

Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires

Daniel Enrique PÉREZ^{1,2} y Gerardo Miguel Eduardo PERILLO^{2,3}

1. Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina. E-mail: deperez@criba.edu.ar

2. Instituto Argentino de Oceanografía, CC 804, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

3. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, Argentina. E-mail: perillo@criba.edu.ar

Resumen. Se presentan resultados hidráulicos y sedimentológicos de una campaña al arroyo Napostá Grande. A pesar que existe un gran número de obras hidráulicas sobre el curso inferior del arroyo, no existen aún datos publicados acerca del caudal sólido transportados por el mismo. Se ubicó una sección de aforo adecuada, sobre la cual se determinó la batimetría del área. Se midieron las velocidades en verticales separadas 0.5 m en toda la sección y a partir de estos valores se determinaron las curvas de igual velocidad en la sección con las que se calculó el caudal y la distribución de los esfuerzos de corte del fondo. Se obtuvieron muestras del sedimento transportado como carga de fondo por medio de trampas, verificándose transporte diferentes en cada faja. Paralelamente se calculó el transporte como carga de fondo por medio de cuatro diferentes ecuaciones y se comparó con los valores medidos, determinándose cual de las ecuaciones predijo mejor el valor del transporte. De las muestras de sedimento en suspensión se realizaron las curvas granulométricas y se calculó la velocidad de caída ponderada de esos sedimentos. Se estimó la concentración y el transporte de sedimento en suspensión por el método de difusión, determinándose además la distribución de concentraciones en la sección de aforo.

Las características particulares del transporte en el curso inferior de arroyo Napostá llevan necesariamente a determinar el transporte como carga de fondo en distintas fajas ya que la influencia de las orillas provoca una considerable diferencia en el transporte entre la zona de mayor profundidad y las zonas cercanas a las orillas, haciendo riesgoso considerar una sola posición como representativa de la sección en su totalidad. Las comparaciones entre las fórmulas de predicción de transporte como carga de fondo sugieren como la más adecuada a la de Einstein aunque predice en defecto. Le siguen las formulas de Yalin y de Bagnold. La fórmula suiza arrojó resultados muy por encima de los reales, debiéndose esto a que la arena del arroyo es muy fina y dicha ecuación es valida para partículas relativamente grandes ($D > 2$ mm).

Palabras clave: Transporte de sedimento, Esfuerzo de corte de fondo, Carga de fondo, Arroyo Napostá Grande.

Keywords: Sediment transport, Bottom shear stress, Bed load, Napostá Grande Creek

EXTENDED ABSTRACT

Sediment transport processes in the Naposta Grande creek, Bahía Blanca, Buenos Aires province.

Hydraulic and sedimentological results of a field survey to the Napostá Grande Creek are presented. The lower, highly meandering course flows through Bahía Blanca City. This part of the creek is greatly affected by hydraulic man-made features such as railways, car and walking bridges,

canalisations, a structure that separates the extreme flood water, urban rainwater collection, cleaning, etc. In addition, sand is being extracted from the channel for construction. Despite the remarkable influence that the stream has on the city, there are no quantitative records of the sediment transport within the stream. The objective of this work is to determine the liquid and solid flux over a section, evaluate the dynamic and turbulent characteristics of the flux, find a proper methodology suitable for this particular situation and define

a formulation that predicts most accurately the bed load transport in the Napostá Creek.

A proper cross-section after a recognition walk along several kilometres along the course of water has been done. As the stream shows several meanders it was difficult to locate an ideal cross section. The one chosen had some problems from the hydraulic point of view (partially symmetrical area, presence of a sand bar located in a rather short straight length), but on the other hand, the accessibility was excellent with available electric supply.

Bathymetry of the surrounding area was carried out and a map was produced with isobaths with 0.5 m equidistance. Velocities at vertical profiles separated 0.5 m were obtained with a propeller along the cross-section and, based on these data, equal-velocity curves were drawn over the transversal section. These allowed the determination of the water flux and the bottom shear stress distribution along the cross section and wet perimeter.

Within the section, bedload sediment transport was sampled using Helley-Smith kind bedload traps, at various locations, confirming different transport rates at each point. Traps gathered the sediments over 13 minute at each strip in five points, which led to a distribution of the sediment dragged close to the bottom. Higher transport rates were verified on the section thalweg diminishing shorewards. Granulometric curves were determined for the bed load samples and bottom

ones. The coarser sediment was trapped only near the thalweg where there is an important velocity concentration. Close to the shores, only the finer fraction of the bedload was captured by the traps meaning that the energy available there does not involve all particle sizes in the movement.

Calculation of the predicted bedload sediment transport was done, considering four well known equations (Meyer-Peter-Muller, Einstein, Bagnold and Yalin). The D_{50} criteria was adopted for the calculation of the bedload. The Swiss formula gave a 100% error in comparison with the measured values, whereas the rest of them showed great accuracy for the methodology employed. Einstein's formula gave the closest value to the measured one but underestimated it. On the other hand Bagnold's equation resulted in 17 % in excess. Yalin's formula produced a 15% underestimation, about the same order than Einstein's formulation. Suspended sediment samples were obtained and their granulometry determined through the Oden's Curve technique. Based on them, weighted settling velocities were calculated for each sample (Perez *et al.*, 1997). Suspended sediment concentration profiles were determined by the diffusion method. Then the concentration distribution was integrated over the area so that total flux and flux distribution were obtained. Also a grid was calculated and curves of equal flux are presented. Net suspended sediment transport across the area was found as the addition of the two kind of transports.

INTRODUCCIÓN

El Arroyo Napostá Grande está ubicado en el SO de la provincia de Buenos Aires con sus nacientes en el Sistema de Ventania y atraviesa la ciudad de Bahía Blanca en su curso inferior para desembocar en el estuario de Bahía Blanca (Fig 1). Su recorrido es de 90 km y drena una cuenca de 1450 km². Durante el período 1936-44 fueron medidos caudales correspondientes a una subcuenca de 200 km² en la parte alta que arrojó valores de caudal máximo, mínimo y medio de 220 m³ seg⁻¹ 0.061 m³ seg⁻¹ y 0.425 m³ seg⁻¹ respectivamente. Datos más recientes que incluyen alrededor de dos tercios de la cuenca dan como módulo 0.8 m³ seg⁻¹ (Piccolo y Perillo, 1990).

