



ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO EN SUSPENSIÓN CON PERFILADOR ACÚSTICO DOPPLER

¹Latosinski F. G.; ¹Szupiany R. N.; ²García C. M., ¹Gallego M., ³Amsler M. L. y ⁴Pujol A.

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Ciudad Universitaria, C.C. 217, RN° 168 – Km. 472 (3000), Santa Fe, Argentina.

²Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto Nacional de Limnología (INALI)

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
E-mail: franlatos@yahoo.com.ar

RESUMEN

Los métodos tradicionales para la cuantificación del transporte de sedimento requieren que la embarcación permanezca anclada en verticales seleccionadas a lo largo de una sección transversal del río para así producir el muestreo del sedimento y las características del flujo. Estos métodos, los cuales poseen una limitada resolución espacial, requieren tiempos prolongados de medición, procesamiento en laboratorio de las muestras y elevados costos. La tecnología acústica Doppler bien conocida para la medición precisa de la descarga de agua en sistemas fluviales, puede también ser adaptada para obtener información cuantitativa de las concentraciones de sedimento en suspensión, a partir del análisis de la intensidad de señal acústica de retorno. A pesar de los importantes esfuerzos que se han realizado en esta línea de trabajo, los resultados obtenidos hasta el momento requieren de mayores comprobaciones. En este trabajo, se presenta y calibra el modelo que relaciona la intensidad de la señal acústica de retorno (backscatter) y la concentración de sedimento de fondo en suspensión para un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) Teledyne RDI de 1200 kHz. Los trabajos de campo se realizaron sobre el río Paraná y en un cauce secundario. El modelo se basa en la ecuación del Sonar simplificada la cual fue utilizada para corregir la señal de retorno de los ADCP, para los efectos de dispersión geométrica y absorción/atenuación del fluido y sedimento. La correlación resultante se ajusta muy bien a la pendiente de la recta teórica sugerida. Finalmente, la comparación entre el transporte de sedimento de fondo en suspensión obtenido por método tradicional y con ADCP desde plataformas móviles, es presentado para las distintas secciones relevadas. Las diferencias obtenidas fueron menores a 25%, lo cual avala la metodología propuesta y el uso de los ADCP para la cuantificación de esta variable.

ABSTRACT

The standard procedures used for sampling suspended sands in large streams require the vessel to be anchored at a proper number of verticals during a certain period of time. These methods are usually time-consuming, rather expensive, and have a limited spatial resolution. The acoustic Doppler technology applied to measure accurately the water discharge, may be also a tool to have quantitative information on suspended sediment concentrations through the analysis of the backscattering signal strength avoiding several drawbacks implicit in the traditional methods. Though important efforts have been conducted concerning these topics, results obtained so far are not as reliable as the engineering practices require. In this paper a model is presented and calibrated correlating the backscatter intensity of an Acoustics Doppler Currents Profilers (ADCP) (Teledyne RD 1200 kHz) and suspended sand concentrations obtained from classic depth-integrated samplings, are presented and discussed. The model is based on the simplified sonar equation to correct the backscatter signal data for the effects of geometric spreading and absorption (fluid and sediment). The resulting correlations compared fairly well with the theoretical straight line slopes. Finally, a comparison of suspended bed sediment transport across the measures sections computed from the data recorded using ADCPs from moving vessels and from the suspended bed sediment sampler, is presented.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación y el conocimiento de los procesos que gobiernan el transporte de sedimentos en grandes ríos como el Paraná son de gran interés para distintas disciplinas. El sedimento transportado en la columna de agua, ya sea proveniente del fondo del cauce (material grueso) o de su cuenca de aporte (material fino), impacta de diversas maneras en el comportamiento del río, su hábitat y en los aprovechamientos que de él se hacen. Puede pensarse, por ejemplo, en la colmatación de embalses, problemas de sedimentación en zonas portuarias y en los denominados “pasos críticos” de navegación fluvial que requieren continuos dragados de mantenimiento. Además, es bien conocido que el material grueso del cauce transportado por fondo o en suspensión es el principal agente modelador de su morfología, de aquí la importancia de conocer los procesos gobernantes y cuantificar en forma precisa el transporte de este material.

Los métodos tradicionales para la cuantificación del transporte de sedimento utilizados hasta hoy día, requieren que la embarcación permanezca anclada en verticales seleccionadas a lo largo de una sección transversal del río para así producir el muestreo del sedimento y las características del flujo (velocidades). Estos métodos, si bien han demostrado ser precisos para dicha cuantificación, requieren tiempos prolongados de medición, procesamiento en laboratorio de las muestras y elevados costos, además de obtener una baja resolución espacial del fenómeno.

Se desprende la necesidad de contar con mediciones del transporte de sedimentos en forma sistemática y precisa, a través de técnicas o métodos estandarizados y accesibles, de un modo tal que su implementación no vuelva inviable la sistematización en términos de procesamiento de la información y de costos asociados. Por ejemplo, en un gran río como el Paraná (así como en la mayor parte de los grandes ríos del mundo) se presenta una escasez de este tipo de información, destacándose aforos sólidos aislados en el tiempo y espacio, y sólo sistemáticos en pocas estaciones de aforo, realizados por organismos estatales y privados. Este fenómeno hace que los estudios para cuantificar el transporte de sedimento requieran de metodologías de estimación como los que se presentan en Alarcón et al (2003).

La tecnología acústica Doppler (en particular los perfiladores de corriente acústicos Doppler – ADCP), utilizada en los últimos años para medir caudales y velocidad del agua, ha sido reconocida también como una potencial herramienta para obtener información cuantitativa de las concentraciones de sedimento en suspensión, a través del análisis de la intensidad de la señal de retorno ó backscatter. Dos aproximaciones se pueden hallar en la literatura específica en relación al uso de tecnología Doppler para estimar concentraciones de sedimento en suspensión. Una de ellas se basa en el uso de ecuaciones de la teoría acústica que describen la propagación del sonido en agua (Holdaway et al, 1999; Thorne y Hanes, 2002; entre otros). La otra se enfoca en expresiones empíricas que relacionan cambios en la intensidad de la señal acústica de retorno recibida por el ADCP con variaciones de la concentración de partículas en suspensión medidas en campo, utilizando instrumental mecánico y acústico u óptico (Wright et al, 2010; Gray y Gartner, 2009; Szupiany et al, 2009; Wall et al, 2006; Kostaschuk et al, 2005; Gartner, 2004; Filizola and Guyot, 2004; Poerbandono and Mayerle, 2002; Creed et al, 2001). En este sentido, los ADCP poseen la ventaja de realizar mediciones con la embarcación en movimiento y con una alta resolución espacial y temporal. Aunque los autores citados han reportado resultados alentadores, el uso de dispositivos acústicos Doppler para

medir concentraciones precisas de sedimento en suspensión aún requiere mayores pruebas sobre la influencia de la calidad y el tamaño no uniforme de partículas en suspensión sobre la intensidad de retorno.

