

Estimación del Transporte de Sedimentos de Fondo en un Gran Río con Perfilador Acústico Doppler.

^{1**} *Latosinski, Francisco G.*; ¹ *Szupiany, Ricardo N.*; ² *García, Carlos. M.* y ³ *Guerrero, Massimo.*

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

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

³ Laboratorio de Hidráulica, departamento DICAM, Universidad de Bologna, via Terracini, 40131 Bologna, Italia.

** El primer autor es becario doctoral de Conicet, aspirante a Doctor en Ingeniería por la FCEIA-UNR, con lugar de trabajo en la FICH-UNL.

E-mail: franlatos@gmail.com

RESUMEN: Los métodos tradicionales para la cuantificación y caracterización del transporte de sedimento poseen una limitada resolución espacial, requieren tiempos prolongados de medición, procesamiento en laboratorio de las muestras y considerables costos operativos. La tecnología acústica Doppler, ya reconocida para la medición precisa de caudales líquidos y características del flujo en sistemas fluviales, puede también ser adaptada para obtener información cuantitativa de las concentraciones de sedimento en suspensión (C_{ss}) y de las velocidades de desplazamiento de los sedimentos del fondo, a partir del análisis de la intensidad de señal acústica de retorno y funciones especiales (Bottom Track), respectivamente. A pesar de los importantes esfuerzos que se han realizado en ambas líneas de trabajo, los resultados obtenidos hasta el momento requieren de mayores comprobaciones. En este trabajo se presenta la calibración obtenida de un Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) para la estimación de C_{ss} , relacionando esta variable con la intensidad de la señal acústica de retorno del ADCP (corregida por los efectos de dispersión geométrica y absorción del fluido y sedimento). Aplicando la calibración en las distintas secciones relevadas, la comparación entre el transporte de sedimento de fondo en suspensión obtenido con ADCP difiere en menos de un 25% respecto del método tradicional, avalando así la metodología e instrumental propuestos. Finalmente, valores de velocidad de desplazamiento del sedimento del fondo, obtenidas con la función Bottom Track del ADCP son utilizadas para caracterizar este transporte a lo largo de una duna. Los resultados obtenidos prometen desarrollar nuevas metodologías de aforo del transporte de sedimento en grandes ríos.

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 destaca la escasez de este tipo de información, hallándose en su lugar, información de aforos sólidos aislados en el tiempo y el 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 las 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 tanto de las concentraciones de sedimento en suspensión (a través del análisis de la intensidad de la señal de retorno ó backscatter) como de la velocidad de las partículas de la capa móvil del fondo (a través del análisis de la función Bottom Track del ADCP).

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).

Para el caso de la medición de la velocidad del sedimento del fondo se utiliza la función bottom track (BT) del ADCP, que registra la velocidad de la embarcación respecto del fondo, y los desplazamientos reales de la embarcación con DGPS. Luego, se plantean relaciones entre la velocidad del fondo así obtenida y el transporte de fondo medido con técnicas tradicionales (Jamieson et al, 2011; Gaeuman y Jacobson, 2007; Kostaschuk et al, 2005; Villard et al, 2005; Rennie y Villard, 2004; Rennie y Millar, 2004; Rennie et al, 2002). 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, y más aún de velocidades de la capa móvil del fondo, todavía requiere mayores comprobaciones sobre la influencia de la calidad, cantidad y 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 incluye no sólo las correcciones para la absorción acústica por el agua y los efectos de dispersión del haz acústico, sino además contempla la corrección de la señal debida a la atenuación por el sedimento, aspecto que comienza a ser tomado en cuenta en los trabajos más recientes (Wright et al, 2010; Topping et al, 2007; Gartner, 2004). Entre éstos 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 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. En segunda instancia, se presentan resultados preliminares de la estimación con ADCP de la velocidad del sedimento que viaja por el fondo y su relación con los parámetros involucrados en el fenómeno del transporte de fondo.

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 sobre uno de sus cauces secundarios (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: tramo Superior (Zona A) en la cercanías de la localidad de Lavalle, Corrientes; tramo Medio (Zona B) entre la ciudades de Santa Fe y Paraná (sobre dicha zona se encuentra el cauce secundario denominado Colastiné) y tramo Inferior (Zona C) en las inmediaciones de la ciudad de Rosario.