En su recorrido el curso de agua atraviesa terrenos de diferentes litologías (García y García, 1964). En la zona de Ventania, los suelos que atraviesa son de tipo areno-humíferos, con ondulaciones y pendientes. En su tramo medio, hasta llegar a Bahía Blanca, el arroyo fluye por suelos de tipo areno-arcilloso, con suave relieve o bien casi nulo, apoyado en un manto calcáreo que aflora en algunos lugares típico de los sedimentos pampeanos que conforman la superficie de la región. En la zona de la desembocadura el suelo es de tipo limo-arcilloso

y salitroso, común en zonas bajas, llanas y humedales. El material depositado en el fondo de la zona estudiada es fundamentalmente arena fina. El sedimento transportado en suspensión, proveniente de los taludes de material cohesivo otorgando a las aguas una coloración rojiza. El fondo posee granulometrías de arenas finas a muy finas.

Sobre este curso de agua se han realizado distintas obras hidráulicas como puentes viales, ferroviarios y peatonales, entubado, desviaciones, canalizaciones y constante limpieza. Incluso se ha estudiado la posibilidad de construir una represa para protección contra crecidas extraordinarias y abastecimiento de agua para la industria. Existe en la actualidad una explotación de arena transportada por el arroyo para ser usada como material de construcción. Esta influencia antrópica afecta directamente al sistema y no se conocen valores de transporte de arena que permitan establecer un tiempo de recuperación del lecho. Uno de los objetivos principales de este estudio es establecer lugares aptos para la medición así como metodologías apropiadas que permitan establecer una base para futuras campañas.

El arroyo Napostá, a pesar de la importancia que tiene para la Ciudad de Bahía Blanca, no ha sido motivo de un estudio detallado. El conocimien-

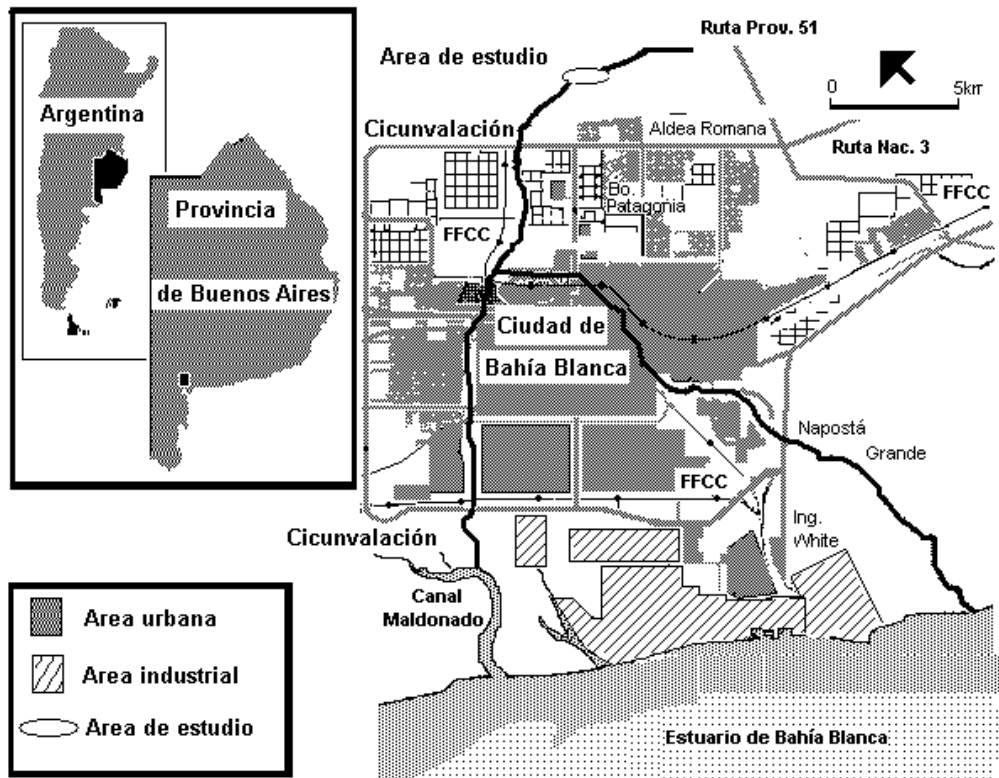


Figura 1. Mapa esquemático del curso inferior del Arroyo Napostá Grande hasta la desembocadura en el estuario de Bahía Blanca. La bifurcación del curso se debe a un partidor aliviador de crecidas.

Figure 1. Schematic map of the lower course of the Napostá Grande creek to the outlet into Bahía Blanca Estuary. The bifurcation in the trace of the course is due to a hydraulic structure which carries part of flow during extreme floods.

to sobre este curso de agua que atraviesa un centro urbano en pleno crecimiento, donde el recurso agua es escaso, se vuelve cada vez más importante. Se busca a través de esta campaña inicial, contribuir con datos hidrológicos en la parte inferior de arroyo Napostá. Se describirá la mecánica del transporte de sedimento y se calcularán parámetros turbulentos en la sección de aforo.

Se propondrá una formulación que mejor represente el transporte como carga de fondo que junto con futuras campañas servirán para determinar el grado de recuperación del fondo del curso en condiciones medias.

METODOLOGÍA

Lugar de estudio

Las mediciones se llevaron a cabo en una sección transversal del arroyo especialmente seleccionada a tal efecto.