El presente trabajo describe en primera instancia el modelo seleccionado y su calibración para estimar las concentraciones de material de fondo en suspensión (C_{ss}) a través de la señal acústica de retorno de un ADCP Teledyne RDI de 1200 kHz de frecuencia. El modelo presentado en este trabajo incluye no sólo las correcciones para la absorción acústica por el agua y los efectos de dispersión del haz acústico, sino además se contempló la corrección de la señal debida a la atenuación por el sedimento, aspecto que actualmente comienza a ser tomado en cuenta en los trabajos más recientes (Wright et al, 2010; Topping et al, 2007; Gartner, 2004), en los que se demuestra, excluyendo a Gartner (2004), que la señal de retorno tiende a ser dominada por las partículas de arena, mientras que la atenuación tiende a serlo por las partículas de limo y arcilla. Para calibrar el modelo seleccionado se realizaron trabajos de campo sobre el cauce principal y secundario del río Paraná tomando, paralelamente a las mediciones con ADCP, muestras de sedimentos con un muestreador integrador en la vertical.

Finalmente, se presentan distintas aplicaciones del modelo calibrado utilizando datos obtenidos con ADCP desde plataformas móviles, para cuantificar el transporte de material de fondo en suspensión (G_{ss}) sobre el cauce principal del río Paraná y cauce secundario (río Colastiné).

SITIOS DE ESTUDIO

El Paraná es el sexto río más grande del mundo en caudal medio anual (Schumm y Winkley, 1994), con una cuenca de drenaje de 2.3×10^6 km² que incluye partes de Brasil, Bolivia, Paraguay y Argentina. Aguas abajo de la mayor confluencia con el río Paraguay (Figura 1), el caudal medio anual del Paraná es 19500 m³/s, y la pendiente de la superficie del agua se encuentra en el orden de 1×10^{-5} . El fondo del cauce se compone mayoritariamente de arenas finas y medias (Drago y Amsler, 1998) y su forma en planta ha sido clasificada como entrelazada con thalweg meandriforme (Ramonell et al, 2002). Este patrón de brazos múltiples forma una sucesión de secciones amplias y estrechas acompañadas por una serie de bifurcaciones y confluencias alrededor de grandes bancos centrales de cauce, con anchos y profundidades medias del cauce que varían entre 600 y 2500 metros, y de 5 a 16 metros, respectivamente.

Los sitios de estudio (Figura 1), están localizados en los tres tramos en los cuales se divide el río Paraná: Superior (Zona A) en la cercanías de la localidad de Lavalle, Corrientes; Medio (Zona B) entre la ciudades de Santa Fe y Paraná (sobre dicha zona se encuentra el cauce secundario denominado Colastiné) e Inferior (Zona C) en las inmediaciones de la ciudad de Rosario.

ACTIVIDADES EXPERIEMETALES EN CAMPO Y LABORATORIO

Los trabajos de campo cuyos resultados se utilizaron en la etapa de calibración del modelo, consistieron en mediciones estáticas con ADCP y, paralelamente, toma de muestras con un

muestreador integrador en la vertical. Se relevaron en total 36 verticales, en las 3 zonas hidráulicamente diferentes con el fin de abarcar el mayor rango de concentraciones posible. Las mismas se distribuyen en: Zona A, 7 muestras obtenidas el 31 de Mayo de 2011; Zona B, 2 muestras durante el 30 de Octubre de 2009, 7 muestras el 27 de Noviembre de 2009, 8 muestras el 26 de Abril de 2010 y 8 muestras el 7 de Octubre de 2010; en la zona C fueron capturadas 4 muestras el 16 de Noviembre de 2010.

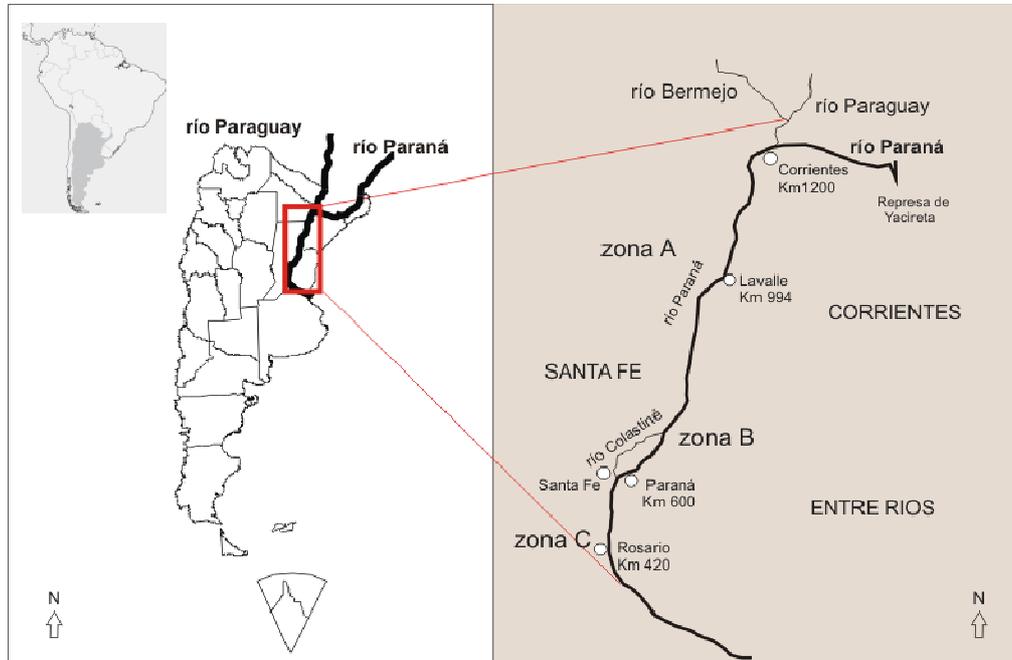


Figura 1.- Zonas de estudio: Paraná Superior (Zona A, cercana a la ciudad de Lavalle), Parana medio y río Colastiné (Zona B cercana a la ciudad de Santa Fe) y Parana Inferior (Zona C, cercana a la ciudad de Rosario).

Además, se obtuvieron muestras de material del fondo del cauce, a través de muestreadotes tipo conos de arrastre, para la determinación de su granulometría. Este tipo de muestras fueron adquiridas en la zona A, el 31 de Mayo de 2011; en la zona B, el 26 de Abril de 2010 y en la zona C, el 16 Noviembre de 2010.

En todas las actividades de campo se utilizó un perfilador acústico Doppler Teledyne RDI de 1200 kHz de frecuencia al cual se acopló un sistema de posicionamiento global en forma diferencial a tiempo real (RTK DGPS) el cual provee el posicionamiento de la embarcación con errores de menores a 2 cm en la horizontal. Las muestras de sedimentos suspendidos fueron tomadas con un perfilador integrador en la vertical desarrollado en la FICH.

El ADCP se montó con disposición vertical (haz orientados hacia el fondo del cauce) para obtener la señal o backscatter a distintas profundidades y luego realizar la integración en la vertical para el proceso de calibración.

Durante las mediciones el ADCP se configuró con Modo 1 (WM1, Teledyne RD Instruments, 2007) y se trabajó con celdas de 0.25 m de altura e intervalos de medición de aproximadamente 0.5 seg.