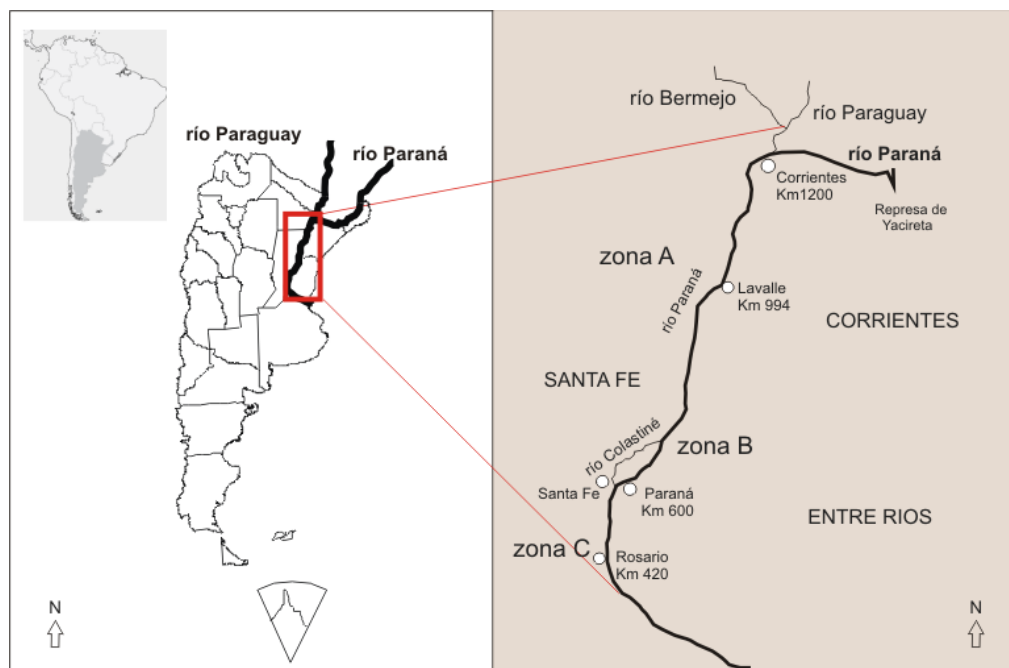


Figura 1.- Zonas de estudio: Paraná Superior (Zona A, cercana a la ciudad de Lavalle), Parana medio y río Colastiné (Zona B cercana a la ciudad de Santa Fe) y Parana Inferior (Zona C, cercana a la ciudad de Rosario).

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 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.

Además, se obtuvieron muestras de material del fondo del cauce, a través de muestreadores 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.

Las mediciones para determinación de la velocidad de desplazamiento del fondo fueron realizadas del siguiente modo: realización de perfiles longitudinales en dirección hacia aguas arriba con ecosonda y DGPS sobre un tren de dunas; repetición de los mismos pasadas 48 hs., mediciones estáticas con ADCP con embarcación anclada sobre cresta, lomo y valle de una duna seleccionada de dichos perfiles, por espacio de 15 minutos cada una. Estas mediciones fueron realizadas en la zona A entre el 31 de Mayo y el 1 de Junio de 2011.

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 del orden de ± 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 (haces 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), paralelamente se realizaron aforos sólidos por método mecánico a fin de comparar ambos resultados.

MODELO PARA ESTIMAR C_{ss} UTILIZANDO INFORMACIÓN DEL 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, esto es (Thorne and Hanes, 2002):

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

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, $\pi\tau$ 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 C_{ss} para el material grueso y C_w 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.

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:

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

El primer término corresponde a las pérdidas debidas a la dispersión del haz (beam 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.

En 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 así lo corroboran las 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, $f_T = 21.9 \times 10^6 \left[6 - \frac{1520}{T+273} \right]$, 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. 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 presentadas por Gartner (2004):

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

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 C_w ,

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.

