

APORTE AL ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN TRAMO DEL RIO SALADO (SANTA FE, ARGENTINA)

Ricardo Szupiany¹; Alfredo Trento²

Resumen - Se analiza el transporte de sedimentos de fondo en un tramo de 156 km del río Salado ubicado en la provincia de Santa Fe, Argentina; para ello se realizaron distintas campañas durante los años 2000 y 2001 donde se recolectaron muestras de sedimentos de fondo y se relevó el perfil batimétrico longitudinal en detalle de un subtramo de 7 km.

Se calcula el transporte de fondo de los sedimentos (*gsf*) mediante la aplicación de cuatro fórmulas. Con el objetivo de determinar la validez de los resultados se procede a la determinación de las formas de fondo, sus dimensiones, geometrías y velocidad de desplazamiento, midiéndose indirectamente la carga de fondo.

A través de las mediciones indirectas se calculó en *gsf* en dos subtramos con características de fondo distintas (en cuanto a las geometrías de las dunas y velocidad de desplazamiento) obteniéndose resultados similares.

Abstract - The bed sediment transport is analysed in a 156-km length stretch of Salado river, sited in Santa Fe (Argentina); for this work bed sediment samples were collected and the longitudinal bed profile was measured in detail in a 7-km length, during 2000 and 2001.

Four equations were used to calculate the bed sediment transport (*gsf*) and compared with indirect results obtained with the analysis of the bed river forms (dimensions, geometry and displacement velocity).

The indirect measure of *gsf* was calculated in two stretch with different characteristics (different dunes geometry and displacement velocity) and similar results were obtained.

Palabra-Clave – sedimentos de fondo, dunas, transporte.

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217,3000 Santa Fe (Argentina), 54-342-4 575 232, 54-342-4 575 224, e-mail: rszupian@fich1.unl.edu.ar

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217,3000 Santa Fe (Argentina), 54-342-4 575 232, 54-342-4 575 224, e-mail: atrento@fich.unl.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características del sedimento y la cantidad del mismo que puede transportar el río es de suma importancia para el estudio de otros fenómenos de interés para la zona como por ejemplo la erosión general en emplazamiento de puentes y la relación que existe entre el transporte de sedimentos con el transporte de metales pesados detectados en el mismo tramo (Gallo et al, 2001).

El Río Salado, también llamado Pasaje o Juramento, tiene sus nacientes en las provincias de Salta y Catamarca (Argentina) y discurre a lo largo de 1500 km hasta las cercanías de la ciudad de Santo Tomé (provincia de Santa Fe), lugar en donde sus aguas junto con las del río Santa Fe, dan origen al río Coronda. La cuenca del río Salado tiene un área de 29700 km² (SRNDS, 1997), mientras que la zona en estudio, perteneciente a la cuenca inferior del río Salado, de 3860 km² (Figura 1) y está emplazada en el centro-oeste de la provincia de Santa Fe (Trento et al, 2000).

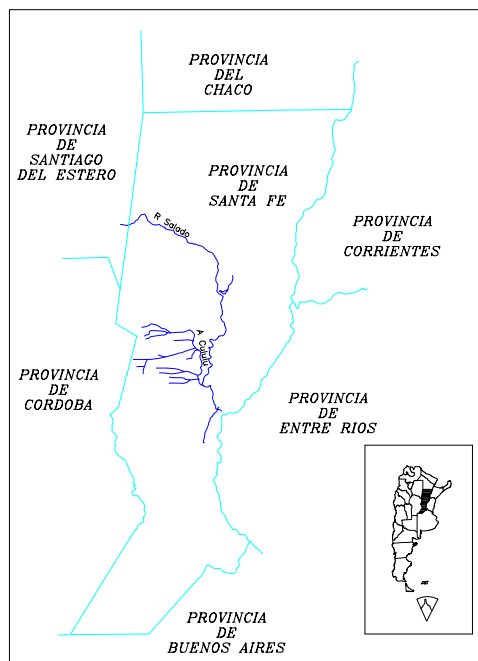


Figura 1 – Croquis de ubicación del río Salado y A. Cululú.