La captura simultánea de señal acústica y muestra de agua, con embarcación anclada por cada punto de muestra, se realizó durante 7 minutos en cada punto para garantizar representatividad

de los datos (Szupiany, 2007) y con el fin de establecer una relación entre la señal corregida del instrumento acústico y la concentración de sedimentos en suspensión.

Para el análisis de las muestras de sedimento de fondo se aplicó el método de tamizado utilizando los tamices de apertura de maya de 62.5 μm , 125 μm , 250 μm , 500 μm , 1mm y 2mm. Las muestras de sedimento en suspensión fueron procesadas, en primer lugar, separando el material correspondiente a la carga de lavado (limos y arcillas) y del fondo (arenas) por tamizado húmedo para luego, previa evaporación y secado, realizar el cómputo de las concentraciones en el volumen de muestra tomado.

Por último, se realizaron mediciones con ADCP (plataforma móvil) en 5 secciones transversales (2 sobre el río Colastiné y 3 en el cauce principal del río Paraná en las cercanías de la localidad de Lavalle) y paralelamente se realizaron aforos síncronos por método mecánico a fin de comparar ambos resultados.

PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER. ASPECTOS GENERALES

En este apartado se introducirá una breve descripción del funcionamiento general de los ADCPs que sirva para lograr el entendimiento de los aspectos específicos del trabajo realizado. No intenta ser una descripción profunda e integral, pues para ello existe abundante bibliografía disponible (RD Instruments, 1996; Teledyne RD Instruments, 2007; Sontek, 2000; Simpson, 2001).

Los ADCP miden la velocidad del agua utilizando el principio físico llamado Cambio Doppler, que se da cuando sus transductores (o emisores) generan un pulso de sonido corto (ping) a una frecuencia conocida, que se propaga a través del agua y se refleja en todas las direcciones por las partículas que se encuentran en suspensión (sedimento, materia orgánica, etc.). Una porción de la energía reflejada vuelve hacia los transductores y así el ADCP mide el cambio de frecuencia de la señal de retorno y su intensidad. Este cambio de frecuencia medido por cada transductor se traduce en la velocidad del agua en la dirección radial del mismo para luego ser transformada en velocidad del flujo.

Estos instrumentos operan con 3 o 4 haz, según modelo y marca, compuestos por celdas (bins), cuyo tamaño es variable según lo defina el usuario. A través de una brújula interna el equipo calcula las velocidades en tres direcciones geográficas (Este – Norte – Vertical). Los ADCP comerciales utilizan haz divergentes monoestáticos, es decir, transmiten los pulsos y reciben el retorno con el mismo transductor, por lo que cada haz mide en zonas diferentes. Las distancias entre los volúmenes (o zonas) de medición de cada haz dependen del ángulo de separación entre éstos, aumentando a medida que se incrementa la distancia al aparato, esto es, con el aumento de la profundidad en una disposición del instrumento vertical hacia abajo. Por tal motivo, la velocidad puede que no sea igual en cada haz, pero la suposición de trabajo con los ADCP es que se considera al flujo como si fuese homogéneo en toda el área abarcada. Cada haz mide la velocidad del agua en su eje dentro de las celdas mencionadas. Luego, la combinación de datos de las correspondientes celdas de cada haz, permite al instrumento calcular la velocidad 3D del agua.

El perfil de la columna de agua que miden los ADCPs está dividido en diferentes regiones

(Sontek, 2000; RD Instruments, 1996): a) inmediatamente debajo del transductor hay una región donde éste no registra el cambio de frecuencia (blanking distance) debido al rápido retorno de las ondas de sonido, b) luego aparece la zona de medición la cual está dividida en las celdas (ya mencionadas, especificadas por el usuario), y c) una zona cercana al fondo (del 10 % de la profundidad) que no puede ser medida a causa de la interferencia que produce un lóbulo lateral o “side lobe” formado alrededor del haz donde se produce un rebote acústico antes del que ocurre en el lóbulo principal.

Además de la información de las tres componentes del vector velocidad de flujo en cada celda necesaria para la caracterización del flujo y la cuantificación de caudales de flujo, el ADCP registra información adicional como por ejemplo la amplitud de la señal acústica de retorno. A continuación se presenta un modelo que permite utilizar esta información adicional para estimar concentraciones de sedimento en suspensión

MODELO PARA ESTIMAR CONCENTRACIONES DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN UTILIZANDO INFORMACIÓN DE ADCP

El desarrollo de este modelo tiene como base la ecuación que describe la raíz cuadrada media de la presión de la señal de retorno producida por las partículas en suspensión, esta es (Thorne and Hanes, 2002):

$$P_{rms} = P_0 r_0 f_s \left[\frac{3M\pi}{16a_s \rho_s} \right]^{1/2} \frac{0.96}{ka_t \psi r} \exp\{-2\alpha r\}, \quad (1)$$

Donde: P_0 es presión de referencia en el rango r_0 , r es la distancia desde el transductor, a_s es el radio de la partícula, a_t es el radio del transductor, π es la longitud del pulso, τ es la duración del pulso, c es la velocidad del sonido en agua, ρ_s es la densidad de la partícula, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, $\lambda = c/f$ es la longitud de onda acústica, f es la frecuencia de trabajo, M es la concentración másica, f_s es la forma de la función que describe las propiedades de dispersión (scattering) de la partícula, ψ es la corrección por campo cercano del transductor y α es el coeficiente de atenuación para pérdidas de transmisión debidas al fluido y al sedimento en suspensión.

A partir de la ecuación (1), expresada en términos de parámetros internos característicos del instrumento, mediante algunas sustituciones y pasos algebraicos, se llega a la siguiente expresión (Urlick, 1983), que relaciona la señal de retorno (backscatter) con el logaritmo de la concentración másica de sedimentos:

$$\text{Log}_{10}(M) = 0.1(RL + 2TL) + K_T \quad (2)$$

Donde: M es la concentración másica de sedimentos (se reemplazará más adelante por CSS para el material grueso y Cw para el fino), RL es la señal cruda de retorno del ADCP, $2TL$ es la corrección por pérdidas de transmisión, $RL+2TL$ es el backscatter (señal corregida), K_T es la constante que engloba parámetros característicos del instrumento.

La ecuación (2) es lineal e indica que con valores de la señal del equipo corregida y los correspondientes de concentración de sedimentos se puede obtener la pendiente y ordenada al origen de su regresión (iguales a 0.1 y a la constante K_T , respectivamente) y con ello lograr la calibración que permitirá estimar posteriormente la concentración de sedimentos en una vertical.

Al término $RL + 2TL$, se lo considera señal corregida, pues ajusta el eco (del pulso emitido) que recibe el equipo en función de las pérdidas de transmisión de la señal en su paso de ida y vuelta a lo largo del haz. Cabe aclarar que los valores de RL son los valores crudos registrados en el equipo, en counts; éstos deben convertirse a decibeles (dB) y ello se logra multiplicando los valores en counts por factores específicos para cada haz (y para cada modelo y marca de instrumento), disponibles por pedido al fabricante. Para el presente estudio se utilizaron los valores de Tabla 1 brindados por Teledyne RD Instruments (comunicación personal).