Se recorrió a pie parte del curso inferior con el objeto de ubicar una sección que presentara las características hidráulicas y de accesibilidad necesarias para el aforo. También se buscó medir cerca de la zona de extracción de arena para tener una idea del grado de recuperación del lecho. Para establecer una sección de aforo es conveniente tener en cuenta distintas características de la misma, como por ejemplo que se encuentre en un tramo recto, que sea de sección uniforme a lo largo del mencionado tramo y estable desde el punto de vista de erosión-sedimentación. Una sección con esas propiedades asegura mínimamente un escurreimiento uniforme. El sector elegido presenta algunos inconvenientes desde el punto de vista hidráulico tales como la presencia de barras de arena, tramo parcialmente recto y sección asimétrica. Pero en un curso altamente meandroso, la sección adoptada es la que posee las mejores condiciones para realizar el estudio, además de contar con excelente accesibilidad y energía eléctrica.

trica disponible.

Se determinó la forma del lecho en la zona de influencia de la sección de aforo elegida, tanto aguas arriba como aguas abajo de la misma, con el objetivo de trazar las curvas de nivel del tramo recto del curso de agua (Fig. 2). La ordenada cero corresponde a la sección adoptada para la medición de los caudales líquidos y sólidos. El lecho del arroyo estaba conformado mayoritariamente de arenas finas y muy finas.

La determinación del caudal líquido se llevó a cabo por medio del método de las líneas de igual velocidad. Sobre la sección estudiada se midió la velocidad en varios puntos por medio de un molinete aforador que indica la velocidad de un determinado punto en función del número de vueltas por minuto. Las mediciones fueron obtenidas sobre verticales separadas 50 cm entre sí, y en dos o tres niveles en cada una de ellas según la profundidad del lugar. En general se midieron velocidades a 80% y 20% del tirante pero se agregaron otras mediciones a distintas profundidades para lograr una mejor densidad en la distribución del campo de velocidades presente en el lugar. Se generó una grilla de 50x20 puntos sobre el área y se interpolaron las isotacas entre los puntos medidos, utilizando el método del vecino más cercano. Las curvas de igual velocidad así halladas determinan un volumen sobre el área de la sección que es igual al caudal líquido, el cual fue calculado por los métodos de los trapecoides y de Simpson. La temperatura y conductividad del agua como así también la variación del tirante se obtuvo en un sitio por la totalidad del estudio empleando un MiniCTD InterOcean.

Durante la campaña se obtuvieron muestras del sedimento transportado como carga de fondo por medio de trampas tipo Helley-Smith (Ludwick, 1989), en cinco lugares correspondientes a cinco fajas de igual ancho de fondo (1 m), durante 13 minutos en cada lugar. De las muestras capturadas por la trampa se realizaron las correspondientes curvas granulométricas por medio de una tamizadora sónica.

Muestras de fondo fueron extraídas en dos puntos, a 1,5 m de la margen izquierda (correspondientemente con el *thalweg*, fondo 2) y la segunda a 4,5 m de la misma margen (sobre la barra de arena, fondo 1). Se tamizaron alrededor de 150g de cada muestra por una serie de tamices estándar de $\frac{1}{2}\phi$. Los datos de las muestras de fondo como las provenientes de la trampa de arena fueron procesados por el método de los momentos implementado por el programa GRANUS (Perillo *et*

al., 1985).

Para la determinación del sedimento en suspensión se extrajeron 2 muestras de 5 litros de agua en un punto a 2 cm del fondo, que corresponde al 5% del tirante en el lugar. Cada muestra resulta representativa del sedimento en suspensión transportado sobre la barra (muestra 1) y en la zona de mayor velocidad de la sección (muestra 2). Dos tipos de ensayos se realizaron con estas muestras, el primero de concentración y el resto fue usado para determinar la granulometría. Para ambos casos se procedió a pretratar las muestras con agua oxigenada al 50% a 60°C para eliminar toda la materia orgánica presente. Para el caso del ensayo de granulometría se concentraron los sedimentos por medio de una máquina centrífuga que permitió obtener la cantidad necesaria de sedimento como para realizar el ensayo dentro de los límites adecuados. Seguidamente se ensayaron las muestras en los tubos de Oden (Krumbein y Pettijohn, 1938). En función de la curva granulométrica de sedimento arrastrado por la columna de agua se determinó la velocidad terminal w_s (Pérez *et al.*, 1997), que resulta de ponderar la velocidad de caída teórica de cada fracción obtenida en los ensayos de Oden.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Batimetría

Se trazaron las curvas de nivel del vaso del canal que contiene la sección de aforo (Fig. 2) que muestra la irregularidad de la sección. Aguas abajo de la sección de aforo sobre la margen derecha existe una barra de arena, mientras que sobre la izquierda se verifica un socavón. Aguas arriba se observa una sección mucho más uniforme asimilable a un trapecio. No se verificaron cambios en los registros del CTD por lo que se asume que durante la campaña el arroyo tuvo un escurrimiento permanente.

Corrientes y esfuerzos de corte de fondo

El valor del caudal encerrado por las curvas de igual velocidad (Fig 3) arrojó un valor de caudal de $0,46 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ con diferencia menor al 1% entre los métodos de los trapecios y de Simpson. Asimismo el área de la sección estudiada resultó ser de 1.62 m^2 y la velocidad media fue de $0,27 \text{ m seg}^{-1}$. En el momento de las mediciones el nivel del arroyo era medio y estable, siendo su caudal aproximadamente la mitad del módulo.

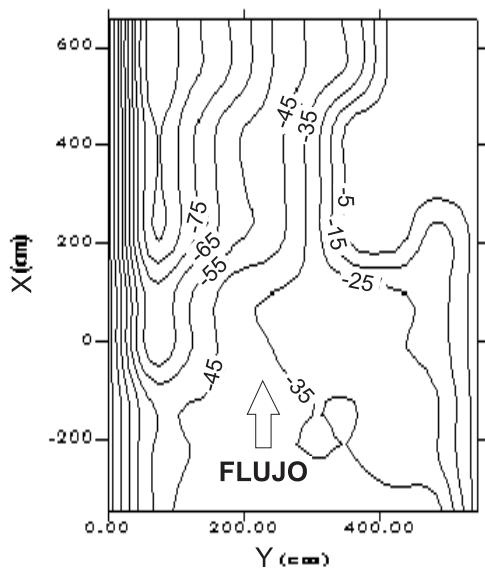


Figura 2. Curvas de nivel del vaso del canal que contiene la sección de aforo. La coordenada X es transversal al arroyo y la Y es la longitudinal. La equidistancia entre curvas es de 5 cm. El valor de Y = 0 corresponde a la sección de aforo.

