (más comúnmente conocidos por su sigla en inglés ADCPs) para medir perfiles de velocidades en cuerpos de agua. Estos instrumentos aparte de medir la velocidad del agua, miden también el retorno acústico o backscatter, que puede ser usado para estimar la CSS (Thorne et al, 1991). Esta técnica comparte varias de las ventajas y desventajas de retrodispersión óptica. Sin embargo, es menos sensible a los efectos de la contaminación biológica, un factor clave en el medio ambiente bajo estudio. El principal objetivo que persigue este trabajo es poner en práctica una nueva técnica para la estimación de la concentración de sólidos en suspensión y a partir de esto el estudiar la dinámica de los sedimentos en relación a la hidrodinámica del Río de la Plata en la cercanía de la costa de Montevideo.

MATERIALES Y METODOS

La técnica seleccionada para determinar la concentración de sedimentos en suspensión se basa en la aplicación de la Ecuación de Sonar, desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial para facilitar el cálculo de la distancia máxima de medición de los sistemas de sonar.

La ecuación del Sonar vincula a través de relaciones aritméticas simples algunos parámetros característicos de la fuente, objeto a medir y el medio en el que viajan las ondas sonoras. Una forma de obtener esta ecuación es tomar en consideración un origen y destino, ambos sumergidos en un medio y resolver el problema condición de frontera con la aplicación de la formulación integral de Helmholtz (Schenck, 1986). Una formulación simplificada de la ecuación Sonar se puede escribir de la siguiente manera (Urick, 1975):

$$RL = SL - 2TL + TS, \quad [1]$$

donde RL es el nivel de retorno acústico o backscatter, SL es el nivel de fuente, que es la intensidad de la señal emitida, 2TL es la pérdida de transmisión en ambos sentidos, y el TS es la potencia reflejada por el objetivo, que depende de la relación entre la longitud de onda y el diámetro de las partículas.

A partir de la Ecuación [1] puede obtenerse la ecuación para la dispersión para partículas pequeñas

$$CSS_{est} = 10^{(a+b.RB)}, \quad [2]$$

donde RB es el backscatter relativo, que es igual al nivel de eco medido mas las pérdidas de sonido por transmisión, o sea, expresando estas magnitudes con la nomenclatura utilizada, $RB = RL + 2TL$ (Thevenot et al 1992) y CSS_{est} es la concentración estimada de sólidos en suspensión. Los términos a y b deben obtenerse mediante calibración.

Para la calibración de los términos a y b de la Ecuación [2] se tomaron muestras de campo a distintas profundidades utilizando botellas muestreadoras, las cuales se muestran en la Figura 2. El principio de funcionamiento de las mismas se basa en un mecanismo del tipo gatillo que se acciona desde la superficie, y que cierra la botella al obteniendo una muestra de agua a la profundidad deseada. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería (Figura 3) y se cruzaron los datos con los obtenidos con el ADCP de 1200 kHz de la firma RD Instruments instalado en la costa de la ciudad de Montevideo (Figura 4). Más precisamente el instrumento fue fondeado al sur de Punta Brava (34 ° 57 '36" latitud Sur y 56 ° 09' 39" longitud Oeste, cerca de la salida del emisario subacuático de aguas residuales de la ciudad).

La configuración seleccionada para la toma medidas fue cada 30 minutos para las corrientes y cada 3 horas para el oleaje, en celdas distantes 35 cm entre ellas. La configuración espacial seleccionada consistió en colocar el ADCP en el lecho del estuario mirando hacia la superficie (uplooking), por lo cual el instrumento debió ser anclado al lecho del río utilizando el muerto de hormigón que es

utilizado para fijar la boya “Emisario 1”.

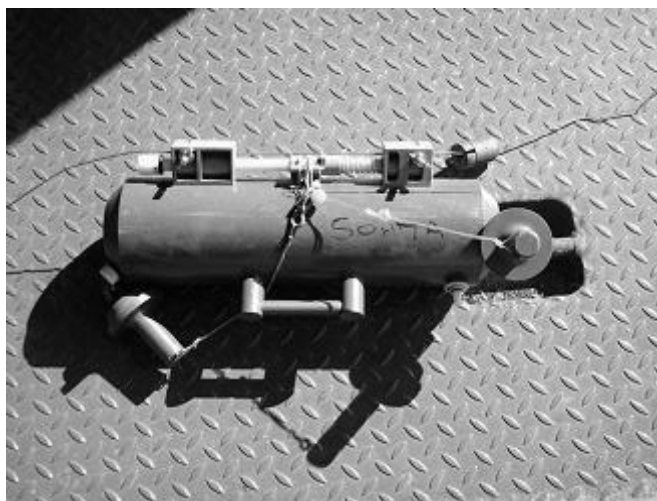


Figura 2.-Botellas utilizadas para el muestreo de CSS en campo.