Respecto al término $2TL$, éste contempla la pérdida en la señal de retorno, pues la señal sonora de un ADCP en agua dulce es sometida a la absorción y dispersión, llevada a cabo tanto por las moléculas de agua, como por las partículas presentes en el cuerpo de agua. Estos procesos se traducen en una pérdida de señal acústica, esto es, el eco del sonido emitido es recibido con menor intensidad en el ADCP. La ecuación (3) es la expresión que permite obtener la señal corregida:

$$2TL = 20 \text{Log}_{10}(\psi r) + 2\alpha_f r + 2\alpha_s r, \quad (3)$$

Tabla 1.- Factores de conversión para obtener dB a partir de counts, de la señal cruda del ADCP 1200 kHz - RDI.

Haz	Factor de Conversión
1	0.3909
2	0.4094
3	0.4061
4	0.4120

El primer término corresponde a las pérdidas debidas a la dispersión del haz (haz spreading) y el segundo y tercero, a las pérdidas debidas a la absorción del sonido por el fluido y a la atenuación por el sedimento en suspensión, respectivamente.

El primer término de la derecha el parámetro ψ es la corrección por campo cercano del transductor, cuya expresión es (Downing et al, 1995):

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad (4)$$

donde:

$$z = \frac{R\lambda}{\pi a_t^2} \quad (5)$$

$$R = r + \frac{H_B}{4} \quad (6)$$

r (previamente presentada), es la distancia oblicua desde la cara del transductor al centro del bin y H_B es el tamaño del bin.

El valor del coeficiente ψ se ha fijado en 1, pues el reemplazo de todas las variables involucradas en su expresión lo corroboran para mediciones hechas en los sitios de estudio del presente trabajo.

El segundo término de la derecha en la ecuación (3) corrige la pérdida de señal debida a los efectos de absorción acústica por el agua, directamente relacionada a la frecuencia de trabajo del ADCP y de la salinidad, temperatura y presión en la columna de agua. Interviene allí el coeficiente de absorción acústica por el agua, α_f , cuya expresión (en nepers/metro) es la siguiente (Schulkin and Marsh, 1962):

$$\alpha_f = \left(\frac{S_a A f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{3.38 \times 10^{-6} f^2}{f_T} \right) (1 - 6.54 \times 10^{-4} P), \quad (7)$$

Donde: S_a es la salinidad, A es la constante del proceso de relajamiento iónico en agua de mar, P es la presión del agua, $f_T = 21.9 \times 10^{[6 - (1520/T + 273)]}$, frecuencia de relajación dependiente de la temperatura (T).

El término de presión es insignificante hasta los 20 m de profundidad y el término de salinidad se anula en la ecuación para agua dulce (Wall et al, 2006), quedando, por lo tanto:

$$\alpha_f = 8.687 \times \frac{3.38 \times 10^{-6} f^2}{f_T}, \quad (8)$$

en la que 8.687 es el factor de conversión de nepers/metro a dB/metro, que son las unidades SI para α_f .

El tercer término de la ecuación (3) contempla los efectos de pérdida por atenuación del sedimento en suspensión, que para la frecuencia de trabajo utilizada y los rangos de tamaño de partícula presentes, se puede asumir conformada por una componente de pérdida viscosa y otra de dispersión. Ambas varían en forma opuesta conforme se deslice ascendente o descendente sobre el rango de tamaño de partícula. La componente de pérdida viscosa aumenta a medida que el tamaño del sedimento decrece y lo opuesto ocurre para la componente de dispersión. Este mecanismo suele no considerarse en la mayoría de los trabajos indicados en la bibliografía, a excepción de los más recientes y la incertidumbre sobre la magnitud de la atenuación sugiere confeccionar la curva de atenuación teórica respectiva para determinar si la misma será o no importante en la estimación de la concentración de sedimentos suspendidos a partir de la intensidad de señal.

En Figura 2 se presenta la variación del coeficiente α_s a partir de las ecuaciones presentada por Gartner (2004):

$$\alpha_s = (10 \log e^2) \left[\frac{k M}{2 \rho_s} (S-1)^2 \left(\frac{s}{s^2 + (s+\tau)^2} \right) + \frac{0.4 M}{D \rho_s} \left(\frac{x^4}{1+1.3x^2+0.24x^4} \right) \right] \quad (9)$$

Donde: $S = \rho_s / \rho$, densidad relativa del sedimento (respecto del agua), $s = \frac{9}{2\gamma D} \left(1 + \frac{2}{\gamma D} \right)$, $\gamma = \sqrt{\pi F / \nu}$, ν es la viscosidad cinemática, $\tau = \frac{1}{2} + \frac{9}{2\gamma D}$, M es la concentración de sedimento en suspensión (CSS ó Cw , según corresponda), D es el diámetro de la partícula, $x = ka_s = k \frac{D}{2}$; (D : diámetro de la partícula y $10 \log e^2$ es el factor de conversión de nepers a dB, dado que el coeficiente en la ecuación (9), en unidades SI, está expresado en dB/m.

Una vez presentados los factores considerados como responsables de las pérdidas de señal acústica y la forma de contabilizarlos, se procede en la obtención del backscatter o señal corregida. Dado que los dos primeros términos de la derecha de la ecuación (3) involucran cualidades propias del fluido, se denominará, a su suma, SCA (señal corregida para los efectos del agua). El tercer término de la ecuación (3), que contabiliza la pérdida de señal por presencia de material (sedimentos) en suspensión, se lo denominará SCS . De tal manera, las expresiones quedan:

$$SCA = RL + 20 \log_{10} r + 2\alpha_f r \quad (10)$$

y

$$SCS = SCA + 2\alpha_s r \quad (11)$$

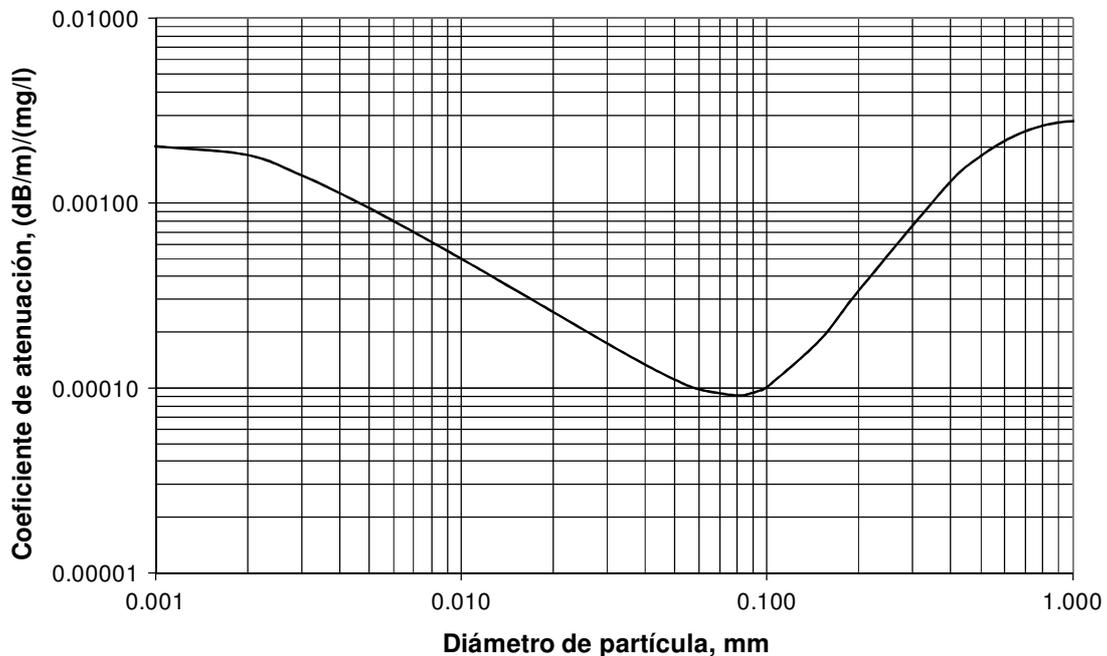


Figura 2.- Curva de atenuación por sedimento para la frecuencia de 1200 kHz del ADCP, independiente de la concentración de sedimentos en suspensión, ecuación (9).

