

# Desarrollo y aplicación de un modelo para evaluar la resistencia al flujo en grandes ríos aluviales de llanura

BASILE, Pedro A.<sup>(1),(2)</sup>, RICCARDI, Gerardo A.<sup>(1),(2),(3)</sup>  
 (1)DH-EIC, FCEIA-UNR; (2)CURIHAM, FCEIA-UNR; (3)CIUNR  
 Riobamba 245 bis, Rosario, Argentina. E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

En el lecho de arena de los grandes ríos aluviales de llanura con flujo subcrítico (Número de Froude,  $F < 1$ ) se forman dunas, razón por la cual, la resistencia al flujo se compone por la resistencia superficial o de grano (asociada a la granulometría del sedimento del lecho) y por la resistencia de forma (vinculada a la altura y longitud de las dunas).

En tales ríos, las variables hidráulicas del flujo hídrico y la composición granulométrica del lecho, determinan los procesos de transporte de sedimentos, que inciden en las dimensiones de las dunas, las cuales configuran la rugosidad del lecho aluvial y, por extensión, influyen en las condiciones de flujo modificando las variables hidráulicas. En la Fig. 1 se esquematiza dicha interacción del flujo con el lecho móvil que lo contiene.

Por tal motivo, en ríos aluviales de lecho móvil (en contraposición con cauces rígidos no aluviales) el coeficiente de rugosidad no puede ser especificado de antemano y debe determinarse conjuntamente con las variables hidráulicas de interés.