Luego, la calibración final se logra por regresión lineal entre el logaritmo de los valores de concentración de sedimento en suspensión obtenidos de las muestras versus los valores de la señal del ADCP corregida e integrada en la vertical. De esta forma se busca un ajuste con pendiente similar a la teórica de 0.1 (Ecuación 3).

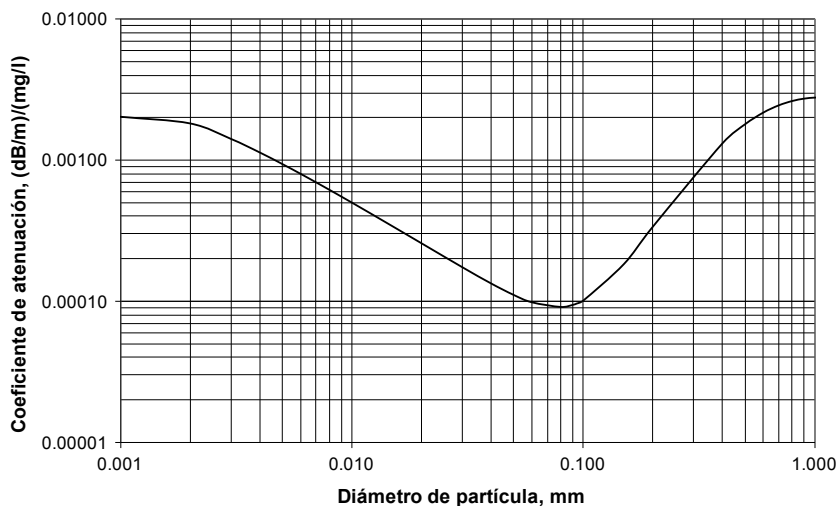


Figura 2.- Curva de atenuación por sedimento para la frecuencia de 1200 kHz del ADCP, ecuación (9).

Aforos Sólidos con ADCP y método tradicional.

Una vez obtenida la calibración del ADCP, 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, multiplicado por su tamaño y velocidad del flujo 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 de dos maneras distintas 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} (ó G_w , en caso de haber utilizado C_w : carga de lavado). 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 3). Por tal motivo, al valor de este transporte lo denominaremos de aquí en adelante como G_{ss_m} y G_{w_m} .

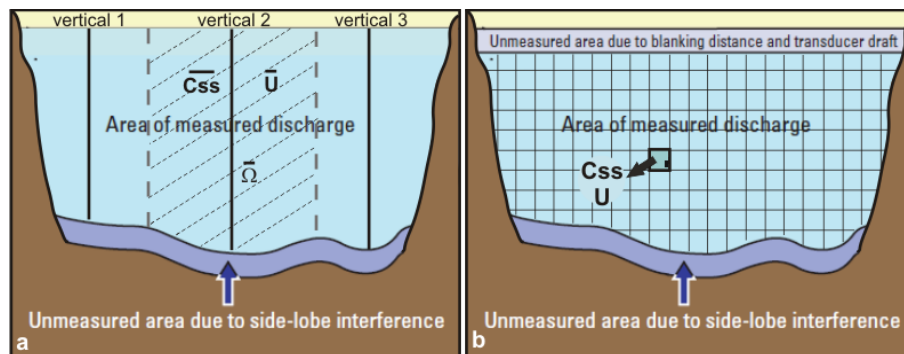


Figura 3.- Representación esquemática de aforo sólido; a) método tradicional y b) método dinámico con ADCP

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 C_{ss} 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} .

Velocidad y tasa de transporte de la carga de fondo

Los ADCP miden la velocidad del agua relativa al instrumento. Si el instrumento se halla montado sobre una plataforma móvil, como una embarcación, las velocidades obtenidas son corregidas para la velocidad del bote para obtener mediciones absolutas. La velocidad del bote se determina tanto por el sistema BT (v_{BT}) como por el uso de un DGPS (v_{DGPS}). Cuando el fondo del río es móvil, la señal de BT es desviada por el sedimento en movimiento. En esta situación, la velocidad aparente del sedimento del fondo puede determinarse si la velocidad actual del bote es conocida, tanto por DGPS como manteniendo el ADCP perfectamente quieto (Rennie et al, 2002):

$$v_{Ba} = v_{DGPS} - v_{BT} \quad (12)$$

Donde v_{Ba} es la velocidad aparente de desplazamiento del fondo, v_{DGPS} es la velocidad del bote obtenida con DGPS y v_{BT} es la velocidad del bote obtenida con la función BT del ADCP.