El caudal que transporta está conformado, mayormente, por aportes del centro y norte de la provincia de Santa Fe (Soldano, 1947). Los aportes más significativos que recibe de la región central provienen de la subcuenca del arroyo Cululú, y de la región norte del río Calchaquí. El caudal medio anual del río Salado es de 135 m³/s (SRNDS, 1997), si bien presenta un amplio rango de variación. El caudal mínimo registrado fue de 5,5 m³/s (noviembre de 1999) y el máximo de 2596 m³/s (junio de 1973).

El área en estudio dentro de la cuenca del río Salado se caracteriza por poseer un amplio valle de inundación con albardones, meandros abandonados y un cauce tortuoso desarrollado predominantemente sobre sedimentos arcilloso-arenosos. Presenta elevada sinuosidad, con un valor medio de 1,96, aunque en algunos tramos ha alcanzado valores extremos de 2,30. Con estos resultados, y de acuerdo a la clasificación de Schumm (1987) y Rice (1983) el río Salado es un cauce de tipo meandriforme. En el tramo en estudio, adopta una clara dirección N-S (Figura 1).

El río Salado presenta variaciones de profundidad muy importantes. En estudios anteriores se relevó el tramo de 156 km durante dos periodos, unas de aguas bajas y otro de aguas medias. En aguas bajas el río Salado presenta una profundidad media de 6.80 metros, mientras que las profundidades máximas medias están en el orden de los 7.75 metros y las mínimas medias en 1.89 metros. Cabe destacar la cantidad importante de bancos de arena que se pueden apreciar en toda la longitud del río durante aguas bajas (Figura 2), siendo estas claras evidencias del importante transporte de sedimentos que se produce.



Figura 2 – Río Salado, RP 80 (11/99).

OBJETIVO

Calcular el transporte de fondo de los sedimentos (*gsf*) para el estado hidrométrico de aguas medias, en base a exhaustivas mediciones de formas de fondo y toma de muestras, el empleo de diferentes fórmulas de transporte (Van Rijn, Du Boys, Meyer-Peter y Müller y Engelund-Fredsøe) y su contraste con resultados de mediciones indirectas en campo.

Determinar las formas de fondo existentes, sus dimensiones, geometrías y desplazamientos.

METODOLOGIA

Durante los años 2000 y 2001 se tomaron muestras de sedimentos suspendidos y de fondo en un tramo de 156 km del curso principal del río Salado, comprendido entre las secciones transversales de la ruta provincial (RP) 62 y la RP 70. Se realizaron dos relevamientos batimétricos de detalle en un subtramo de 7 km de largo con sonda ecográfica, determinándose en 14 secciones transversales su geometría y la línea del thalweg a fin de evaluar las formas de fondo y el transporte de fondo experimentalmente y cotejarlo con los resultados de las fórmulas empíricas.

Las muestras se recolectaron en ocho secciones: cuatro correspondientes a puentes y cuatro intermedias desde el bote de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH). Para el caso de los sedimentos en suspensión se utilizó una botella horizontal del tipo Wildco y para los sedimentos de fondo una draga de mano Tipo Tamura y conos de arrastre.

El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Sedimentología de la FICH, en las de fondo se separaron los sedimentos gruesos mediante el método de tamizado utilizándose los tamices 4(4.7mm), 10(2mm), 18(1mm), 35(0.5mm), 60(0.25mm), 120(0.125mm) y 230(0.062mm). En todas las muestras el material fino representó valores menores al 5 % del peso total. En las muestras de sedimento en suspensión se determinaron las concentraciones a través del método de evaporación y en algunos casos se separaron los finos y los gruesos por tamizado con el fin de establecer el porcentaje correspondiente a la carga de lavado (material fino), las características sedimentológicas del material en suspensión no se describirán pues excede los alcances de este trabajo.

Las fórmulas de transporte que se aplicaron corresponden a aquellas que tienen un enfoque teórico correspondiente a la tensión de corte efectiva en la cual se la describe a continuación:

- *Fórmula de Du Boys:*

$$gsf = \Psi_d \tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \quad \text{donde } \Psi_d = f(d_s) \quad (1)$$

Esta fórmula presenta un modelo del movimiento del sedimentos en capas que no coincide con lo observado experimentalmente en donde solo se mueve las capas de sedimentos superiores. Sin embargo es una fórmula muy simple y muchas veces se ajusta bien a datos de campo y laboratorio.