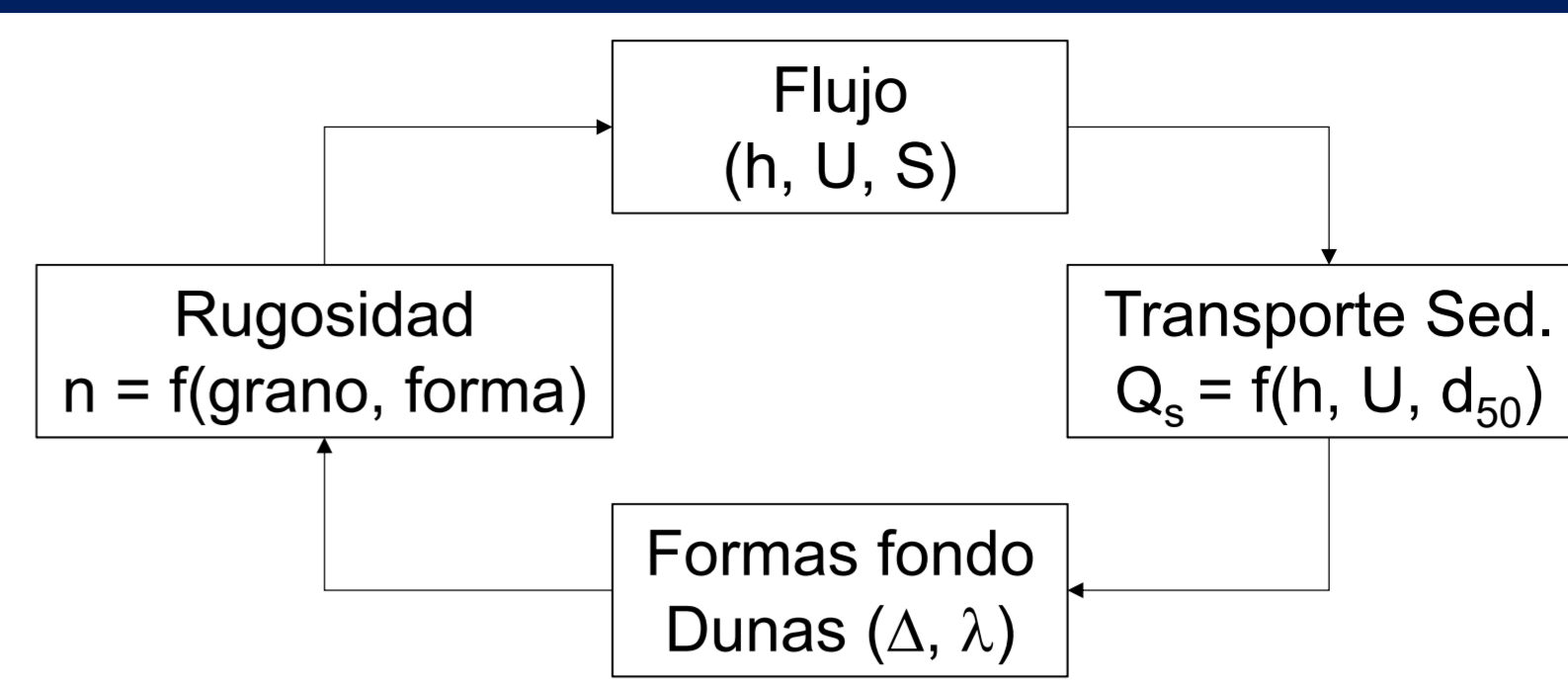


Fig. 1. Interacción flujo – transporte – formas fondo – rugosidad aluvial.

## OBJETIVOS

Desarrollar un modelo de resistencia al flujo apropiado para el río Paraná, aplicable en grandes ríos aluviales de llanura con lechos de arena, flujos subcríticos y formas de fondo tipo dunas; que permita estimar conjuntamente coeficientes de rugosidad y variables hidráulicas; vinculando el flujo, la composición granulométrica del sedimento del lecho y las dimensiones de dunas. Asimismo, a los fines de verificar la validez del modelo, se plantea la aplicación del mismo en diversos ríos aluviales del planeta.

## DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DEL RÍO PARANÁ EN ESTUDIO

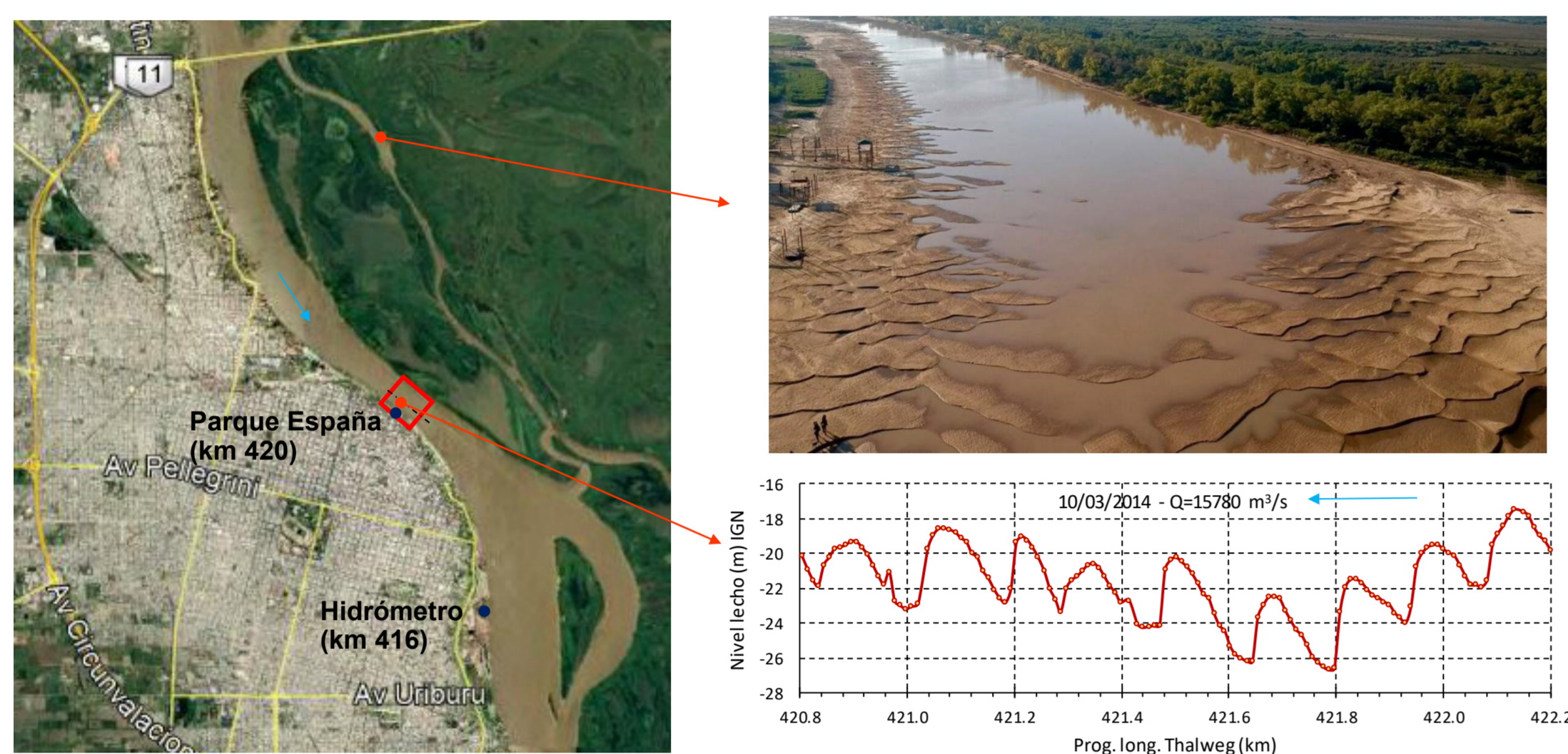


Fig. 2. Río Paraná en Rosario (izq.), riacho Invernada (der., arriba), perfil de dunas (der., abajo).

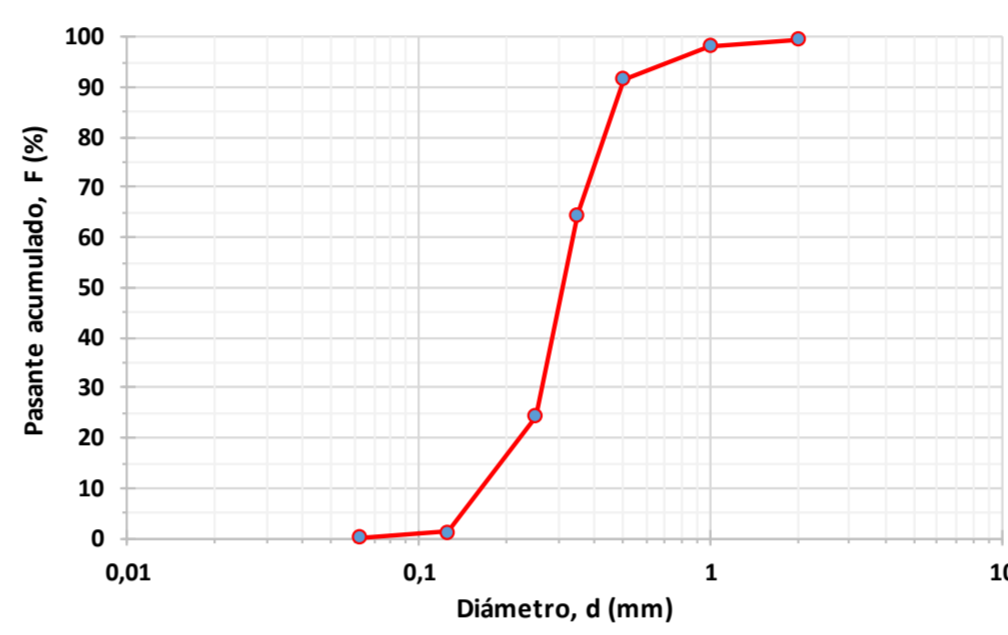


Fig. 3. Composición granulométrica del lecho.