Rennie et al (2002) citan el modelo cinemático (Haschenburger and Church, 1998) para el cálculo de la tasa de transporte de la carga de fondo local por unidad de ancho, g_b , cuando se conocen los valores de la velocidad actual promedio de la carga de fondo (v_B), espesor de la capa de fondo en movimiento (d_a) y porosidad (λ_a) de la capa activa de transporte y la densidad de las partículas de sedimento (ρ_s):

$$g_b = v_B d_a (1 - \lambda_a) \rho_s \quad (13)$$

A partir de aquí se asume que la velocidad aparente del fondo obtenida con la Ecuación (12) es una medición correcta de la velocidad real del fondo, v_B . Adicionalmente, si bien la profundidad y porosidad de la capa móvil del fondo no han sido medidas explícitamente, se sabe que ambos parámetros, así como la densidad del sedimento, no experimentan gran variabilidad. De este modo, utilizando la velocidad del fondo obtenida por bottom track (Ecuación 12) y valores de tasas de transporte de fondo obtenidas por métodos tradicionales (i.e. muestras físicas o método de seguimiento de dunas) pueden plantearse regresiones entre ambas variables, así como expresiones para la profundidad de la capa de fondo.

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 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 poseen 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 promedio originada por material fino, $\alpha_{SF} = 0.061$ dB/m y la componente promedio aportada por el material grueso, $\alpha_{SG} = 0.004$ 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, se cree importante evaluar el orden de magnitud de la atenuación, pues su omisión podría llevar a errores considerables 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 C_{ss} ajustan una curva esperada graficando el $\log_{10} [CSS]$ vs. señal del equipo corregida ($SCMG$), 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 C_{ss} .

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, 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 (concentración de finos y señal corregida del ADCP).