Para calibrar el modelo de estimación se grafica, para cada punto de muestreo, el logaritmo de los valores obtenidos de las muestras físicas versus los valores de la señal corregida e integrada en la vertical, SCS , se obtiene una dispersión de puntos tal que su regresión lineal advierte de la bondad de la calibración buscada. Esto es, obtener y evaluar la representación del $\text{Log}_{10}(CSS)$ vs. SCS . Específicamente, para determinar el valor de SCS , luego de transformar unidades se obtuvo el promedio de intensidad de retorno de los cuatro haz en cada celda de profundidad y sobre este valor promedio en cada celda se aplicó la corrección por pérdidas. Posteriormente, se realizó la integración final de los mismos (integración en la vertical) para llegar a un único valor medio en la vertical de señal corregida para cada punto, esto es, SCS .

AFOROS SÓLIDOS CON ADCP Y MÉTODO TRADICIONAL.

Posteriormente, se procedió al cálculo del transporte de sedimentos de fondo en suspensión mediante dos métodos: a) utilizando el modelo presentado y calibrado en el punto anterior para cada celda de medición del ADCP y b) por método tradicional de aforo sólido. La comparación de ambos resultados permitirá no sólo verificar la bondad de la calibración obtenida, sino, estimar con dos modos distintos de medición, una variable que hasta el momento posee márgenes de error de alrededor del 100% cuando se utilizan fórmulas empíricas calibradas.

El método tradicional de aforo sólido, como es sabido, consiste en dividir una sección del río en un número determinado de verticales. En cada una de ellas se mide la velocidad promedio en la vertical (con ADCP en este caso) y se toma una muestra de sedimentos en suspensión integrada en la vertical. Luego, se asignan subáreas de igual velocidad y concentración, asociadas a las verticales seleccionadas y se calcula el transporte de sedimentos en cada zona, afectando la subárea respectiva por su velocidad y su concentración (Figura 3a). La sumatoria de cada subárea arroja como resultado el transporte de sedimento de fondo en suspensión total en el área medida, conocido como G_{ss} (o en caso de haber utilizado C_w , la carga de lavado, G_w). A fin de tener una comparación directa con los resultados obtenidos con ADCP, las muestras de sedimento se tomaron hasta la profundidad en que el ADCP puede medir, i.e. sin considerar aproximadamente el 10% de la profundidad cerca del fondo (ver Figura 2). Por tal motivo, al valor de este transporte lo denominaremos de aquí en adelante como G_{ss_m} y G_{w_m} .

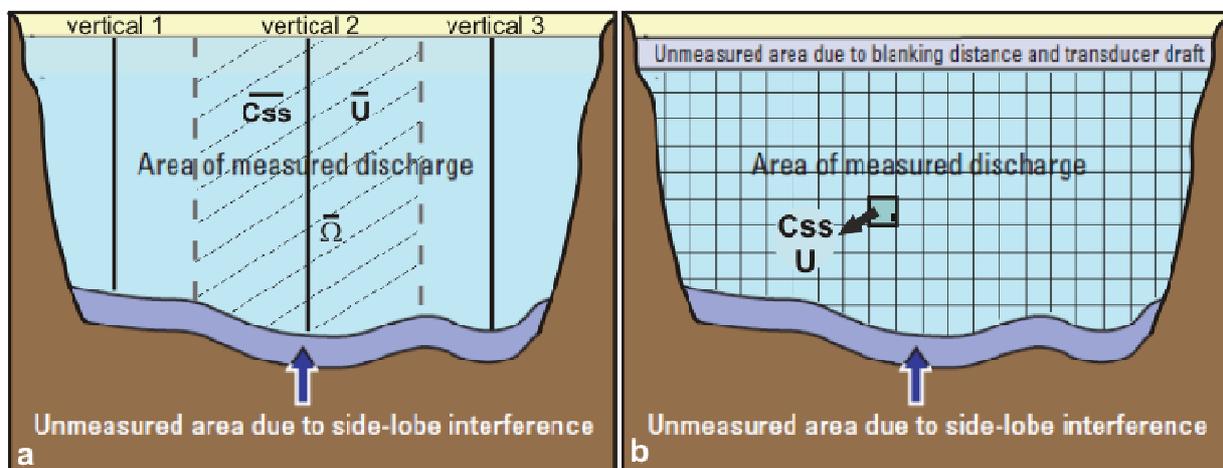


Figura 3.- Representación esquemática de aforo sólido; a) método tradicional y b) método dinámico con ADCP

La metodología para la estimación del transporte a partir de las mediciones del ADCP (método dinámico) consiste en recorrer cuatro veces, de margen a margen, una transecta del cauce (Szupiany et al. 2007). Luego, un promedio de los cuatro recorridos se utiliza para aplicar la calibración en cada celda de medición del instrumento y obtener allí la concentración de sedimento de fondo en suspensión. La afectación de este valor de CSS por la velocidad del flujo medida en la celda y por el área de la celda (área transversal) resuelve el transporte de sedimento en la misma (Ver Figura 3b). La sumatoria del caudal sólido así obtenido en cada celda de medición del ADCP dará el transporte total en la zona medida por el instrumento ($G_{ss_{mi}}$). Luego, sumando a $G_{ss_{mi}}$ el correspondiente a las zonas no medidas por el ADCP en superficie (obtenido por extrapolación), se obtiene el valor de G_{ss_m} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comenzando por la calibración del modelo, el valor obtenido para el coeficiente de absorción acústica por el agua, α_f (ecuación 8), resultó ser de 0.2974 dB/m, según el procedimiento descrito. Para el caso de α_s , el coeficiente de absorción acústica por el sedimento, el resultado se obtiene de la curva teórica ilustrada en Figura 2 (ecuación 9). Se observa una atenuación mínima para diámetros de sedimento en suspensión de 0.1 mm, incrementándose para diámetros mayores o menores que este valor. Por tal motivo, y en función de las características del sedimento en suspensión para el sistema del río Paraná (valores obtenidos por Scanning Electron Microscope (SEM)), i.e. diámetro medio de sedimentos de fondo en suspensión de 120 μm y material fino (limos y arcillas) de 8 μm , se determinaron coeficientes de atenuación de sedimento debido al material grueso y fino por separado.