Figure 2. Level curves of the channel vase containing the measuring area. X coordinate is transversal to the flow while Y is longitudinal. Separation between curves is 5 cm. The value Y = 0 coincides with the measuring area.

Las líneas de igual velocidad en la sección encierran información acerca de la distribución del esfuerzo de corte en el fondo. En efecto, dada una vertical en cualquier punto sobre el fondo se puede determinar el perfil de velocidades y, con este, calcular el esfuerzo de corte en el fondo. Se digi-

talizaron los perfiles de velocidad cada 50 cm desde la orilla derecha (Fig. 4). El efecto del fondo genera una capa límite hasta un 60 o 70 % de la profundidad. Los valores hallados cerca de la superficie del agua son independientes del efecto del fondo, por lo que se hace necesario utilizar la fórmula de Coles (1956) para ajustar los mismos. A partir de los ajustes se determinaron las velocidades de fricción y esfuerzo de corte en el fondo representativo de cada faja (Tabla 1). Los valores de esfuerzo de corte y velocidad de fricción presentan un valor máximo para la faja de mayor profundidad (entre X = 1 m y X = 2 m medidos desde la margen izquierda) lo que indica una concentración del flujo en la zona cercana a la margen izquierda debido a la presencia de la barra en la margen derecha.

Sedimento de fondo

Ambas muestras de fondo extraídas presentan valores característicos y curvas granulométricas similares (Tabla 2, Fig. 5). Las arenas se ubican entre medianas y muy finas en más del 80% de la mezcla ($1 < \phi < 4$). Los porcentajes de partículas menores que 5ϕ (limos y arcillas) no alcanzan al 1% de la mezcla por lo cual los efectos cohesivos pueden despreciarse considerando al fondo como arena granular.

Sedimento transportado como carga de fondo

Curvas granulométricas y parámetros característicos de cada muestra capturada por la trampa fueron calculadas (Fig. 5 y Tabla 2). La curva

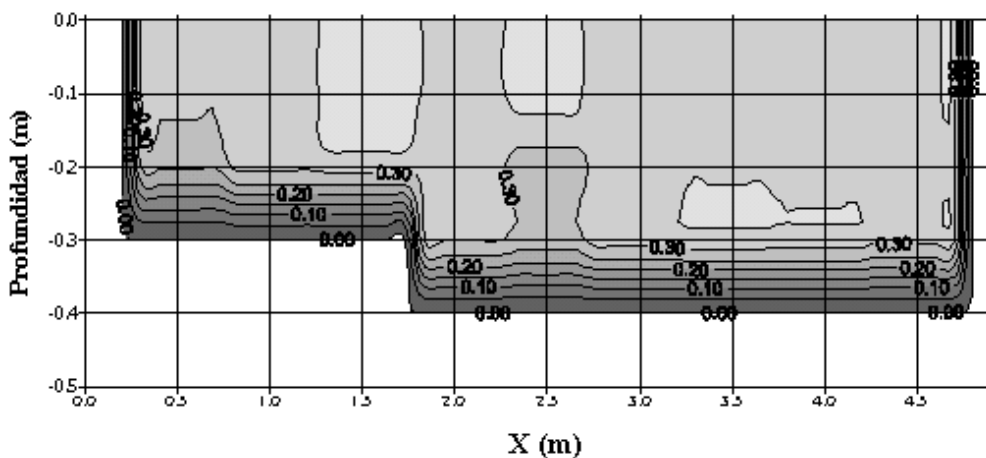


Figura 3. Isotacas (curvas de igual velocidad) calculadas para la sección de aforo del Napostá Grande en $m \text{ seg}^{-1}$.

Figure 3. Equal velocity curves calculates for the measuring area for the Napostá Grande creek in $m \text{ seg}^{-1}$.

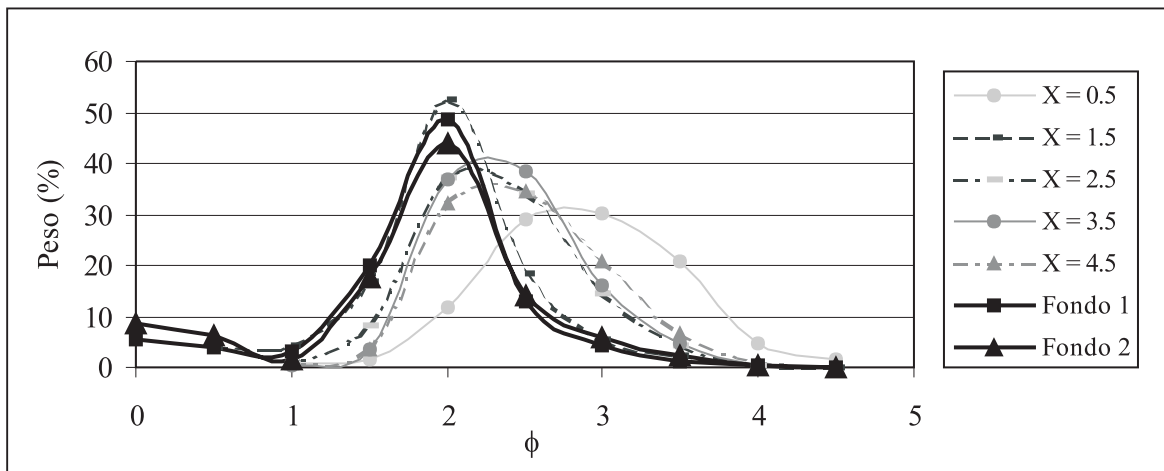


Figura 4. Curvas granulométricas de las muestras de fondo y las atrapadas por la trampa de sedimentos.