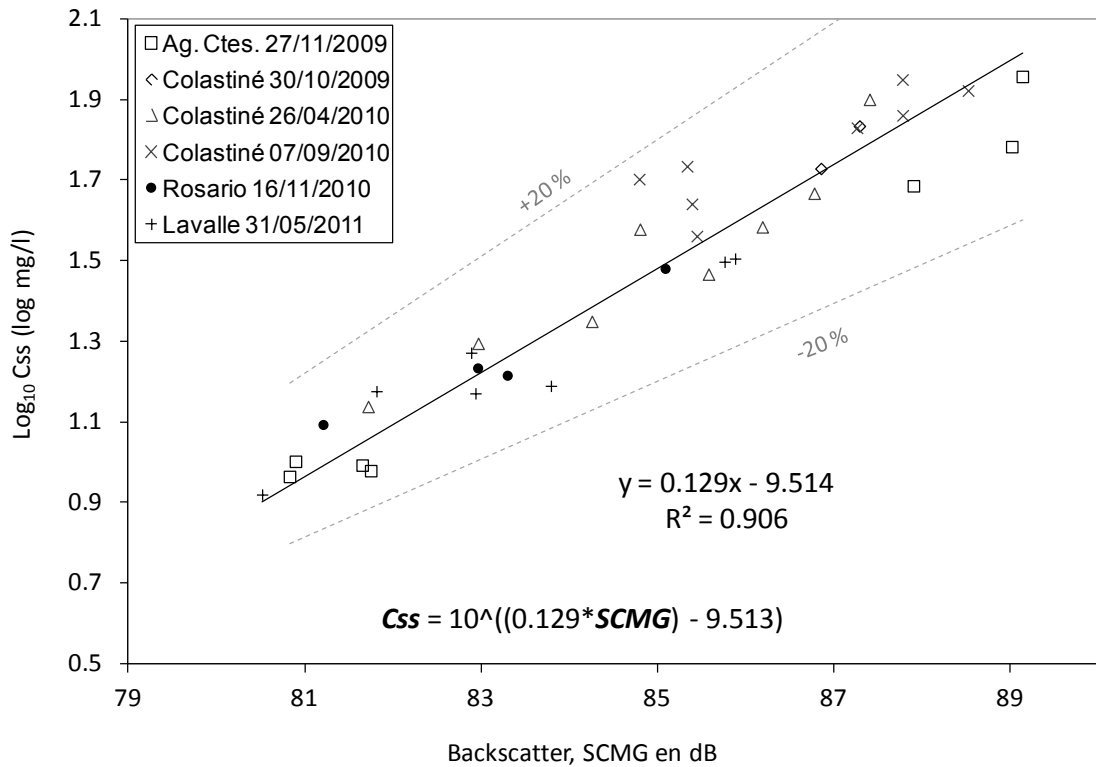


Figura 4.- Relación entre la concentración de sedimento de fondo en suspensión, C_{ss} , y la intensidad de señal de retorno corregida o Backscatter, $SCMG$.

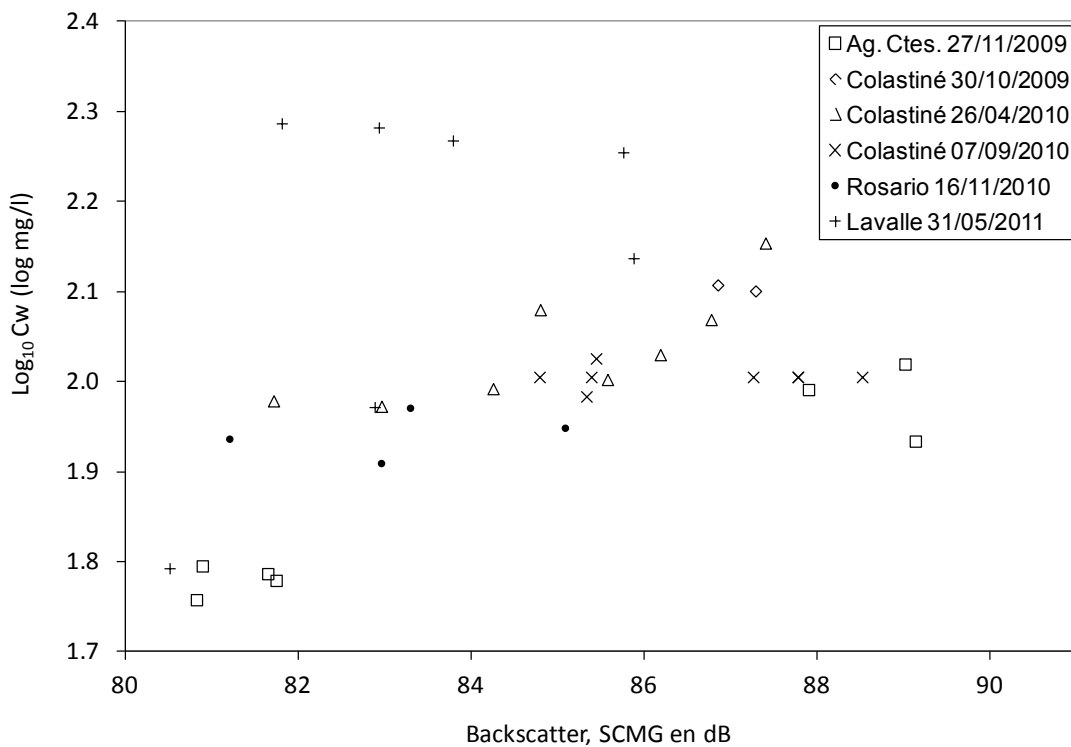


Figura 5.- Relación entre la concentración de sedimento fino en suspensión, C_w , y la intensidad de señal de retorno corregida o Backscatter, $SCMG$.

Los resultados de la aplicación del método propuesto de aforo del sedimento de fondo en suspensión se presentan en Tabla 1 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 1.- 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.