Figura 3.- Equipamiento de Laboratorio utilizado para el análisis de CSS.



Figura 4.- Imagen del ADCP en la cubierta de la embarcación durante la preparación para su fondeo.

Los sedimentos de la zona fueron caracterizados en base a una muestra de fondo cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Como se puede observar en la Tabla 1 el sedimento del lecho del río es en su mayoría del tipo fino y muy fino compuesto principalmente por arcillas y limos. El detalle de la composición de los sedimentos no es menor, ya que la mayor parte de la teoría para la estimación de sedimentos en suspensión a partir del retorno acústico ha sido desarrollada para sedimentos de tipo granular. Por otro lado el retorno acústico que recibe el instrumento está directamente relacionada con el tamaño y la distribución de tamaños del sedimento (Thorne et al, 2002), y para una frecuencia de sonido dada el retorno disminuye a media que el sedimento se hace más fino. Las partículas de sedimento fino tienen la capacidad de agregarse formando flocs o agregados. La distribución de tamaños de los agregados no es fija y depende de la hidrodinámica, y la química del agua y los sedimentos. Esto que inicialmente puede verse como una dificultad adicional es lo que permite que exista un retorno acústico medible en un ambiente donde predomina el material muy fino. Recientemente algunos autores han utilizado el retorno acústico para la determinación de la CSS en este tipo de sedimentos con relativo éxito (Fugate and Frederichs, 2002, Ha et al, 2009).

Tabla 1.- Análisis granulométrico del lecho del río en la zona de análisis.

Material	Porcentaje (%)
Arenas	0,45
Limos	37,09
Arcillas	62,46

Para el análisis del comportamiento de los sedimentos en relación con las variables hidrodinámicas de la zona, se considerará como principal forzante a la tensión de corte en el fondo. Se utilizará la siguiente definición simplificada para el cálculo de tensión de fondo

$$\tau = \tau_c + \tau_o = \frac{1}{2} \rho f_c U_c^2 + \frac{1}{8} \rho f_o U_o^2, \quad [3]$$

donde U_c es el modulo de la velocidad en el lecho del río, la que aproximaremos por la velocidad obtenida por el ADCP en la celda más cercana al fondo, U_o es el valor de la velocidad orbital en la cercanía del fondo producida por el oleaje. Esta última es determinada a partir de los registros de altura de ola utilizando la teoría lineal del oleaje (Clifton, 1984). Los coeficientes f_c y f_o son los coeficientes de fricción para cada una de las velocidades mencionadas anteriormente y ρ es la densidad del fluido. Estimando todas las magnitudes que intervienen en la ecuación [3], se observa que ambos sumandos son del mismo orden, por lo que un primer análisis de la variación temporal de la concentración se realizará utilizando la suma de los cuadrados de las velocidades de corriente y orbital como estimador del esfuerzo de corte sobre el lecho.

CALIBRACIÓN

Una regresión lineal de los datos fue realizada para determinar los coeficientes a y b de la Ecuación [2]. Los valores obtenidos de la regresión fueron $a = 0,6223$ y $b = 0,0262$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,73$ (Figura 2). Estos valores están en el orden de los valores reportados por otros autores en la literatura para instrumentos similares (Gartner, 2004).