Figure 4. Bottom and trapped sediment Granulometric curves.

granulométrica del sedimento colectado a 1,5 m de la margen izquierda (*thalweg*) presenta una similitud marcada con la forma, porcentajes y parámetros de la granulometría del fondo. En ese lugar se presentan además las mayores velocidades y esfuerzos de corte lo que indica que la competencia del escurrimiento es tal que pone en juego a todos los granos disponibles en el lecho. El resto de las curvas granulométricas indican presencia de mayores porcentajes de fracciones de diámetros relativamente más pequeños y ausencia de granos de valores 0, 0,5 y 1 ϕ . Los diámetros por encima de 0,5 ϕ no fueron arrastrados por la corriente más allá del segmento delimitado entre X = 1 m y X = 2 m. La influencia de las orillas y en especial de la barra

sobre la margen derecha, hace que solo los granos más pequeños sean transportados ya que partículas mayores de 1 ϕ no fueron capturadas por las trampas en esas posiciones.

Existe por lo tanto un transporte selectivo dentro del cauce, produciéndose una mayor selección, disminución de diámetro acarreado y aumento de simetría hacia las orillas del sedimento transportado (Tabla 2). Ello se ve confirmado por los gráficos de dispersión de la media y selección (Fig. 6a) y media y asimetría (Fig. 6b). En esta última figura los valores correspondientes a las muestras de fondo se agrupan junto con la muestra de sedimento transportado en el *thalweg*, mientras que el resto presenta valores medios mayores (diámetros medios más pequeños).

Este efecto es importante ya que muestrear sedimento transportado solamente en la parte más profunda para extrapolar luego a toda la sección llevaría a una sobrestimación del transporte real. Para la correcta determinación del sedimento arrastrado como carga de fondo en el arroyo Napostá es necesario medir en varios puntos para su correcta determinación.

Las muestras extraídas en las cinco estaciones permitieron calcular la tasa de transporte correspondiente a cada faja (Tabla 3). Estos valores siguen la tendencia de las curvas de igual velocidad, y apoya lo expresado en el párrafo anterior mostrando la zona de mayor profundidad como la que registra mayor tasa de transporte como carga de fondo en toda la sección.

Sedimento transportado				
X (m)	Media	Selección	Simetría	Curtosis
0.5	2.88	0.60	0.01	3.13
1.5	2.07	0.58	-0.53	4.21
2.5	2.34	0.51	0.31	3.08
3.5	2.41	0.47	0.51	3.21
4.5	2.49	0.54	0.49	3.54
Sedimento fondo				
1.5	1.83	0.70	-0.76	4.57
4.5	1.81	0.81	-0.65	3.53

Tabla 1. Valores característicos de las curvas granulométricas expresados en ϕ de las muestras de la trampa y las de fondo.

Table 1. Characteristic values of the granulometric curves expressed in ϕ of the trapped and bottom samples.

Dist. al borde (m)	Tasa trans (g m ⁻¹ seg ⁻¹)
0.5	0.373
1.5	0.315
2.5	0.192
3.5	0.173
4.5	0.044

Tabla 2. Tasas de arrastre calculadas para fajas de 1 m de ancho en el fondo del Napostá Grande, en base al sedimento capturado.

Table 2. Bedload rates calculated at 1 m wide strips aver the bottom of the Napostá Grande creek, based on the captures sediments.

Sedimento en suspensión

Se llevaron a cabo los ensayos de Curvas de Oden para las muestras de sedimento en suspensión obtenidas en el lugar (Fig. 7). Conociendo la curva granulométrica de sedimento transportado en suspensión se obtiene la velocidad de caída ponderada que representa cuan rápido precipita la mezcla en promedio. En las muestras ensayadas se encontraron velocidades de caída ponderadas de 0,00737 cm s⁻¹ y 0,00354 cm s⁻¹ para las muestras 1 y 2, respectivamente. Esta diferencia en la velocidad de caída manifiesta la presencia de partículas de mayor tamaño en la sección central del canal que influyen en el promedio ponderado de cada fracción.

Estimación del transporte por suspensión

El transporte de sedimentos en suspensión fue calculado para la sección en estudio sobre la base a las curvas de perfiles de concentración dadas por la teoría de la difusión (Yalin, 1972) que indica que la concentración de un sedimento en suspensión es:

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{\left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{\kappa} \frac{w}{u_*}}$$

donde C es la concentración, C₀ es la concentración a una profundidad normalizada de 0,05 η es la profundidad normalizada, κ (= 0,4) es la constante de Von Karman, u_{*} es la velocidad de caída de la partícula y u_{*} es la velocidad de fricción o corte. La concentración medida luego en laboratorio resultó ser de 0,23 mg l⁻¹. La velocidad terminal fue calculada

en función de los porcentajes de tamaños presentes en la granulometría y los valores de la velocidad de fricción indicados en la Tabla 1. Con estos valores se pueden dibujar los perfiles de concentración en cada una de verticales en la sección (Fig. 8).

Los valores de concentración fueron multiplicados por las velocidades correspondientes en cada punto, obteniéndose así el flujo de sedimento puntual en cada lugar. Seguidamente se aplicó una grilla sobre la sección para determinar las curvas de igual transporte de sedimento en suspensión (Fig. 9). Se puede apreciar la gran concentración de flujo de