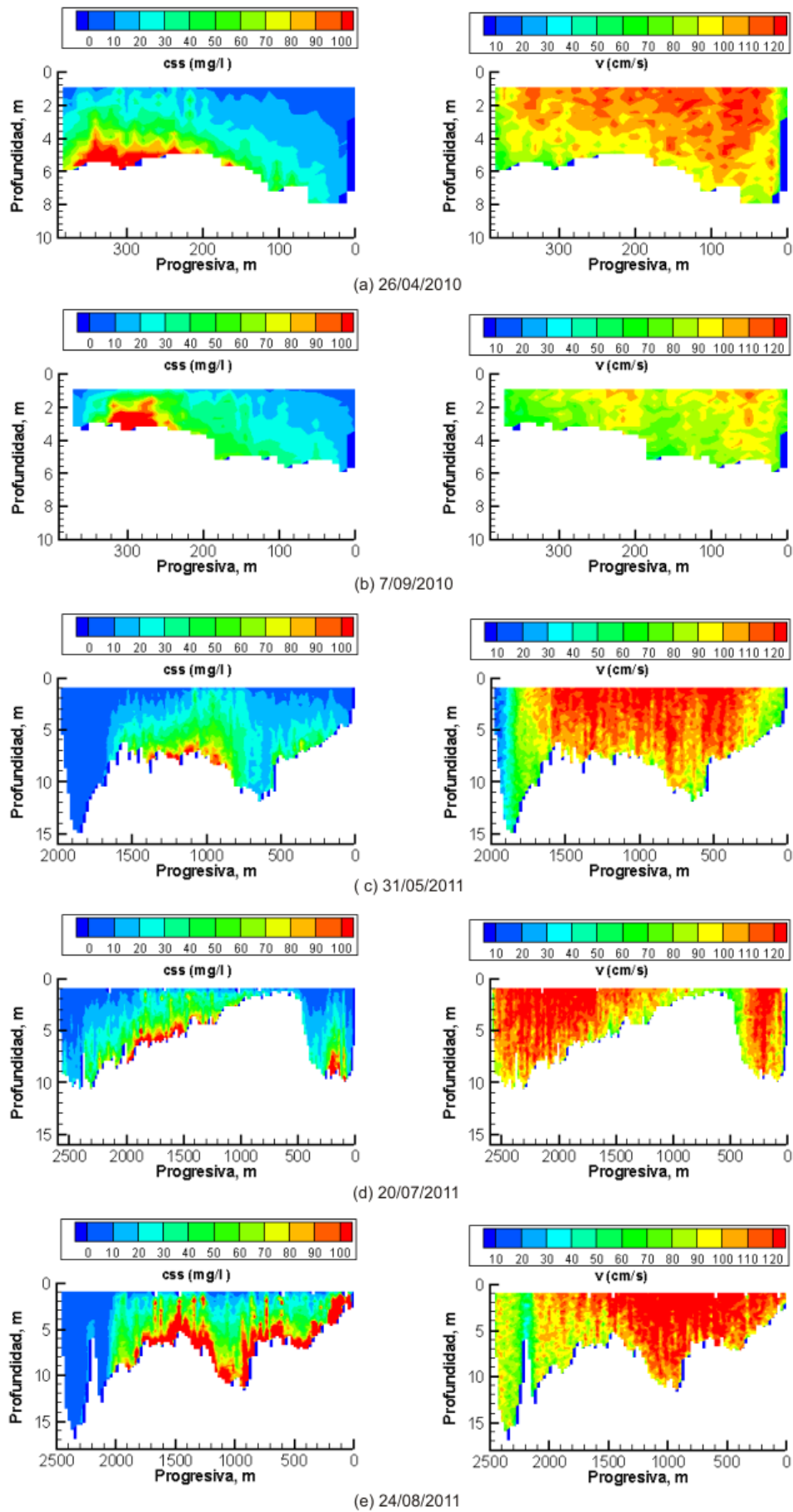


Figura 6.- Distribución transversal de la velocidad del flujo y la concentración del sedimento de fondo en suspensión. (a) y (b): zona B. (c), (d) y (e): zona A. Las secciones se presentan con vista hacia aguas abajo.

La Figura 7 permite observar los desplazamientos relativos del bote (con DGPS y BT) y la velocidad del fondo obtenida de las mediciones estáticas sobre cresta, valle y lomo de una duna detectada en uno de los perfiles longitudinales. Los valores obtenidos, presentados en Tabla 2, son promedios temporales (15 min) y se corresponden con el comportamiento esperado del transporte de sedimentos de fondo a través de su paso sobre una duna: mayor transporte en la cresta, menor en el lomo y mínimo en el valle.