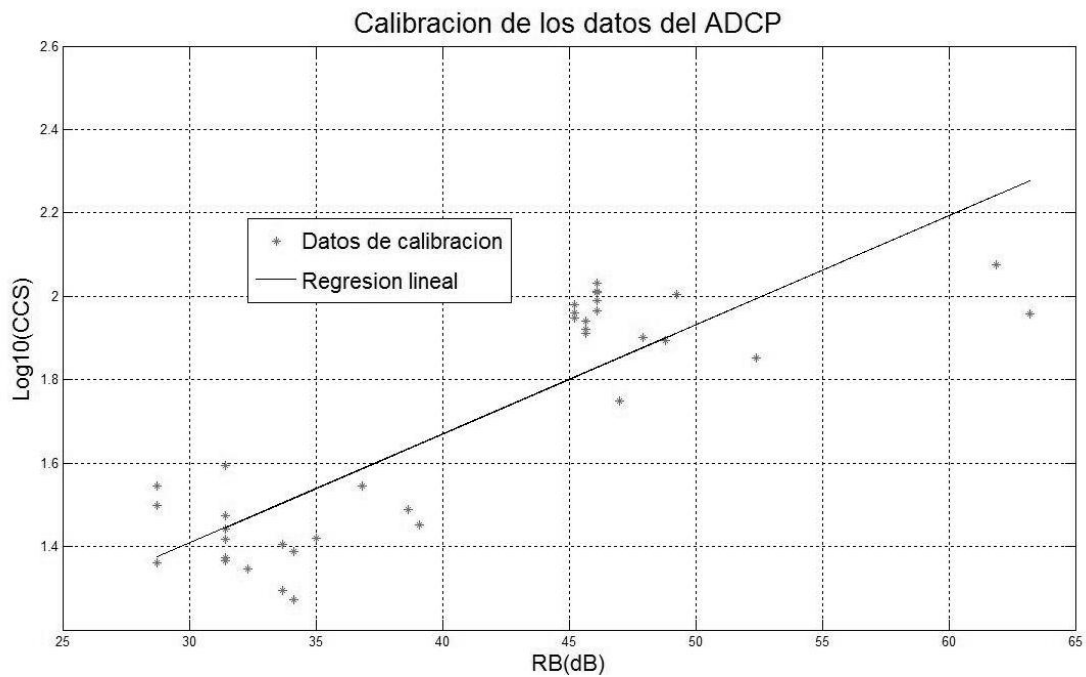


Figura 5.-Resultados de la calibración de los datos del ADCP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de CSS se estimaron a partir de los datos disponibles de intensidad de retorno acústico (backscatter) reportados por el ADCP usando la ecuación del Sonar para pequeñas partículas (Ecuación 2) y los factores de calibración presentados en la sección anterior. Se analizaron en primera instancia las principales magnitudes estadísticas de las series, obtenidas para distintas profundidades, las cuales arrojaron que las concentraciones más altas se registran en las zonas cercanas al lecho del río, como era de esperar. En la Figura 6 se presentan los resultados de estos análisis para las celdas 1 (0.87 m del lecho), 5 (2.27 m del lecho), 10 (4.02 m del lecho) y 15 (5.77 m del lecho).