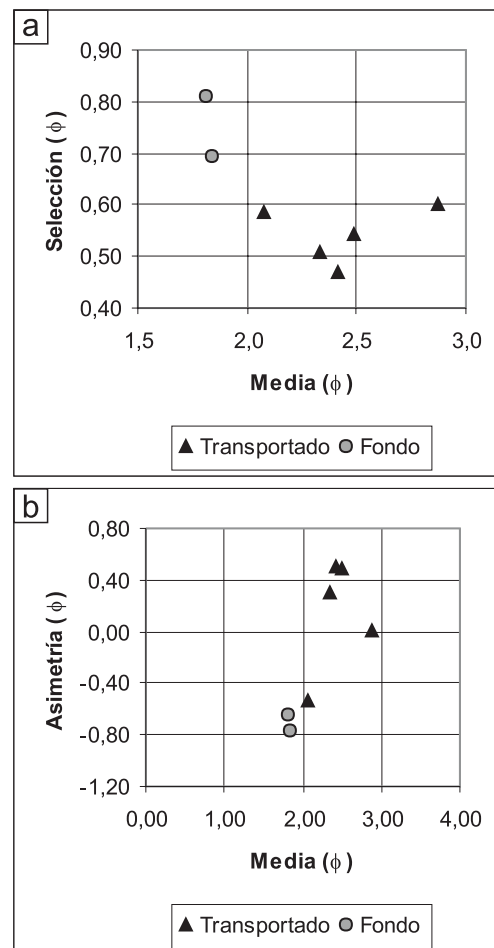


Figura 5. a: Valores de la media vs selección de las curvas granulométricas del sedimento transportado como carga de fondo y el propio del fondo. b: Valores de la media vs asimetría de las curvas granulométricas del sedimento transportado como carga de fondo y el propio del fondo.

Figure 5. a: Mean vs. selection plot of the granulometric curves from the bottom and bedload transported. b: Mean vs. Asymmetry plot of the granulometric curves from the bottom and bedload transported sediments.

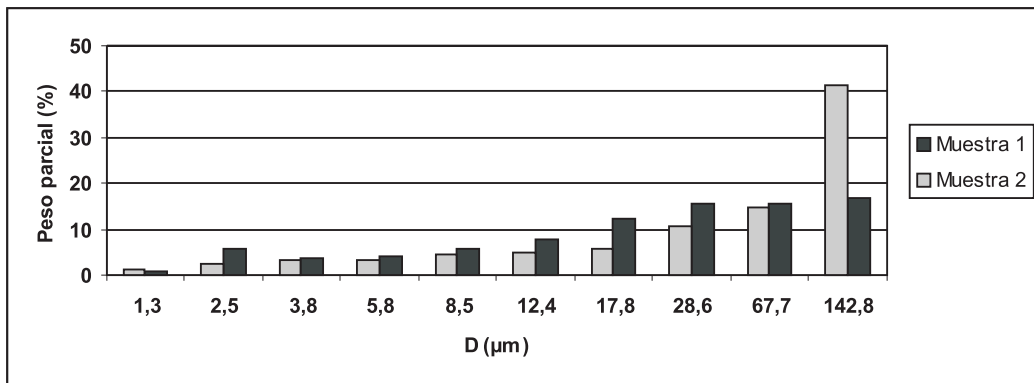


Figura 6. Curvas granulométricas del sedimento en suspensión del Napostá Grande obtenidas por la técnica de Oden.

Figure 6. Naposta Grande creek suspended sediment granulometric curves obtained by Oden's technic.

sedimento en la zona cercana al fondo. El volumen de la superficie representada en la Fig. 9 es el transporte total de sedimento en suspensión que el curso de agua estaba acarreado en aquel momento y su valor es de 539,6 mg s⁻¹.

Formulación del transporte como carga de fondo

Fueron representadas las tasas asociadas a los valores de esfuerzo de corte de fondo en cada faja (Fig. 10). Los mayores valores de esfuerzo de corte se registran en la parte más profunda de la sección, cerca de la orilla izquierda y su tendencia es coincidente con la de las tasas de transporte por carga de fondo. La carga de fondo total medida fue de 1096 mg s⁻¹.

El resultado obtenido en campo fue compara-

Posición desde el borde (cm)	u* (m seg ⁻¹)	τ _b din cm ⁻²
Per 50	0.054	29.36
Per 100	0.058	33.08
Per 150	0.056	31.13
Per 200	0.047	22.33
Per 250	0.047	22.05
Per 300	0.045	19.93
Per 350	0.048	22.68
Per 400	0.049	24.27
Per 450	0.046	21.49

Tabla 3. Valores de velocidad de corte y esfuerzo de corte en el fondo de la sección del Arroyo Napostá Grande.

Table 3. Friction velocity and shear stress values at the bottom of the Napostá Grande creek measuring section.

do con estimaciones realizadas aplicando algunas de las fórmulas de transporte de sedimento de fondo más conocidas. Se utilizaron las fórmula Suiza (Meyer-Peter-Muller, 1948), Bagnold (1966), Einstein (1950) y Yalin (1972) (Tabla 4). La fórmula Suiza puede considerarse como la más antigua de todas, está basada en gran cantidad de experiencias con mezclas de arenas, pero en general con granos de arena grandes (> 2 mm). Bagnold usó principios de la física clásica para desarrollar su fórmula. La estructura de su ecuación se basa en el exceso de energía del flujo por encima de un estado crítico para realizar el trabajo de transportar partículas. Einstein deriva su fórmula de criterios probabilísticos. Se asume que los granos se mueven por medio de saltos intercalados entre períodos de reposo. Para normalizar las irregularidades provenientes de los distintos diámetros de la mezcla de arena concibe una granulometría uniforme que realiza un "salto promedio". Einstein no introdujo el concepto de inicio de movimiento en su fórmula. El planteo realizado por Yalin se basa en valores no fluctuantes de las variables, sin embargo atribuye el inicio de movimiento a la turbulencia. El cálculo de las mismas se llevó a cabo por fajas luego sumando el transporte de cada una de ellas y adoptando el D₅₀ como diámetro representativo para el sedimento del lecho. Para comparar los resultados se calcularon los errores porcentuales del transporte medido con respecto al calculado por distintas formas.