Para el desarrollo del modelo se utilizaron 32 perfiles de dunas relevados en el tramo km 421-422 del río Paraná, ver Fig. 2 (izq.). El tramo presenta cauce único, con ancho de 600 m; su morfología se mantiene en equilibrio dinámico y no es perturbado por dragados. En la Fig. 2 (der., abajo) se presentan uno de los 32 perfiles longitudinales de dunas relevados a lo largo del thalweg del río entre km 420.8 y km 422.2 (Basile y Riccardi, 2022).

A los efectos de visualizar un lecho con dunas, en Fig. 2 (der., arriba) se observa un tramo del riacho Invernada (conocido popularmente como Paraná Viejo) con dunas expuestas durante la bajante 2021. En la Fig. 3 se presenta la composición granulométrica del sedimento del lecho en el tramo en estudio, donde se observa que el  $d_{50} = 0.32$  mm y el  $d_{90} = 0.5$  mm.

## DESARROLLO DEL MODELO

Se determinaron las alturas ( $\Delta$ ) y longitudes medias ( $\lambda$ ) de las 237 dunas contenidas en los 32 perfiles relevados. Con las fechas de cada relevamiento batimétrico, se determinaron los niveles hidrométricos ( $Z_w$ ) y las pendientes hidráulicas ( $S$ ), utilizando los registros de los hidrómetros de Puerto San Martín (km 448) y de Rosario (km 416). Por otra parte, se determinaron los caudales ( $Q$ ) con la relación nivel-caudal en Timbúes (km 452), construida con datos de aforos (SSRH, 1980-2021). En función de las variables hidráulicas registradas, se determinaron los coeficientes de rugosidad de Manning total ( $n$ ) observados y se estimaron los coeficientes ( $n'$ ) para evaluar la resistencia al flujo superficial o de grano. El coeficiente  $n'$  fue determinado mediante:  $n' = (n^2 - n'^2)^{0.5}$ , a partir del coeficiente de rugosidad total observado:  $n = A h^{2/3} S^{1/2} / Q$  y del coeficiente de rugosidad superficial estimado:  $n' = (3 d_{90})^{1/6} / 6.7 g^{0.5}$ . El valor de  $n'$  varió entre  $0.023$  s/m<sup>1/3</sup> y  $0.036$  s/m<sup>1/3</sup>.

Los caudales ( $Q$ ) variaron entre  $12600$  m<sup>3</sup>/s y  $24000$  m<sup>3</sup>/s. La profundidad media de flujo ( $h$ ) en la sección transversal media (km 421.5), varió entre  $21.8$  m y  $24.2$  m. La pendiente hidráulica ( $S$ ) varió entre  $2.1 \times 10^{-5}$  y  $3.5 \times 10^{-5}$ . Considerando las dunas medias, la relación altura/longitud ( $\Delta/\lambda$ ) disminuye con el aumento del caudal (Fig. 4).

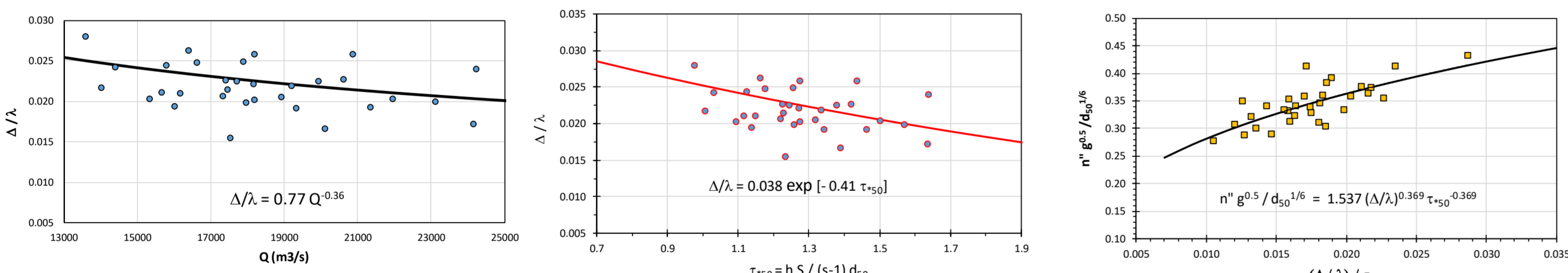


Fig. 4.  $\Delta/\lambda$  de dunas medias en función de  $Q$ .