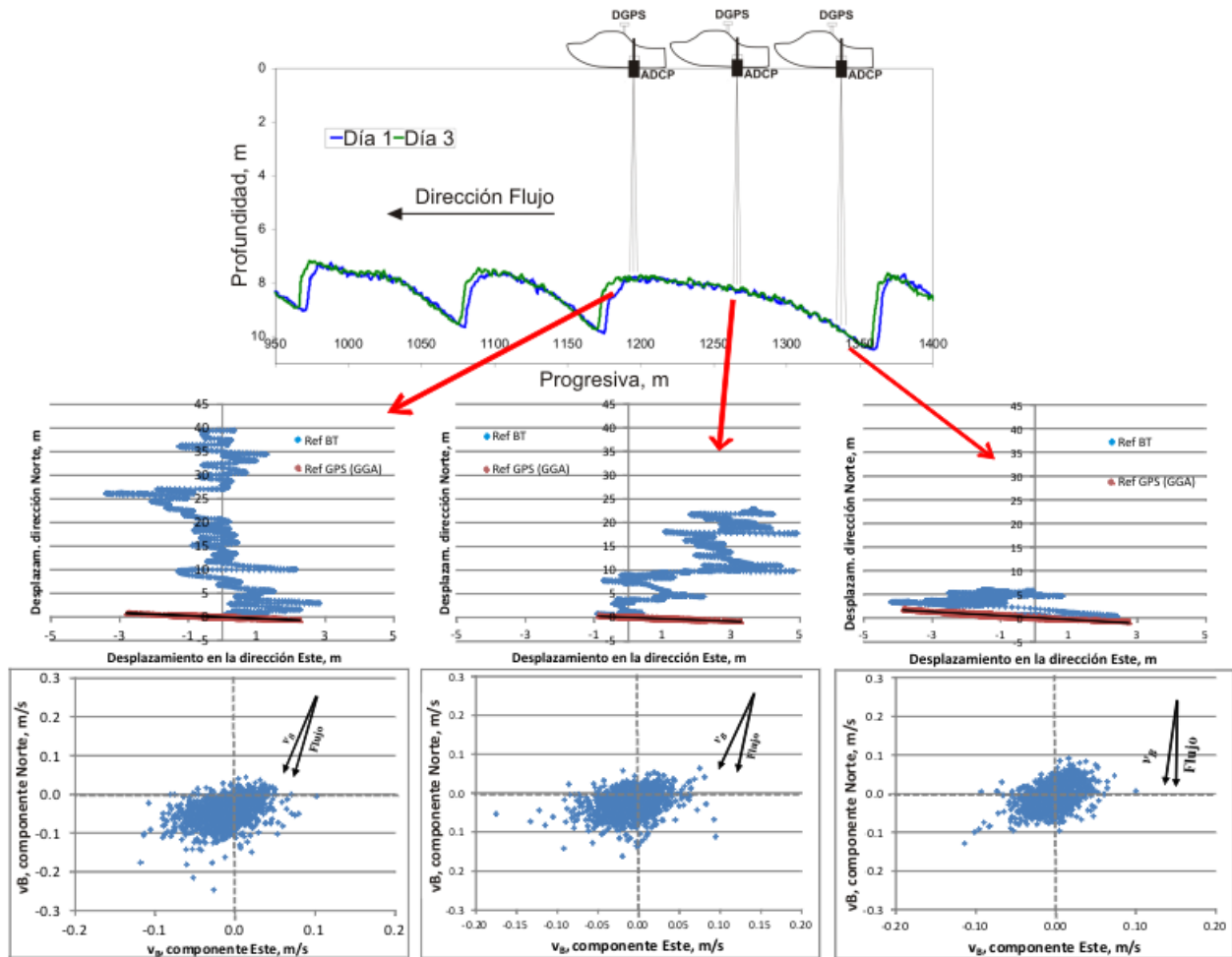


Figura 7.- Desplazamientos relativos del bote (referencia: BT y DGPS) y velocidades del fondo sobre cresta, lomo y valle de una duna, en mediciones estáticas de 15 min y frecuencia de registro de 1.4 Hz.