La fórmula de Meyer Peter-Muller fue la que más error arrojó. Los mismos autores reconocen que en ciertos casos se puede esperar errores de hasta 10 o 15 veces en exceso. Esto se debe a que las formulas se basan en experimentos realizados con

Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires

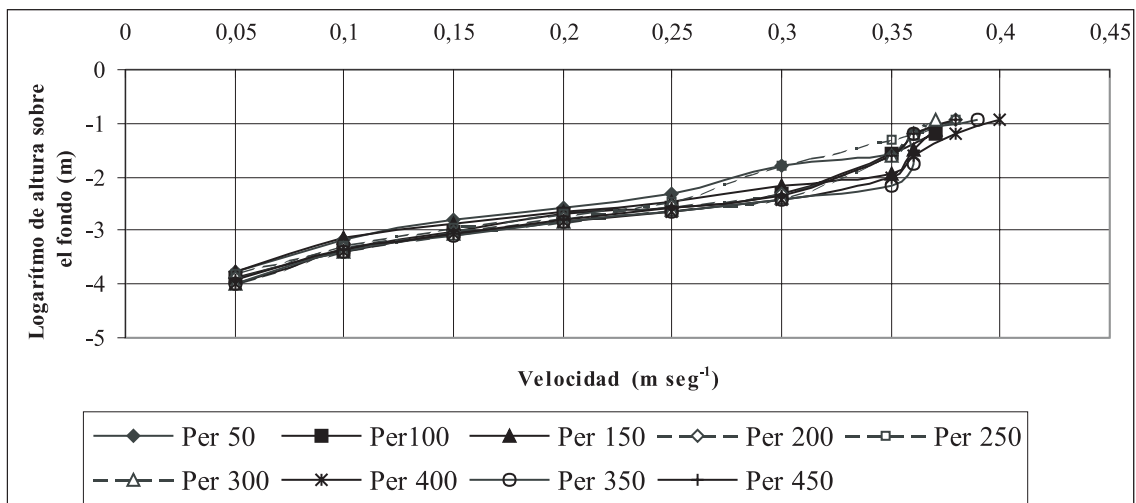


Figura 7. Perfiles de velocidad obtenidos a partir del diagrama de isotacas (Fig. 3) para las distancias a la orilla izquierda indicadas.

Figure 7. Velocity profiles obtained using the equal velocity curves (Fig. 3) at the corresponding distances from the bank.

mezclas de arenas más bien gruesas ($D > 2 \text{ mm}$). Por lo tanto, en el presente caso, esta fórmula no resulta aconsejable para la predicción del transporte como carga de fondo ya que la arena posee fracciones muy finas (especialmente aquella transportada cerca de las orillas y sobre la barra). Las restantes tienen errores muy bajos en comparación con las diferencias que se pueden esperar de esta metodología. La más cercana al valor medido fue la que prevé Einstein que junto a la de Yalin dieron valores menores al transporte real. La expresión de

Bagnold, sin embargo, produjo un valor en exceso, aunque con relativo bajo error. En consecuencia, la formulación que más se acercó a los valores medidos en el Arroyo Napostá Grande es la que propone Einstein aunque por defecto.

CONCLUSIONES

Se presentan aforos líquidos y sólidos totales de una sección del Arroyo Napostá Grande en el

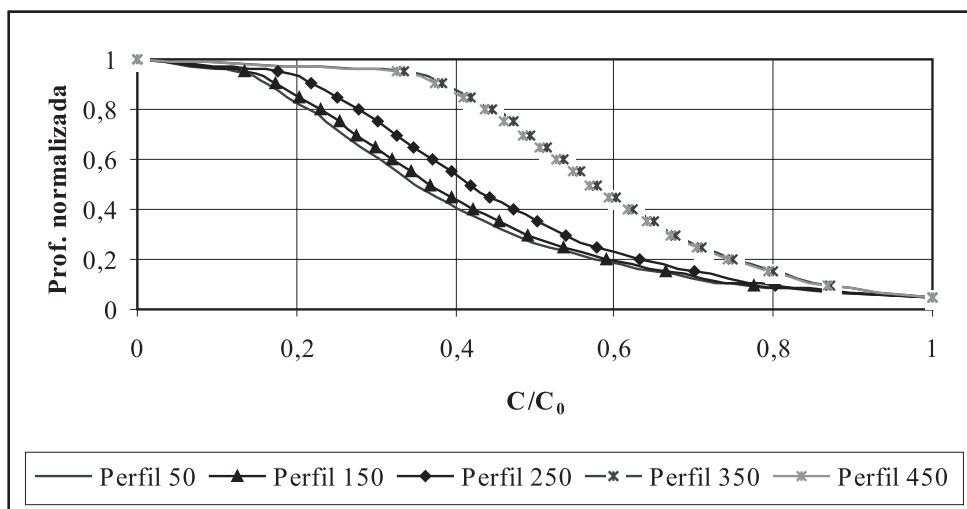


Figura 8. Perfiles de concentración de sedimento en suspensión en cada una de las cinco fajas consideradas en la sección de aforo.

Figure 8. Suspended sediment concentration profiles at each strip considered in the measuring section.

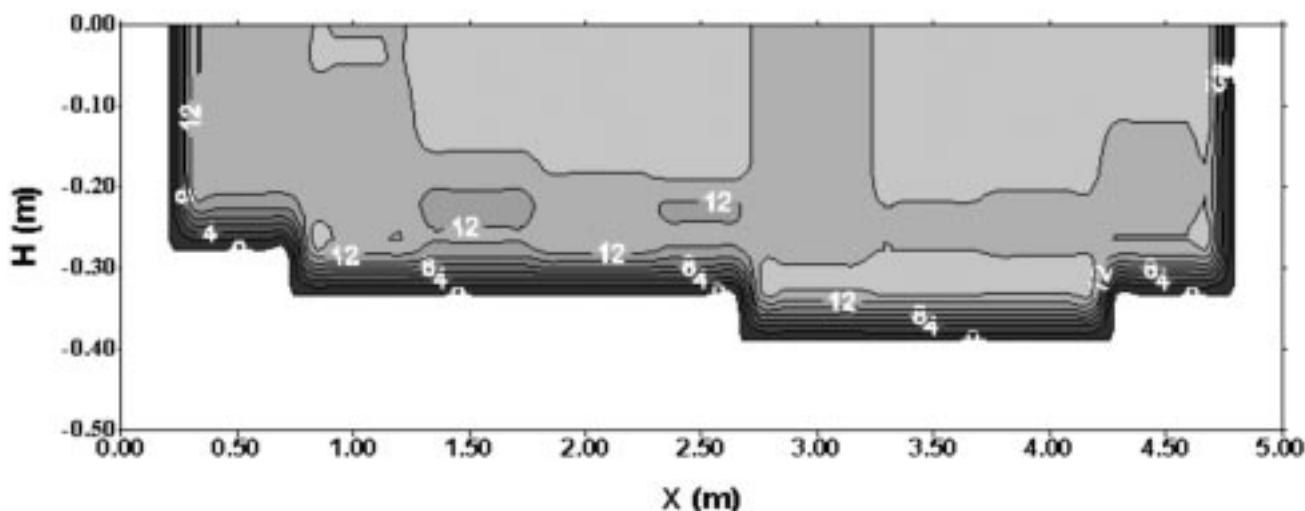


Figura 9. Curvas de igual transporte de sedimento en suspensión para la sección de aforo (Valores en mg dm^{-3}).