Fig. 5.  $\Delta/\lambda$  de dunas medias en función de  $\tau_{*50}$ .

Fig. 6. Coef. rugos. Manning  $n' = f(\Delta/\lambda, \tau_{*50}, d_{50})$ .

Sucesivamente, a partir de las características de las dunas medias, la granulometría del lecho y las variables hidráulicas en la sección del km 421.5; se determinó una expresión que brinda la relación  $\Delta/\lambda$  en función la tensión de corte adimensional total  $\tau_{*50}$  (Fig. 5). Además, en la Fig. 6 se presenta la expresión del coeficiente de rugosidad de Manning, asociado a la resistencia al flujo por formas de fondo:  $n' = f(\Delta/\lambda, \tau_{*50}, d_{50})$ .

## APLICACIÓN DEL MODELO

El modelo fue aplicado en 7 ríos de 4 continentes del planeta, específicamente en los ríos Congo (África), Jamuna (Asia), Mekong (Asia), Paraná (América del Sur), Missouri (América del Norte), Bergsche Maas (Europa) y Meuse (Europa), utilizando un total de 153 datos hidráulicos, sedimentológicos y morfológicos (Tabla 1). En la Tabla 2 se presenta el esquema de cálculo secuencial del modelo, para determinar conjuntamente rugosidad y velocidad de flujo, a partir de conocer las variables hidráulicas  $h$  y  $S$  y la granulometría del lecho (caso clásico de cálculo de una relación entre profundidades y caudales).

Tabla 1. Número de datos  $N$  y rango de variación de variables de flujo y sedimentológicas relevantes en los distintos ríos.

| Río           | N  | Q (m <sup>3</sup> /s) | h (m)       | S x 10 <sup>-5</sup> | F           | d <sub>50</sub> (mm) | $\tau_{*50}$ | $\Delta$ (m) | $\lambda$ (m) |
|---------------|----|-----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|--------------|--------------|---------------|
| Congo         | 26 | 13900 - 28500         | 8.3 - 17.6  | 4.2 - 6.3            | 0.05 - 0.15 | 0.345                | 0.70 - 1.86  | 1.2 - 2.9    | 90 - 450      |
| Paraná        | 32 | 12600 - 24000         | 21.8 - 24.2 | 2.1 - 3.5            | 0.07 - 0.11 | 0.320                | 0.98 - 1.64  | 2.6 - 4.3    | 128 - 202     |
| Mekong        | 3  | 14700 - 16900         | 11.5 - 12.6 | 6.6 - 7.2            | 0.12 - 0.13 | 0.250                | 2.00 - 2.10  | 1.9 - 2.0    | 98 - 100      |
| Jamuna        | 17 | 5000 - 10000          | 9.1 - 13.2  | 7.0                  | 0.12 - 0.17 | 0.250                | 1.70 - 2.20  | 0.8 - 3.9    | 29 - 111      |
| Missouri      | 2  | 1400 - 3160           | 4.87 - 6.46 | 16 - 17              | 0.15 - 0.19 | 0.310                | 1.62 - 2.02  | s/d          | s/d           |
| Bergsche Mass | 19 | 2160                  | 5.8 - 8.7   | 12.5                 | 0.14 - 0.20 | 0.21 - 0.48          | 1.29 - 2.99  | 0.6 - 1.9    | 9 - 50        |
| Meuse         | 54 | 1160 - 1750           | 6.7 - 9.25  | 14.1                 | 0.13 - 0.19 | 0.50 - 0.65          | 0.91 - 1.49  | 0.4 - 0.85   | 5.5 - 13.4    |

Tabla 2. Formulación del esquema de cálculo secuencial del modelo.