Los coeficientes de atenuación por sedimento obtenido de la Figura 2 posee un valor particular para cada campaña realizada, según los valores de concentraciones promedio de material fino y de material grueso hallados en cada una de ellas. A los efectos de presentar un valor que refleje la magnitud de este coeficiente, un promedio para todas las verticales medidas es el de $\alpha_s = 0.065$ dB/m. Vale aclarar que este valor está conformado por la suma de una componente originada por material fino, de 0.061 dB/m y la componente aportada por el material grueso, de 0.004 dB/m. Este valor de α_s , de 0.065 dB/m es muy pequeño, comparado con α_f , lo que estaría indicando que la atenuación por el sedimento en suspensión no adquiere relevancia significativa mientras sus concentraciones en el medio se mantengan en valores bajos y el tamaño de sedimento, sobre el límite inferior de la curva en Figura 2. A pesar de ello, no debe dejarse de evaluar el orden de magnitud de la atenuación, pues su omisión podría llevar a errores importantes en la estimación de la pérdida de transmisión de la energía acústica.

Los resultados de la relación entre la concentración de material grueso y la señal corregida se observan en Figura 4. En este caso, los datos de CSS ajustan una curva esperada graficando el \log_{10} [CSS] vs. señal del equipo corregida, SCS, con un valor de $R^2 = 0.91$. La pendiente de la recta de ajuste se presenta junto a los datos, con un valor de 0.13, que se aproxima al valor teórico de 0.1 (Ecuación 2). A su vez, se indica la tendencia de los datos aumentados y disminuidos en un 20 %, observándose que la misma contiene a todos los puntos originales.

Se incluye también en Figura 4 la ecuación resultante del proceso de calibración para la estimación de CSS.

Otro resultado interesante es la pobre relación que existe entre las concentraciones del material fino en suspensión (C_w) y la señal corregida del ADCP (SCS), debido a la sensibilidad exclusiva de la frecuencia de trabajo de 1200 kHz hacia el tamaño de partículas de las arenas. En Figura 5 se observa la no correspondencia entre ambas variables.

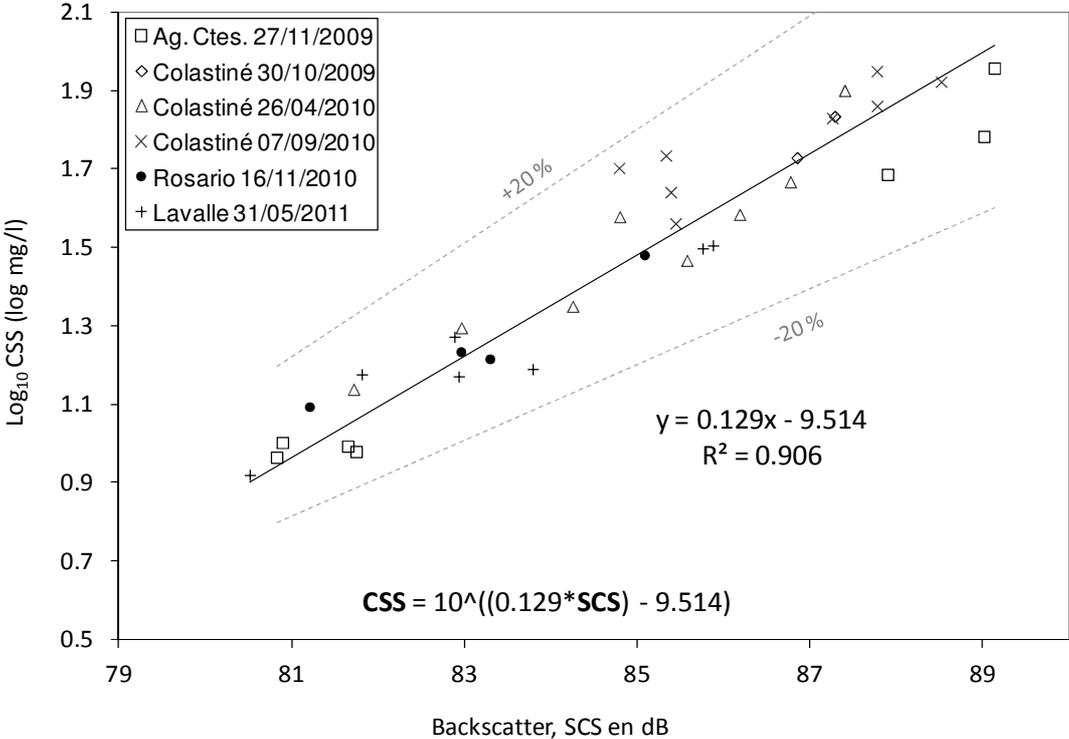


Figura 4.- Relación entre la concentración de sedimento de fondo en suspensión, CSS, y la intensidad de señal de retorno corregida o Backscatter, SCS.

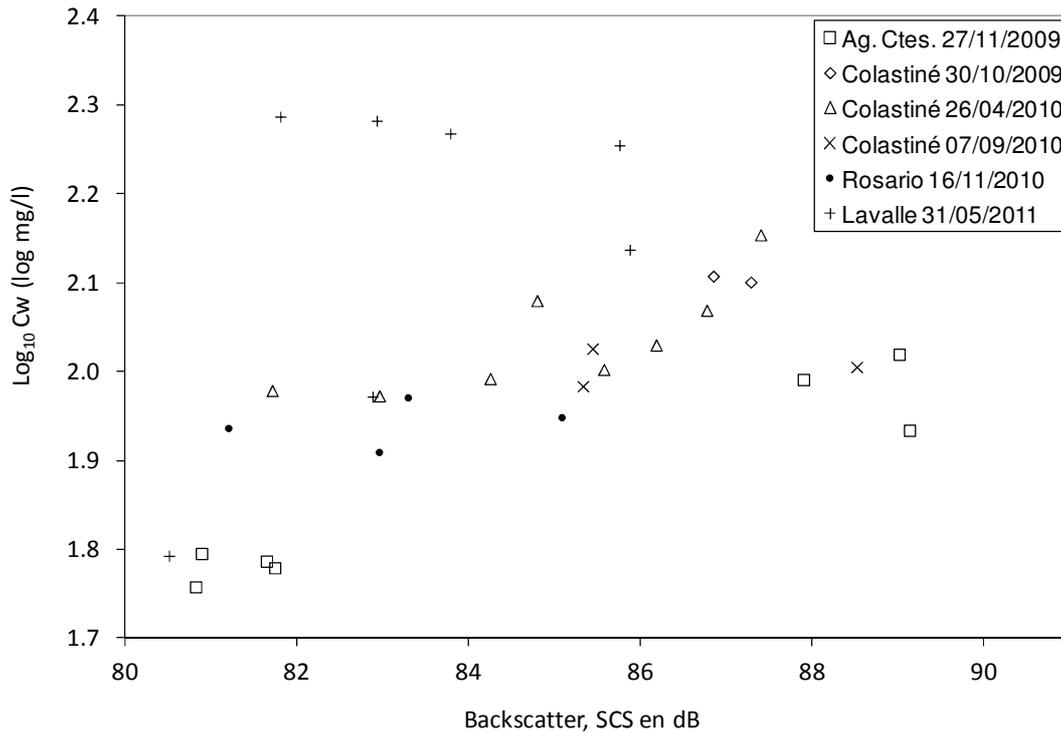


Figura 5.- Relación entre la concentración de sedimento fino en suspensión, C_w , y la intensidad de señal de retorno corregida o Backscatter, SCS.