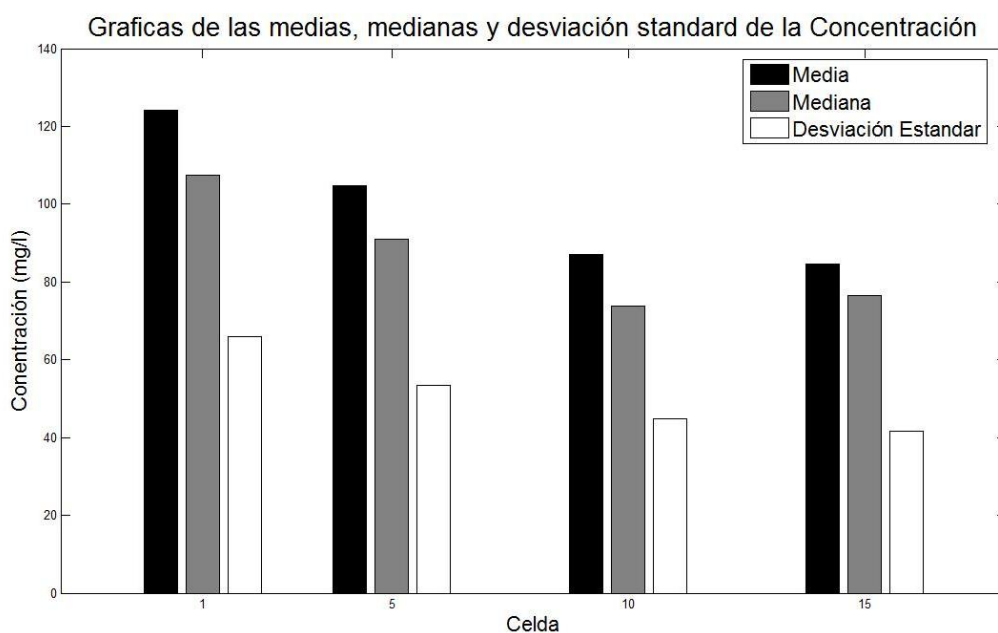


Figura 6.- Principales magnitudes estadísticas para las celdas analizadas, celdas 1, 5, 10 y 15 ubicadas a 0.87, 2.27, 4.02 y 5.77 m del lecho.

En segunda instancia se buscó analizar las relaciones que pudieran existir entre la CSS y las variables hidrodinámicas, que son también medidas por el ADCP (corrientes y oleaje). Los principales resultados que se obtuvieron son que existe una relación relativamente fuerte entre las medidas de concentración y velocidad en las celdas del fondo, mientras que la relación se hace más débil a medida que nos alejamos del mismo (Figuras 7 a 10). En la Figura 7, donde se presentan los espectros de velocidad y concentración registrados en la celda 1 cercana al fondo. Puede observarse que hay una fuerte correlación entre la frecuencia de los procesos que se registran en ambos, aunque con distinta intensidad relativa.

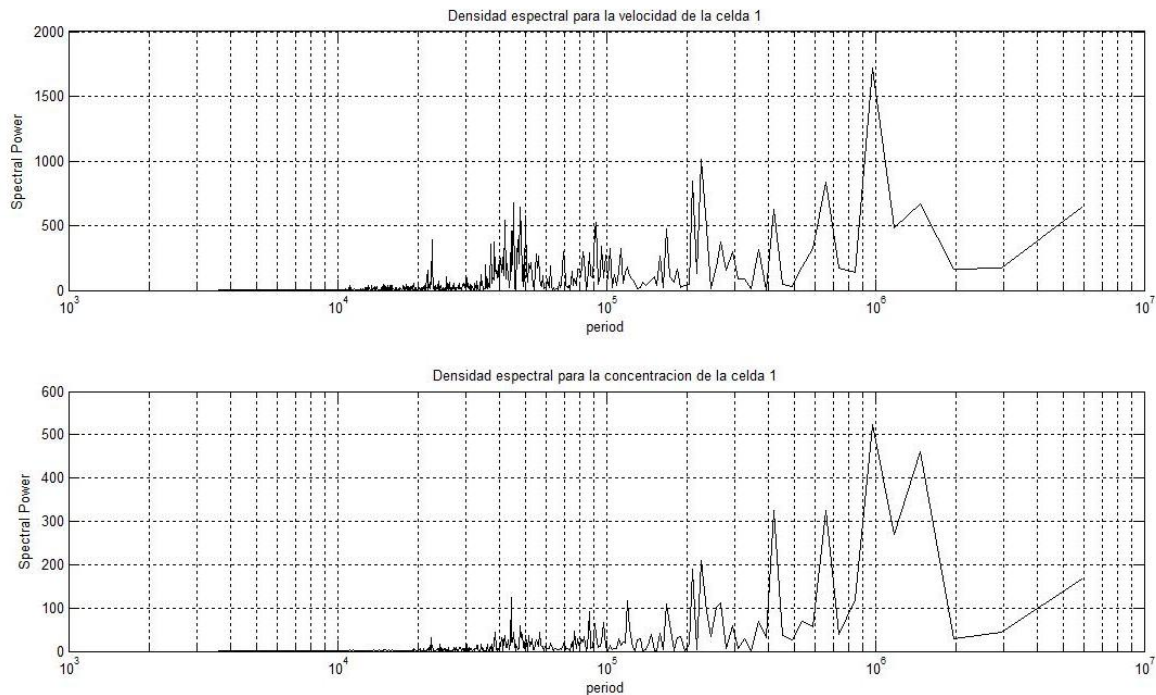


Figura 7.-Espectros de velocidad total y concentración para los datos de la celda 1.