- Velocidad de corte:  $u_* = \sqrt{g h S}$
- Tensión de corte adimensional:  $\tau_{*50} = \frac{u_*^2}{(s-1)g d_{50}}$
- Relación de dimensiones de dunas (altura / longitud):  

$$\frac{\Delta}{\lambda} = 0.038 \text{ EXP}[-0.41 \tau_{*50}]$$
- Coefficiente rugosidad de Manning (resistencia de forma):  

$$n' = 1.537 \frac{d_{50}^{1/6}}{\sqrt{g}} \tau_{*50}^{-0.369} \left(\frac{\Delta}{\lambda}\right)^{0.369}$$
- Coefficiente rugosidad de Manning (resistencia superficial):  

$$n' = \frac{(3 d_{90})^{1/6}}{6.7 \sqrt{g}}$$
- Coefficiente rugosidad de Manning total (superficial y forma):  

$$n = \sqrt{n'^2 + n''^2}$$
- Velocidad de flujo:  $U = u_* \frac{h^{1/6}}{n \sqrt{g}}$
- Caudal:  $Q = UA$

La predicción de velocidad de flujo que realiza el modelo propuesto es muy satisfactoria. La relación entre velocidad de flujo calculada y observada varió entre 0.8 y 1.2 para el 90.2 % del total de datos utilizados en el estudio (Fig. 7). Dado que el modelo fue desarrollado a partir de las mediciones en el río Paraná, dicha relación entre velocidad de flujo calculada y observada varió entre 0.95 y 1.12 para el 100 % de los datos del río Paraná (32 datos utilizados, indicados en Fig. 7 con triángulos grises).

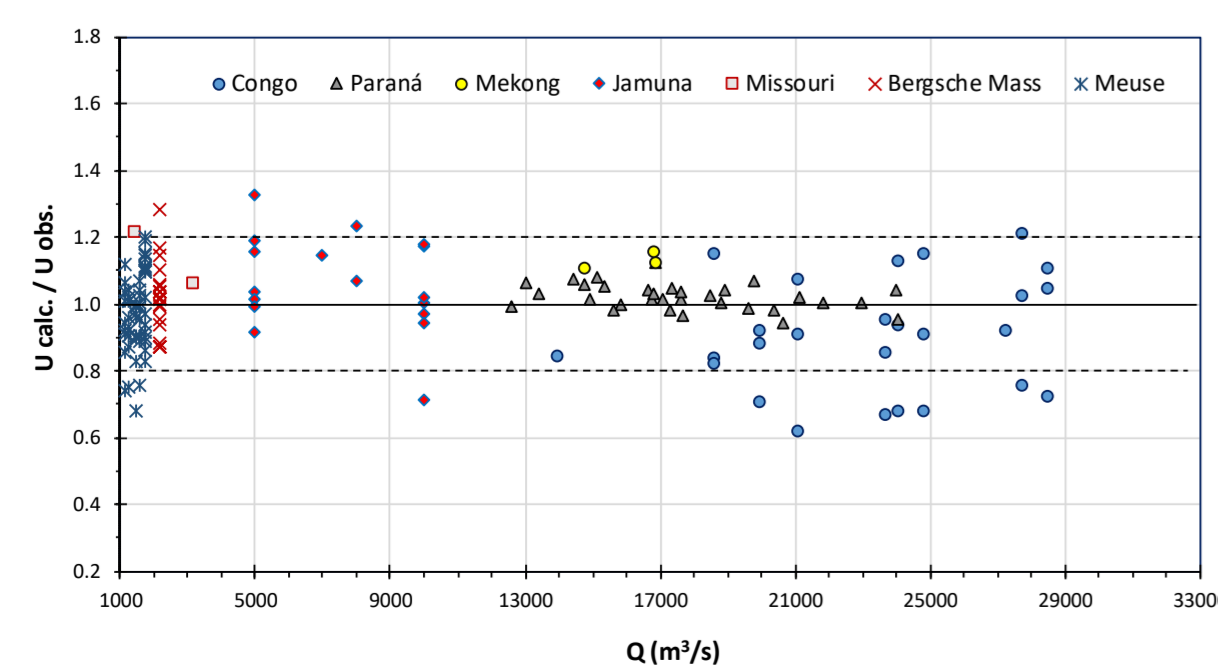


Fig. 7. Relación  $U$  calc. /  $U$  Obs. en función de  $Q$ .