Los resultados de la aplicación del método propuesto de aforo del sedimento de fondo en suspensión se presentan en Tabla 2 para dos estados hidrométricos del río Colastiné (brazo secundario del sistema del Paraná en la zona B) y para el cauce principal en la zona A en tres diferentes estados hidrométricos.

Tabla 2.- Valores de $G_{ss,m}$ según método de aforo empleado, fecha y Zona de medición, en kg/s.

Fecha	Zona	Método Tradicional	Método con ADCP	Diferencia (%)
26/04/10	B	80	67.9	- 15.1
07/09/10	B	56	42.9	- 23.4
31/05/11	A	320	378.8	+ 18.4
20/07/11	A	507	466	-8.1
24/08/11	A	1070	1082	+1.2

Además del valor total del transporte de sedimento de fondo en suspensión, el ADCP brinda resultados con un grado de detalle en escala espacial imposible de obtener por métodos tradicionales de aforo. En Figura 6, se presentan la distribución de velocidades y concentración de sedimentos en suspensión para las secciones relevadas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La tecnología Doppler se presenta como una herramienta muy valiosa para el monitoreo del comportamiento de concentraciones de sedimento de fondo en suspensión y transporte de este material. Respecto a esta última variable, se obtuvieron diferencias menores al 25 % respecto de los métodos de aforos sólidos tradicionales, i.e. a través de toma de muestras y mediciones de velocidad en diferentes verticales de la sección transversal. Es conocido, además, que las fórmulas clásicas de transporte, lo hacen con errores habituales del orden del 100%. Es de destacar los menores tiempos de medición y procesamiento de la información con la

estimación realizada utilizando información adicional registrada por ADCP y por supuesto, los menores costos involucrados.

No menos importante será para estudios en hidráulica fluvial, permitiendo así identificar zonas de actual deposición y erosión, secciones de correspondencia y no correspondencia entre la estructura del flujo y el sedimento, entre otras características.

La observación de los resultados obtenidos demuestra que la calibración lograda para la estimación de las concentraciones de arenas en suspensión con ADCP es muy buena, a juzgar por el valor de la pendiente de la recta de regresión (Figura 4), pues está en el orden del valor teórico hallado en la bibliografía (Wright et al, 2010; Wall et al, 2006; Gartner, 2004), con un coeficiente R^2 de 0.91.

A su vez, se ha corroborado la escasa o nula relación entre el sedimento fino en suspensión respecto de la señal sonora del ADCP. Este hecho confirma la exclusividad de la sensibilidad del instrumento hacia las partículas del rango de las arenas para la frecuencia de trabajo seleccionada.

Siempre y cuando las concentraciones del material fino se mantengan en el orden de los valores implicados en el actual trabajo, esto es, los del sistema del río Paraná, se deberá tener en cuenta que las pérdidas en la señal acústica por efectos de absorción del agua serán mayores que las debidas a la atenuación por sedimento. En el presente trabajo se ha observado que, en promedio, los coeficientes para estimar dichas pérdidas difieren en un orden de magnitud.

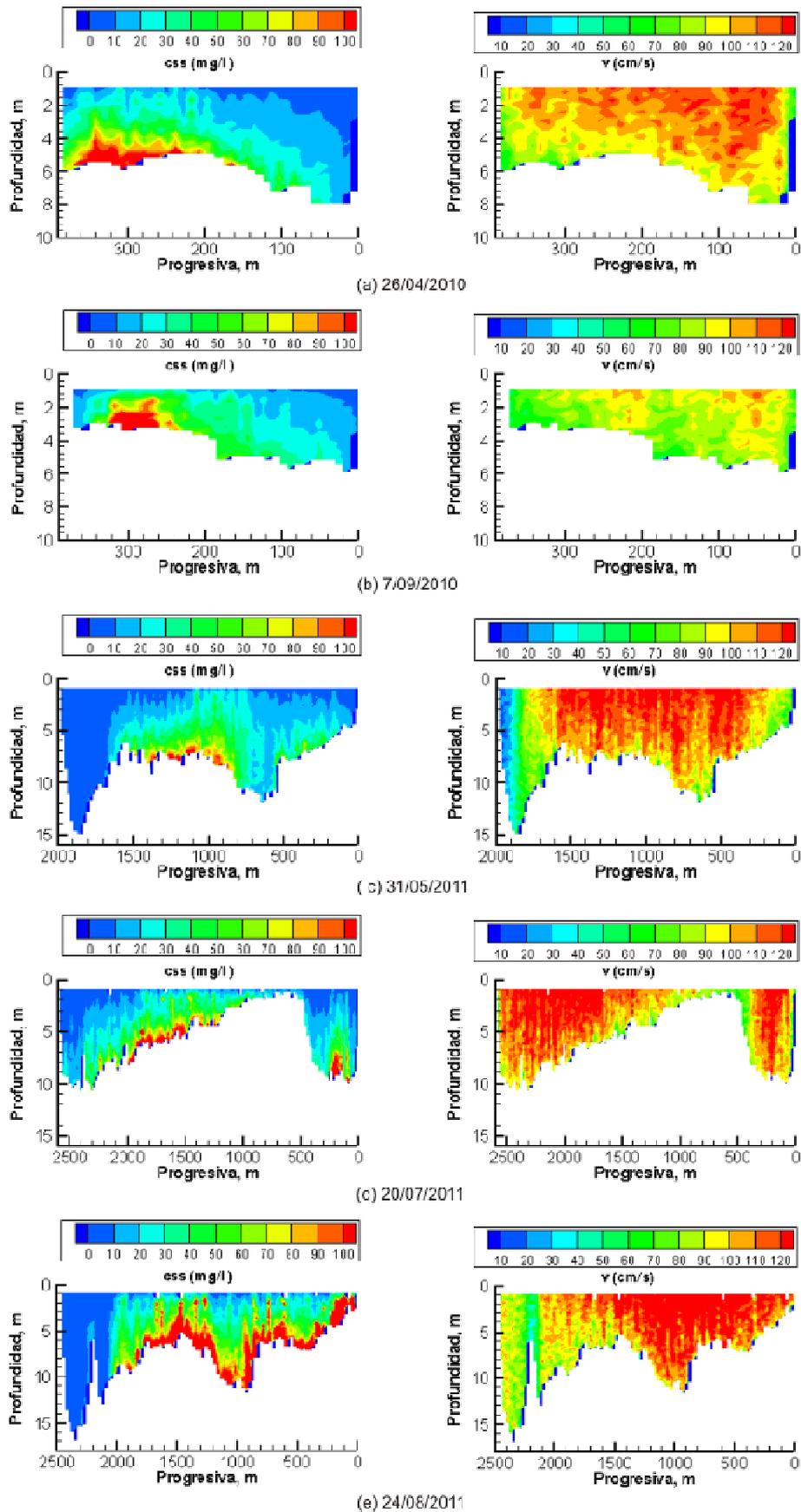


Figura 6.- Distribución transversal de la velocidad del flujo y la concentración del sedimento de fondo en suspensión. (a) y (b): zona B. (c), (d) y (e): zona A. Las secciones se presentan con vista hacia aguas abajo.