- *Fórmula de Meller – Peter y Müller:*

$$\phi = \frac{gsf}{\gamma_s} \sqrt{\frac{1}{(s-1)gd_s^3}} \quad (2)$$

$$\phi = 8(\tau_*' - 0.047)^{3/2} \quad (3)$$

Esta fórmula presenta la ventaja que esta basada en una gran serie de mediciones experimentales englobadas en una serie de datos dentro de la cual se encuentran las variables de nuestro río. Sin embargo consideran una sola variable adimensional del fenómeno bifásico (τ_*'), dejando de lado las variables: R_{e*} ; h/d_s y ρ_s/ρ .

- *Fórmula de Engelund – Fredsøe:*

$$\phi = 5p(\sqrt{\tau_*'} - 0.7\sqrt{\tau_{*c}}) \quad (4)$$

$$\phi = \frac{gsf}{\sqrt{(s-1)gd_s^3}} \quad (5)$$

Al igual que la fórmula de M. P. y M. Solo es función de una sola variable adimensional, además se requieren datos de verificación (no utilizados en el desarrollo de las fórmulas) que cubran diversos d_s de sedimentos y tamaños de escurrimientos.

- *Fórmula de Van Rijn (Van Rijn, 1993):*

$$gsf = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} [(s-1)g]^{0.5} d_{50}^{1.5} \quad (6)$$

Esta fórmula tiene en cuenta, a diferencia de las otras, dos de las variables adimensionales del fenómeno bifásico, además, si bien fue calibrada con una importante cantidad de datos su confiabilidad aún no está del todo verificada para diámetros pequeños ($d < 0.5\text{mm}$).

Con el objeto de verificar los resultados de las fórmulas se procedió a medir el transporte de fondo a través de mediciones indirectas, para ello se realizaron dos perfiles longitudinales, una el 02/03/01 y la otra el 02/04/01, es decir, con un mes de diferencia (se prevén en etapas posteriores

realizar otras batimetrías para tener una mayor precisión en los resultados) en los cuales se pudieron identificar la geometría de dunas dominantes y el desplazamiento originado en dicho intervalo de tiempo, pudiendo así aplicar la fórmula indirecta del transporte de fondo:

$$gsf = 0.66(1 - P)HU_d \quad (7)$$

siendo P = porosidad del material del fondo

H = altura de la duna [L]

U_d = velocidad de desplazamiento de la duna. [LT⁻¹]

RESULTADOS

Características de los sedimentos

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico (diámetros y parámetros característicos) se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1 – Diámetros y parámetros característicos de los sedimentos de fondo

<i>Sección N°</i>	<i>d₁₆</i>	<i>d₅₀</i>	<i>d₈₄</i>	<i>ã</i>	<i>Desvío</i>
1	0.280	0.355	0.500	0.37	1.33
2	0.195	0.305	0.430	0.30	1.48
3	0.170	0.245	0.410	0.26	1.55
4	0.140	0.180	0.240	0.18	1.31
5	0.182	0.290	0.425	0.28	2.34
6	0.150	0.190	0.280	0.21	1.87
7	0.263	0.380	0.600	0.39	1.51

La ubicación de las secciones correspondiente son:

- 1 – Aguas debajo de RP N°6.
- 2 – Agua arriba del Arroyo Cululú.
- 3 – Aguas abajo del arroyo Cululú.
- 4 – Ruta Provincial (RP) N° 6
- 5 – RP N° 80
- 6 – RP N° 62
- 7 – Pozo de una curva, aguas debajo de RP N°6.

Con el fin de determinar la existencia de variaciones importantes en la granulometría del sedimento de fondo se contrastaron las curvas granulométricas de las distintas secciones (Figura 3).

En la misma se muestra que no existen cambios significativos en la uniformidad de las muestras ni en el tamaño del sedimento donde el d_{50} varía entre 0.19mm y 0.38mm. Según la clasificación de Wentworth el \tilde{d} corresponde a arena fina mientras que los demás diámetros presentes en la muestra corresponden a arena gruesa y media.

El desvío (σ), que da una idea de la uniformidad, toma valores menores que 2 en todos los casos, por lo que se trata de muestras con una distribución de sedimentos uniforme.

Según se observa en el Figura 3 y en función de lo dicho anteriormente podemos decir que las características granulométricas del material de fondo del río Salado no presenta variaciones espaciales importantes en el tramo estudiado de aproximadamente 150 km.