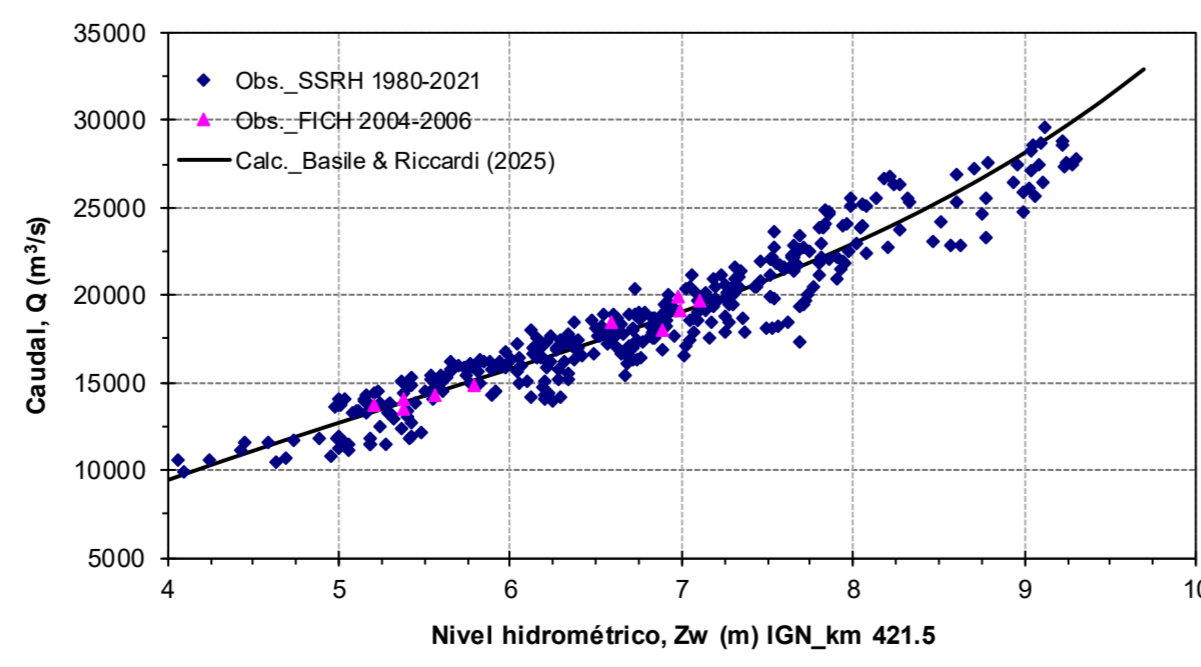


Fig. 8. Comparación  $Z_w$ - $Q$  calc. con datos observados.

Además, el modelo fue aplicado para construir la relación entre el nivel hidrométrico y el caudal ( $Z_w$ - $Q$ ) en el km 421.5 del río Paraná, la cual fue contrastada con los valores de caudales aforados (SSRH 1980-2021 y FICH 2004-2006) y los correspondientes niveles hidrométricos registrados en el Hidrómetro de Rosario.

En la Fig. 8 se observa que la curva  $Z_w$ - $Q$  calculada se ajusta muy bien a los datos registrados, para caudales comprendidos entre  $10000$  m<sup>3</sup>/s y  $30000$  m<sup>3</sup>/s.

## CONCLUSIONES

El modelo desarrollado calcula la rugosidad aluvial total considerando la partición entre rugosidad por formas de fondo y la rugosidad superficial. Los correspondientes coeficientes de rugosidad se relacionan con dimensiones de dunas, variables hidráulicas y diámetros característicos del sedimento del lecho. El modelo permite predecir conjuntamente la rugosidad y la velocidad de flujo en grandes ríos de lecho móvil con dunas. El modelo fue aplicado en diversos ríos del planeta, produciendo resultados muy satisfactorios.