En la Figura 8 se presenta un gráfico con la evolución temporal de la concentración estimada en la celda 1 superpuesta con la evolución temporal de una variable auxiliar calculada como la suma de los cuadrados de las velocidades orbital y de corriente. Puede observarse que existe una clara vinculación entre las magnitudes, lo que implica que la variación de la concentración en la zona cercana al fondo está fuertemente relacionada con el corte que experimenta el lecho de sedimento.

A medida que nos alejamos del lecho del río esta relación se vuelve más difusa, permaneciendo la vinculación para algunos eventos de velocidades altas, lo cual indica que estos eventos de alta energía provocan fuerte resuspensión de sedimentos los cuales alcanzan toda la columna de agua (Figuras 9 y 10).

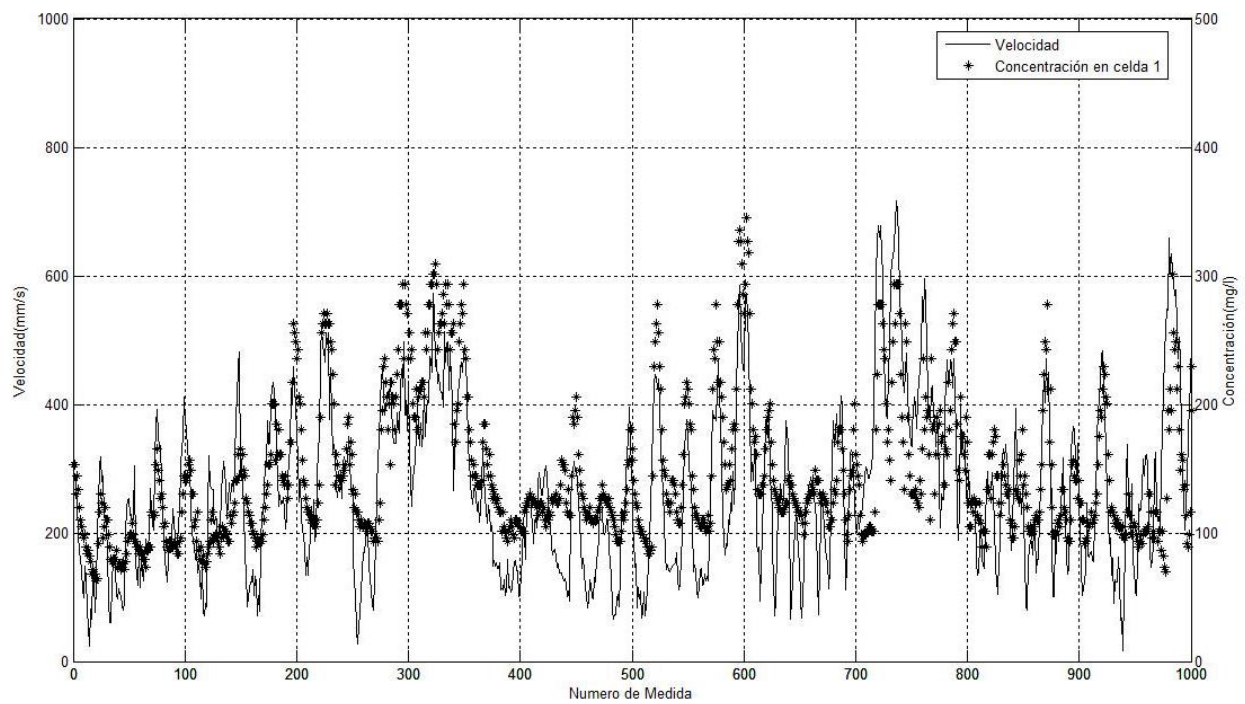


Figura 8.-Series temporales de Velocidad y Concentración en la Celda 1.