Agradecimiento. Los autores agradecen a Roberto Mir y Santiago Cañete la colaboración en los trabajos de campo. Este estudio se enmarca dentro de los proyectos PICT 2006 – 00758, “Medición y cálculo del transporte de sedimentos fluviales” subsidiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y el proyecto CAID 2009 “Análisis de procesos de construcción de la planicie aluvial en un gran río de llanura: el río Paraná en su tramo medio” subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

LISTA DE SÍMBOLOS

A :	constante del proceso de relajamiento iónico en agua de mar
a_s :	radio de la partícula.
a_t :	radio del transductor
c :	velocidad del sonido en agua
CSS :	concentración de gruesos en suspensión
CW :	concentración de finos en suspensión
D :	diámetro de la partícula
f :	frecuencia de trabajo
f_s :	forma de la función que describe las propiedades de dispersión (scattering) de la partícula
f_T :	frecuencia de relajación
G_{SS} :	transporte de sedimento de fondo en suspensión
H_B :	tamaño del bin
k :	número de onda
K_T :	constante que engloba parámetros característicos del instrumento
M :	concentración másica
P :	presión columna de agua
P_{rms} :	presión de retrodispersión
P_0 :	presión de referencia en r_0
r :	distancia oblicua desde el transductor
RL :	señal cruda de retorno
r_0 :	rango
S :	densidad relativa del sedimento
S_a :	salinidad
SCA :	señal corregida por efectos del agua
SCS :	señal corregida por efectos del sedimento
T :	temperatura
$2TL$:	corrección por pérdidas de transmisión
α :	coeficiente de absorción/atenuación
α_f :	coeficiente de absorción
α_s :	coeficiente de atenuación
λ :	longitud de onda acústica
ρ :	densidad del agua
ρ_s :	densidad de la partícula
τ :	duración del pulso
π :	longitud del pulso
ν :	viscosidad cinemática.
ψ :	coeficiente de corrección por campo cercano

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alarcón J. J.; Szupiany R. N.; Montagnini M. D.; Gaudin H.; Prendes H. H. y Amsler M. L. (2003). “Evaluación del Transporte de Sedimentos en el Tramo Medio del río Paraná”; *Hidráulica de Ríos*, Buenos Aires, Argentina.

Creed E. L.; Pence A. M. y Rankin K.L. (2001). “Inter-Comparison of Turbidity and Sediment Concentration Measurement from an ADP, an ABS-3, and a LISST”; *Oceans 2001 MTS/IEEE Conference Proceedings*, Honolulu, HI, Vol 3, 1750-1754.

Downing, Andrew; Thorne, P.D. y Vincent, C.E. (1995). “Backscattering from a suspension in the near-field of a piston transducer”. *The Journal of the Acoustical Society of America*; v. 97, no. 3, p. 1614.

Drago, E., y Amsler, M. L. (1998). “Bed sediment characteristics in the Paraná and Paraguay rivers”; *Water Int.*, v. 23, 174– 183.

Filizola N. y Guyot J. L. (2004). “The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon”, *Hydrological Sciences – Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46 (1).

Gartner, J. W. (2004). “Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California”, *Marine Geology*; v. 211, p. 169-187.

Gray, J. R. y Gartner, J. W. (2009). “Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring”, *Water Resour. Res.*, v 45, W00D29, doi:10.1029/2008WR007063.

Holdaway G. P.; Thorne P. D.; Flatt D., Jones S. E. y Prandle D. (1999). “Comparison between ADCP and transmissometer measurement of suspended sediment concentration”, *Continental Shelf Research*; 19, 421-441.

Kostaschuk R.; Best J.; Villard P.; Peakall J. y Franklin M. (2005). “Measurement of flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler”, *Geomorphology*; Vol. 68, 25-37.

Poerbandono y Mayerle R. (2002). “Preliminary Result on the Estimation of Suspended Sediment Concentration from Acoustical Profilers ADCP”; *Anwender Workshop*, Warnemunde, January.

Ramonell, C. G., Amsler, M. L., y Toniolo, H. (2002). “Shifting modes of the Paraná river thalweg in its middle/lower reach”, *Zeitschr. Geomorphol.*, 129, 129– 142.

RD Instruments (1996). “Acoustic Doppler Current Profilers: Principles of Operation, A Practical Primer”, *Second edition for Broadband ADCPs*, by Lee R. Gordon; San Diego, California, USA.

Schulkin, M. y Marsh, H.W. (1962). "Sound absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, v 34, p. 864– 865.

Simpson, M. R. (2001). "Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler", *Open File Report 01-1*, United States Geological Survey, Sacramento, California.

Sontek/YSI Inc. (2000). "Acoustic Doppler Profiler Principles of Operation", San Diego, USA.

Szupiany, R. N.; Amsler M. L.; Best J.L. and Parsons, D. R. (2007). "Comparison of Fixed- and Moving Vessel Measurements with an ADP in a Large River", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 12, p. 1299.

Szupiany R. N. (2008). "Corrientes Secundarias y Transporte de Sedimentos en Nodos de Ríos Entrelazados", *Tesis de Doctorado*, FICH-UNL.

Szupiany, Ricardo. N.; Amsler Mario L.; Parsons Daniel R. and Best James L. (2009). "Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences", *Water Resour. Res.*; vol 45, W05415; doi:10.1029/2008WR007428.

Teledyne RD Instruments. (2007). "WinRiver II User's Guide"; P/N 957-6231-00.

Thorne, P. D., y Hanes, D. M. (2002). "A review of acoustic measurements of small-scale sediment processes", *Continental Shelf Research*, Vol. 22, p. 603-632.

Topping, D.J.; Wright, S.A.; Melis, T.S.; y Rubin, D.M. (2007). "High-resolution measurements of suspended-sediment concentration and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system"; in *Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation*; August 1–4; Moscow, Russia; v. III.

Urlick, R. J. (1983). "Principles of Underwater Sound"; 3rd edition; McGraw-Hill.

Wall, Gary R.; Nystrom, Elizabeth A. y Litten, Simon (2006). "Use of an ADCP to Compute Suspended Sediment Discharge in the Tidal Hudson River", New York, *Scientific Investigations Report 2006–5055*. U. S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey; Reston, Virginia.

Wall, G. R.; Nystrom, E. A. y Litten, S. (2008). "Suspended Sediment Transport in the Freshwater Reach of the Hudson River Estuary in Eastern New York", *Coastal and Estuarine Research Federation*, Estuaries and Coasts, v. 31, p. 542–553.

Wright Scott A.; Topping David J.; y Williams Cory A. (2010). "Evaluation of acoustic profilers for discriminating silt-and-clay from suspended-sand in rivers", *2nd Joint Federal Interagency Conference*, Las Vegas, NV, June 27 - July 1.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



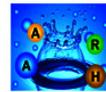
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