Tabla 2.- Promedio temporal de la velocidad del fondo en mediciones estáticas sobre duna.

	cresta	Lomo	valle
v_B , m/s	0.053	0.041	0.032

Por otro lado, en la misma figura puede observarse parte del perfil longitudinal correspondiente para cada día de medición. De estos perfiles se extrajo, por el método de seguimiento de dunas, un valor promedio de transporte de sedimentos de fondo sobre el tren de dunas ($g_{sf} = 0.066$ kg/s m) y el valor medio correspondiente para la duna seleccionada ($g_{sfi} = 0.092$ kg/s m). Dado que se puede considerar $g_{sfi} = g_b$ (ec. 13) pues ambas son tasas de transporte unitario, un resultado preliminar se obtiene de utilizar el promedio temporal v_B en la cresta de la duna (que bien puede relacionarse al valor medio de la tasa de transporte unitario de sedimentos de fondo) para despejar el valor del espesor de la capa activa de transporte del modelo

cinemático presentado en Ecuación 13. Esto es, asumiendo un valor típico en arenas medias a finas de $\lambda_a = 0.4$ y $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, el espesor de la capa móvil del fondo para la duna en cuestión es:

$$d_a = \frac{g_b}{v_B(1-\lambda_a)\rho_s} = 1.08 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta la distribución granulométrica del sedimento del fondo del río Paraná en su tramo medio (Drago y Amsler, 1998), cuyo $d_{65} \approx 0.40 \text{ mm}$, se observa que este resultado se asemeja a las aproximaciones teóricas, donde se postula que $d_a = 2*d_{65}$ (Einstein, 1950).

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 (ec. 2), con un coeficiente R^2 de 0.91.

Además, se destaca la resolución espacial del campo de concentraciones y transporte de sedimento en suspensión lograda con ADCP, proporcionando así una nueva herramienta de gran importancia para estudios hidro-sedimentológicos en cauces naturales.

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. Sin embargo, 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.

Finalmente, la tecnología Doppler también incursiona con buenos resultados en la estimación del transporte de sedimentos de fondo, pues se han hallado resultados preliminares que relacionan en buen grado los valores de velocidad del fondo con el comportamiento esperado para el transporte de dicho material a través

de un lecho de dunas. Se ha visto que la utilización del promedio temporal de la velocidad del fondo sobre la zona de mayor representatividad del transporte medio de este material sobre un campo de dunas ha permitido obtener una buena estimación del espesor de la capa activa de transporte, en plena concordancia con las aproximaciones teóricas.

A la luz de estos resultados, se cree necesaria la profundización del estudio de las potencialidades de la tecnología acústica Doppler para avanzar en el desarrollo de nuevas técnicas de medición, que permitan obtener con mayor confiabilidad y grado de precisión, una representación del fenómeno del transporte de sedimentos en un gran río.

LISTA DE SÍMBOLOS

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

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.

REFERENCIAS

- 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.
- Einstein, H.A. (1950) "The Bedload Function for Bedload Transportation in Open Channel Flows"; Technical Bulletin No. 1026, U.S.D.A., Soil Conservation Service, 1-71.
- 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.
- Haschenburger, J. K., y Church, M. (1988). "Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment." *Earth Surf. Processes Landforms*, 23, 791–808.
- 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.
- Rennie, C. D., Millar, R. G., y Church, M. A. (2002). "Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler." *J. Hydraul.Eng.*, 128(5), 473–483.
- Schulkin, M. y Marsh, H.W. (1962). "Sound absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, v 34, p. 864–865.
- Schumm, S. A., y Winkley, B. R. (1994), The character of large alluvial rivers, in *The Variability of Large Alluvial Rivers*, edited by S. A. Schumm and B. R. Winkley, 467 pp., ASCE, New York.
- Szupiany, Ricardo. N.; Amsler Mario L.; Parsons Daniel R. y 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.
- Szupiany, R. N.; Amsler M. L.; Best J.L. y 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.
- 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.
- 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.