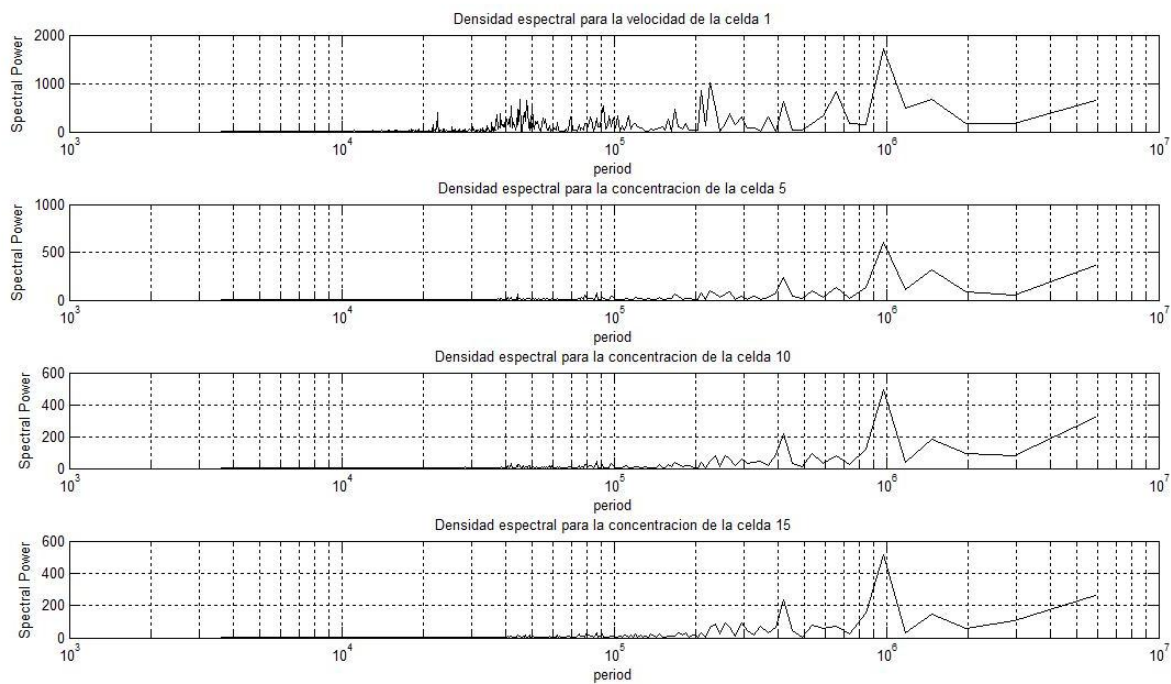


Figura 9.- Espectros de velocidad total en la cercanía del lecho y concentración en las celdas 5, 10 y 15.