Figure 9. Equal suspended sediment transport curves for the measuring section. (Values in mg dm^{-3}).

curso inferior siendo estos completamente inéditos. Se determinaron flujos de la sección y la distribución de los esfuerzos de corte promedio en el fondo producido por el escurrimiento. Estas características se relacionan con las mediciones de sedimento transportado como carga de fondo en distintas fajas de la sección.

Se determinó un transporte diferencial dentro de la misma sección. La faja entre $X=1$ m hasta $X=2$ desde la margen izquierda acarrea mayor cantidad de sedimentos por unidad de ancho que en resto. La obtención de muestras por fajas resulta importante ya que una sola medición no describe

adecuadamente el transporte en la totalidad de la misma, recomendándose entonces esta práctica para la determinación del transporte como carga de fondo. Estos datos medidos permitieron comparar datos reales con distintas fórmulas de transporte por carga de fondo ampliamente conocidas para determinar su error, concluyéndose que la formulación que mejor predijo el valor de transporte de fondo fue la de Einstein, aunque por defecto.

Se determinaron las características del sedimento en suspensión que el arroyo lleva, entre ellas la velocidad de caída promedio de las partículas. Se estimó la distribución de flujos sólidos en la sección transporte de sedimento en suspensión por medio de la ecuación de difusión. De esta manera se conoce la totalidad del transporte del Arroyo Napostá Grande que alcanzó a $1635,6 \text{ mg seg}^{-1}$

No obstante el grado de detalle de las observaciones realizadas, las mismas solo representan la

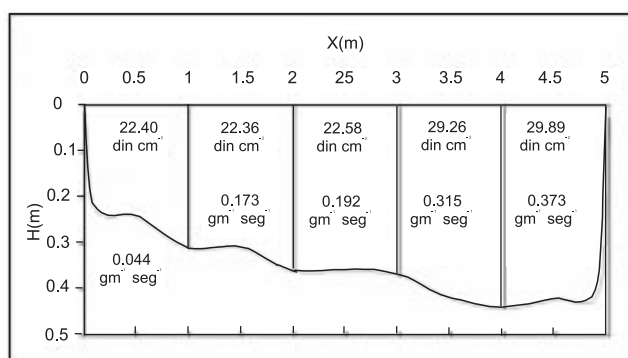


Figura 10. Distribución de transporte de sedimento como carga de fondo en la sección de aforo con los correspondientes valores representativos de esfuerzo de corte medio en cada faja.

Figure 10. Bedload distribution within the measuring section with the corresponding shear stress at each strip considered.

Fórmula	Transporte total (g seg^{-1})	Error (%)
M-P-M	248	126.20
Bagnold	129	17.32
Einstein	95	-13.63
Yalin	93	-15.54

Tabla 4. Comparación de los valores de transporte como carga de fondo calculados con los datos medidos en el Napostá Grande.

Table 4. Comparison between the measured Bedload values and those calculated.

Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires

situación durante un período de descarga de caudal alrededor de la mitad del módulo del arroyo. Evidentemente, este es solo el primer paso para poder definir la relación caudal sólido vs. caudal líquido en este curso de agua de significativa importancia para la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. *US Geological Survey Prof. Paper* 422-I, 37 pp.
- Coles, D., 1956. The law of the wake in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* 1(3): 191-226.
- Einstein, H.A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. *US Dept. Agric. Soil Conserv. Serv.* TB 1026, 70 pp.
- García, J. y O. M. E. de García, 1964. Hidrogeología de la Región de Bahía Blanca. *Dirección Nacional de Geología y Minería*, Boletín No. 96, Buenos Aires.
- Krumbein, W. C. y F. J. Pettijohn, 1938. Manual of Sedimentary Petrography. *Appleton-Century-Croft*, New York 549 pp.
- Ludwick, J.C., 1989. Bed load Transport of Sand Mixtures in Estuaries: A Review. *Journal of Geophysical Research* 94(C10): 14315 -14326.
- Meyer-Peter, E. y R. Müller, 1948. Formulas for bed-load transport. Proc. 2 *Congreso IAHR*, Estocolmo, 39-64.
- Pérez, D.E., G.M.E. Perillo y D. Cuadrado, 1997. Theoretical approach to the Oden's Curve. *Geoacta* 24: 87-103.
- Perillo, G.M.E., E.A. Gomez, S. Aliotta y D.E. Galindez, 1985.

- GRANUS: un programa FORTRAN para el análisis y graficado de muestras de sedimentos inconsolidados. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología* 16: 14-15 .
- Piccolo, M.C. y G.M.E. Perillo, 1990. Physical characteristics of the Bahía Blanca estuary (Argentina). *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 31: 303-317.
- Yalin, M. S., 1972. *Mechanics of the Sediment Transport*. Pergamon Press, New York.

Daniel Enrique PÉREZ
Departamento de Ingeniería
Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253
8000 Bahía Blanca
Argentina
E-mail: deperez@criba.edu.ar

Gerardo Miguel Eduardo PERILLO
Instituto Argentino de Oceanografía
CC 804
8000 Bahía Blanca
Argentina
E-mail: perillo@criba.edu.ar

Recibido: 2 de octubre de 2001.
Aceptado: 4 de diciembre de 2002.