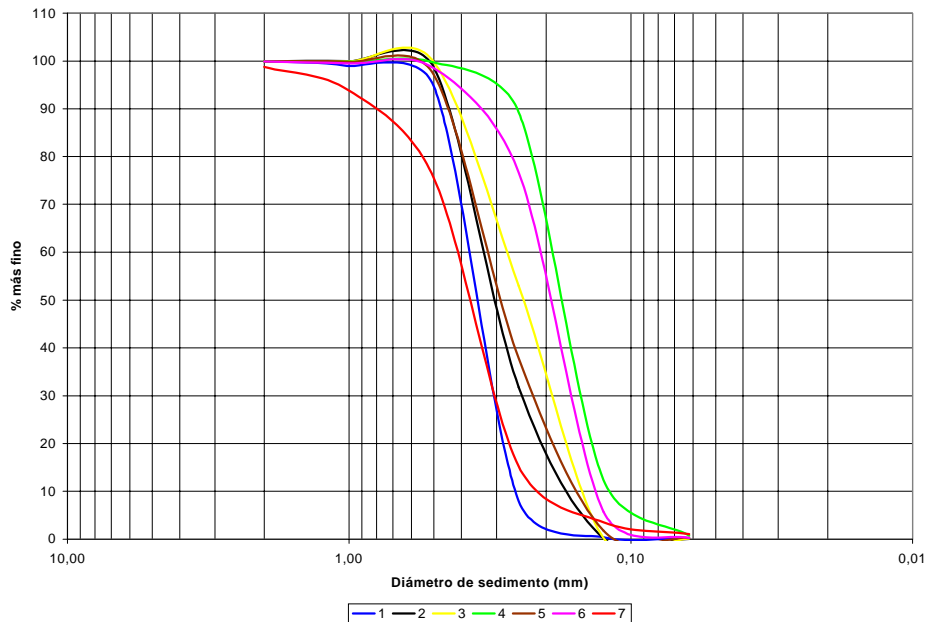


Figura 3 – Curvas granulométricas.

Cálculo del transporte.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de las fórmulas de transporte de fondo.

Tabla 2 – Resultados de fórmulas de transporte

Fórmulas	gsf (kg / m seg.)
Du Boys	0.592
Meyer-Peter y Müller	0.006
Engelund-Fredsoe	0.011
Van Rijn	0.004

Los resultados de las fórmulas presentan valores muy dispersos entre sí justificándose el cálculo del transporte de fondo, gsf , a través de mediciones de campo para determinar su magnitud.

En las fajas batimétricas se graficaron los perfiles longitudinales del tramo estudiado (de 7 km de longitud), se pueden diferenciar dos subtramos (Figuras 4 y 5). En ellos se encontraron dunas con apreciables variaciones en sus geometrías, tanto en su longitud (λ) como en su altura (H) (Tabla 3), cuyo valor medio H es de 0.65 m (subtramo 1) y de 0.95 m (subtramo 2) y su longitud presenta valores medios de 26 m (subtramo 1) y de 35.4 m (subtramo 2).

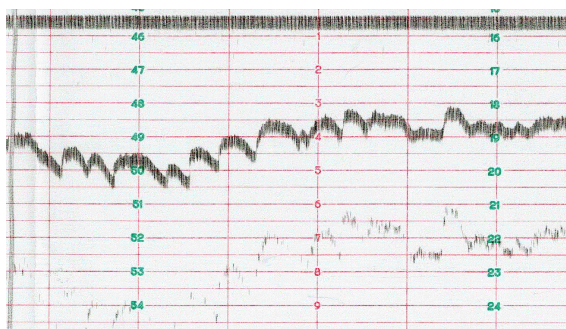


Figura 4 – Subtramo 1.

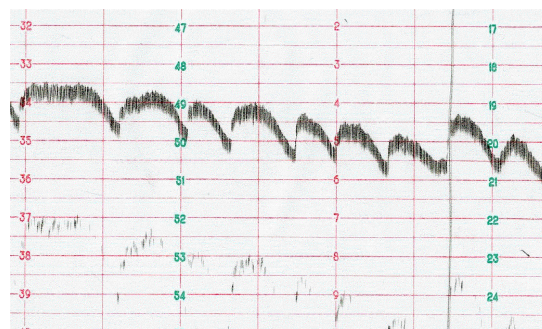


Figura 5 – Subtramo 2.