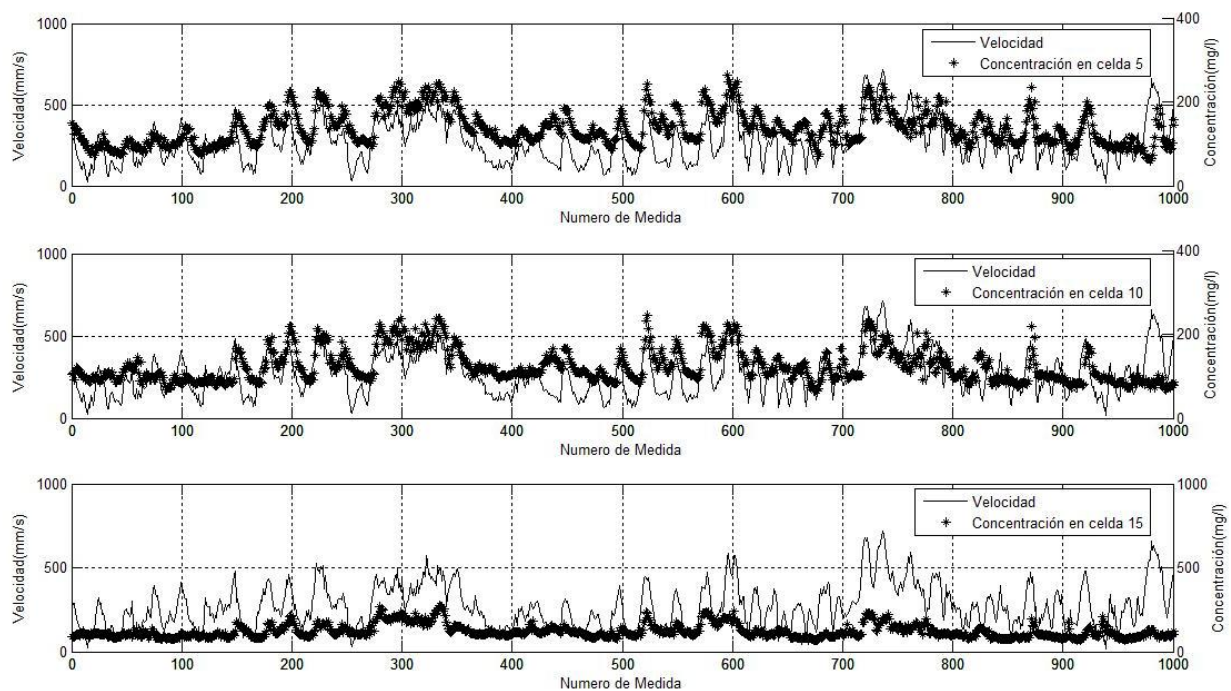


Figura 10.- Series temporales de Velocidad y Concentración en distintos puntos de la columna de agua.

CONCLUSIONES

Se ha puesto en práctica con éxito una nueva metodología para la estimación de sedimentos en suspensión en el Río de la Plata frente a la costa de Montevideo. La metodología ofrece una muy buena discretización temporal y espacial permitiendo capturar la dinámica de los principales procesos presentes. Esto ha permitido un primer análisis del comportamiento de los sedimentos en suspensión en la zona pudiendo observar las diferencias que existen a diferentes profundidades y la relación entre la concentración de sedimentos y los eventos de corriente y oleaje. Se observó que la resuspensión de sedimentos del fondo esta controlada por el efecto combinado de corrientes y oleaje. Esto muestra la necesidad de incorporar ambos procesos en los esfuerzos de modelación numérica que el grupo está realizando en la zona (ver por ejemplo Fossati y Piedra-Ceuva 2006, Piedra-Ceuva et al 2006, Fossati et al. 2008).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer las invaluables contribuciones voluntarias que permitieron realizar este trabajo: al Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) por haber prestado gran parte del equipamiento de campo utilizado y haber brindado datos muy valiosos, y al Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) por haber prestado todo el equipamiento de laboratorio utilizado en los ensayos. Los ADCPs utilizados en este estudio son propiedad de la Intendencia Municipal de Montevideo y fueron utilizados por el IMFIA en el marco de trabajos de asesoramiento realizados para la Municipalidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Clifton, H.E., Dingler, J.R. (1984). "Wave-Formed structures and paleoenvironmental reconstruction". *Marine Geology*, 60, 165-198.
- Deines, K.L. (1999). "Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers". *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement*, San Diego, CA, March 11-13, 249-253.
- Downing, J.P. (1996). "Suspended sediment and turbidity measurements in streams: What they do and do not mean". Presented: *Automatic Water Quality Monitoring Workshop*, Richmond, B.C., February 12-13.
- Fossati, M. y Piedra-Cueva, I. (2006). "Modelación tridimensional de la circulación en el Río de la Plata." XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Venezuela.
- Fossati, M., Fernández, M. y Piedra-Cueva, I. (2008) "Modelación hidrodinámica tridimensional del Río de la Plata utilizando modelos encajados." XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 2 al 6 de setiembre 2008.
- Gartner, J.W. (2004) "Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California". *Marine Geology*, 211, 169-187.
- Ha, H.K., Hsu, W.-Y., Maa, J.P.,-Y, Shao, Y.Y., Holland, C.W. (2009) "Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration". *Continental Shelf Research*, 29, 1310-1316.
- Hamilton, L.J., Shi, Z., Zhang, S.Y. (1998). "Acoustic backscatter measurements of estuarine Suspended cohesive sediment concentration profiles". *Journal of Coastal Research*, 14 (4), 1213-1224.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Bellón, D. y Ezzatti, P. (2006). Informe Final Proyecto de investigación PDT S/C/OP/19/04 "Modelación hidrosedimentológica del Río de la Plata".
- Schenck, H.A. (1986) "Helmholtz integral formulation of the sonar equations". *Journal of Acoustic Society of America*, 79, 1423-1433.
- Thevenot, M.M., Prickett, T.L., Kraus, N.C. (1992). "Tylers Beach, Virginia, dredged material plume monitoring project 27 September to 4 October 1991". *Dredging Research Program Technical Report DRP-92-7*, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Thorne, P.D., Vincent, C.E., Harcastle, P.J., Rehman, S., Pearson, N. (1991). "Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices". *Marine Geology*, 98, 7-16.
- Urlick, R.J. (1975). "Principles of Underwater Sound, (2nd ed.)". McGraw Hill, New York.