Tabla 3 – Geometría de distintas dunas

Subtramo 1		Subtramo 2	
H (m)	λ (m)	H (m)	λ (m)
0.7	19.3	0.9	33.2
0.6	26.0	1.0	33.0
0.6	21.0	0.95	40.0
0.65	28.0	0.9	41.0
0.7	30.0	0.95	29.9
0.6	33.8		
0.7	30.7		
0.65	26.0		

En la Tabla 4 se presentan dichas variaciones como así también el transporte de sedimento calculado por el método indirecto explicado anteriormente.

Tabla 4 – Características de las dunas y cálculo del transporte

<i>Tramo N°</i>	<i>T (días)</i>	<i>D (m)</i>	<i>U_d (m/s)</i>	<i>H (m)</i>	<i>P (%)</i>	<i>gsf (kg / m seg.)</i>
1	32	35.1	1.268×10^{-5}	0.65	40	0.0087
2	32	22.3	0.806×10^{-5}	0.95	40	0.0080

Donde:

T = tiempo entre mediciones

D = desplazamiento observado

U_d = velocidad de desplazamiento

H = altura de la duna

P = porosidad

Como se puede observar en las Tablas 3 y 4, las dunas y sus velocidades de desplazamiento (*U_d*) presentan marcadas diferencias en cada subtramo, variando *U_d* entre 1.268×10^{-5} m/s a 0.806×10^{-5} m/s.

Con respecto al transporte de sedimentos no se presentan variaciones importantes, esto es una medida de la confiabilidad de los resultados ya que en dos tramos con característica de fondo distintas se produce el mismo transporte de sedimentos.

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos por las fórmulas, se contrastaron estos con el valor del transporte de fondo obtenido a través del desplazamiento de dunas, obteniendo posteriormente el error relativo, cabe aclarar que los resultados obtenidos con la fórmula de Du Boys fueron desechados por estar fuera de rango, los otros resultados se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5 – Cálculo del error relativo

	<i>gsf_{medio} = 0.0083 kg / m seg.</i>
Fórmula	Error (%)
Meyer-Peter y Müller	27
Engelund-Fredsoe	37
Van Rijn	55

Como se puede ver existe una gran dispersión entre el valor medido y el calculado por fórmulas siendo la que menor error presenta la fórmula de Meyer-Peter y Müller.

CONCLUSION

La aplicación de fórmulas de transporte de fondo de los sedimentos se debe realizar con sumo cuidado pues cada una de estas presentan variaciones importantes. Se destaca la conveniencia de calcular *gsf* a través de mediciones indirectas en campo pues, como se demostró en este trabajo, es una herramienta fundamental para la determinación de la confiabilidad de las fórmulas y su posterior calibración.

A través del cálculo de *gsf* por el método indirecto y con un ancho de fondo medio de 70 m el río Salado presenta un transporte de fondo de 18.432,8 toneladas / año, siendo esta la primera aproximación del transporte de fondo realizado en dicho río.

En el futuro inmediato se realizarán mediciones complementarias a fin de verificar los resultados preliminares obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue subsidiado en el marco del Proyecto CAI+D '96 "Modelación Matemática del Transporte de Poluentes en Cursos de Agua de la Cuenca Inferior del Río Salado", de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

BIBLIOGRAFIA

- GALLO, M., BELDOMENICO, H., TRENTO, A., *Aporte al estudio de la presencia de metales pesados en aguas en el tramo del río Salado*, ABRH, 2001.
- RICE, R.J., *Fundamentos de geomorfología*, Edit. Paraninfo S.A, 1983.
- SCHUMM, S.A. MOSLEY, M.P. and WEAVER, W.E., *Experimental fluvial geomorphology*, J. Wiley and Sons, 1987.
- SECRETARÍA DE RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO SUSTENTABLE (SRNDS), *Estadística hidrológica 1994*, tomo I, 1994, pp. 121-123.
- SOLDANO, F.A., *Régimen y Aprovechamiento de la Red Fluvial Argentina: el río Paraná y sus tributarios*, Edit. Cimera, Bs. As, Argentina, 1947.
- TRENTO, A., ALVAREZ A.M. y ROJAS, S., *Modelo unidireccional para estudio de calidad de aguas*, Tesis de Maestría, Fac. de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL, Santa Fe, Argentina, 1998.

VAN RIJN, L.C., *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal seas*. Aqua Publications. Amsterdam, Holanda, 1993.