

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN REGIONES SEMIÁRIDAS

Luis G. Castillo E.¹ M^a Dolores Marín Martín¹

Línea prioritaria A. Criterios hidromorfológicos para la recuperación de espacios fluviales degradados

(1) Grupo de I+D+i Hidr@m. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos.
Universidad Politécnica de Cartagena.
Escuela de Ingeniería Civil, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena.
e-mail: luis.castillo@upct.es, mdolores.marin@upct.es

En regiones de morfología abrupta y régimen irregular de precipitaciones, las crecidas suelen presentarse llevando una gran cantidad de transporte de sedimentos. El cambio climático incidirá en que los flujos torrenciales e hiperconcentrados sean cada vez más acusados, lo que obligará a controlarlos para minimizar sus efectos destructivos.

Con el fin de poder diseñar sistemas efectivos de control y captación de flujos en regiones semiáridas será necesario, como primer paso, calcular la capacidad de transporte de sedimentos.

De acuerdo a los análisis presentados para el caso del barranco de las Angustias (Isla de la Palma) y partiendo de la gran similitud con las cuencas semiáridas de la Región de Murcia, uno de los objetivos del trabajo que el grupo Hidr@m está llevando a cabo es aplicar y contrastar dicha metodología, con el fin de establecer criterios generales de cálculo en estas regiones.

Se presentará un avance de los resultados obtenidos en la evaluación del transporte de sedimentos realizado en la Rambla del Mergajón (subcuenca de la Rambla del Albuñón sita en el Campo de Cartagena, Murcia), empleando la metodología antes citada.

La cuenca del Mergajón ha sido seleccionada por la semejanza que presenta con el barranco de las Angustias, tanto en sus características geomorfológicas, hidrológica e hidráulica. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que:

- Las formulaciones que mejores resultado nos ofrecen son las de Einstein-Barbarrosa, 1952, Yang, C. T., 1976 y Yang, S. ($K=6$), 2005.
- Los resultados obtenidos con Smart y Jaeggi (D_{65}), 1983 y Mizuyama y Shimohigashi, 1985, se sitúan por encima del valor medio y dentro de una desviación estándar. Los resultados de Aguirre et al. (D_{50}), 2000, Van Rijn, 1987, Aguirre et al. (D_m), 2000, Ackers White, 1980 y Meyer-Peter y Müller, 1948, caen por debajo de la media y dentro de una desviación estándar.
- El volumen de transporte de sedimentos total que se obtiene en la rambla del Mergajón es inferior que al obtenido en el barranco de las Angustias, siendo el transporte de fondo muy inferior al de fondo en suspensión. También la proporción entre el transporte de fondo y fondo en suspensión resulta invertido en las dos cuencas, debido fundamentalmente a la diferente distribución granulométrica y además, porque los diámetros característicos en la rambla del Mergajón son más pequeños que en el barranco de las Angustias.



Grupo I+D+i en Ing. Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)



EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN REGIONES SEMIÁRIDAS



*Luis G. Castillo Elsitdié
M^a Dolores Marín Martín*

Introducción

Metodología

*Aplicación a cuenca
mediterránea*

*Resultados y
análisis*

Conclusiones

Cambio climático

Efecto directo

Frecuencia e intensidad de
precipitaciones

+

Zonas semiáridas

Cobertura vegetal reducida-
erosionable

Flujos torrenciales con gran transporte de sedimentos cada vez más frecuentes en zonas semiáridas

¿Porqué el control de estos flujos?

Minimizar efectos destructivos

Captar caudales incrementando disponibilidad del recurso

¿cómo captar flujos torrenciales?

~~Sistemas presa embalse~~

Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca
mediterránea

Resultados y
análisis

Conclusiones

Para el diseño sistemas de captación se necesita

Cálculo de la capacidad del transporte de sedimentos en flujos hiperconcentrados

Formulaciones de estimación de
coeficientes de resistencia

Formulaciones para el cálculo
del transporte de sedimentos

Limites de aplicación

Determinación del caudal dominante

**Metodología Barranco de
las Angustias
(Castillo 2000)**

Validez

Zonas semiáridas

FORMULACIÓN COEFICIENTE DE RESISTENCIA

Diversas formulaciones en flujos macrorrugosos basadas en:

$$C^* = \frac{U}{U^*} = \left[\frac{8}{f} \right]^{1/2} = \frac{2.3026}{\kappa} \log \left[a \frac{R}{K_s} \right]$$

- Keulegan (1938)
- Prandtl-Von Kármán

C^* es el coeficiente adimensional de Chézy

U velocidad media del flujo

U^* velocidad asociada al esfuerzo cortante $U^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$

f factor de fricción de Darcy-Weisbach

τ_0 esfuerzo cortante
medio $\tau_0 = \gamma R S_0$

κ constante de Von Kármán en agua limpia ($\cong 0.407$)

a coeficiente de forma (sección transversal del canal)

K_s rugosidad equivalente de los granos de arena de Nikuradse

En ríos rectos y material grueso:

$$C^* = \frac{U}{U^*} = \left[\frac{8}{f} \right]^{1/2} = \frac{2.3026}{\kappa} \log \left[a \frac{R}{K_s} \right] = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_n} \right] + A_n \quad A_n = 5.675 \log \left[\frac{a}{\alpha_n} \right]$$

$$K_s = \alpha_n D_n$$

α_n rugosidad relativa equivalente; D_n = Diámetro nominal



Grupo I+D+i en Ing. Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)



Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca mediterránea

Resultados y análisis

Conclusiones

FORMULACIÓN COEFICIENTE DE RESISTENCIA

Formulaciones utilizadas para el cálculo de la resistencia al flujo en cauces rugosos de pendiente fuerte



Grupo I+D+i en Ing. Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)



Introducción

Aplicación a cuencas

Resultados y

Conclusiones

FOF

Formul

CIA

flujo en

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Limerinos (1970)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{84}} \right] + 3.281; \quad 0.90 \leq R/D_{84} \leq 68.55$ $C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{50}} \right] + 0.990; \quad 1.90 \leq R/D_{50} \leq 177$	$n = \frac{0.1129R^{1/6}}{2 \log(R/D_{84}) + 1.160}$ <p>R= Radio hidráulico total</p>
Bathurst (1985)	$C^* = 5.62 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 4; \quad 0.3 \leq R/D_{84} \leq 50$	<p>0.4% ≤ S₀ ≤ 4%</p> <p>d= calado del flujo</p>
Fuentes y Aguirre (1991)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{d}{D_{50}} \right] + 1.333 + 0.737 \left[1/(d/D_{50}) \right]$ <p>0.3 ≤ d/D₅₀ ≤ 77</p>	<p>0.001% ≤ S₀ ≤ 6.55%</p>
García Flores (1996)	<p>Régimen Supercrítico:</p> $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 3.698; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 1.559; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$ <p>Régimen Subcrítico:</p> $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 2.2794; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 0.2425; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$	$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 1.2849}$ <p>R_b= Radio hidráulico del fondo</p> $n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 0.7919}$
Van Rijn (1987)	$C^* = 5.75 \log(12R_f/3D_{90})$	<p>R_f= radio hidráulico de fondo</p>
Jarret (1984)	$n = 0.39S^{0.38} / (3.28R)^{0.16}; \quad 0.2\% < S < 0.4\%; \quad 0.15m < R < 2.1m$	<p>S= pendiente de fricción;</p> <p>R= radio hidráulico</p>



FORMULACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Investigaciones sin obtener una ecuación satisfactoria:

- ✓ complejidad del problema
- ✓ efecto formas del lecho en el transporte de fondo
- ✓ naturaleza estocástica del problema
- ✓ dificultad de verificar las investigaciones de laboratorio en prototipo

Avances sustanciales, con expresiones que correlacionan:

Parámetro de transporte de sedimentos (ϕ)

$$\phi = \frac{q_s}{D^{3/2} \sqrt{g\Delta}}$$

q_s transporte total de fondo (m^3/sm)

$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho = 1.65$, ρ_s densidad específica del sedimento

D tamaño característico del sedimento (m)

U^* velocidad de corte (m/s)

S_0 pendiente longitudinal del fondo.

F_{rd} Número de Froude Densimétrico

Parámetro de flujo (Ψ)

$$F_{rd}^2 = \frac{1}{\Psi} = \frac{U^{*2}}{\Delta g D}$$

FORMULACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Colby (1984)	$g_{BTmax} = 1.13U^{3.326}; g_{BTmin} = 0.46U^{3.326} \quad 0.1mm \leq D_{50} \leq 1mm$	U =velocidad media del flujo g_{BT} =Transporte unitario total de fondo en peso (kg/ms)
Meyer- Peter y Müller (1948)	$\gamma(K_s / K_r)^{3/2} R_s I = 0.047\gamma'_s D_m + 0.25\gamma'_s \rho^{1/3} (g_{BT} / \gamma_s)^{2/3}; K_r = 26 / D_{90}^{1/6};$ $K_s = \frac{B^{2/3} K_m K_w}{\{K^{3/2} w(B+2d) - K_m\}^{3/2} 2d\}^{2/3}; K_m = 1/n; K_w = 1/n_{pared}$	g_{BT} =Transporte unitario total de fondo en peso (T/ms) B= ancho (m) d= calado (m)
Ackers-White (1990)	$g_{BT} = \gamma_s K D_{35} U \left(\frac{U}{U_*} \right)^n \left(\frac{F_*}{F_{*c}} - 1 \right)^m$ Si: $1 \leq D_* \leq 60; K = \exp\{2.79 \ln(D_*) - 0.426(\ln D_*)^2 - 7.967\}$ $n = 1 - 0.56 \log D_*; F_{*c} = (0.23 / \sqrt{D_*}) + 0.14; m = (6.83 / D_*) + 1.67$ $F_* = (U^n / \sqrt{g\Delta D}) \{U / \sqrt{32 \log(10d/D)}\}^{1-n}; D_* = D_{35} (g\Delta / \nu^2)^{1/3}$	El método se aplica si: $D_* \geq 1$ y $F_* \leq 8$ Si $D_* > 60; n = 0; m = 1.78; F_{*c} = 0.17; K = 0.025;$ $\sigma_g = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}} \right)^{0.5}$ $D = D_{35}$ si $\sigma_g > 3$ $D = D_{60}$ si $\sigma_g \leq 3$
Engelund y Hansen (1967)	$g_{BT} = 0.05 \gamma_s U^2 \tau_*^{3/2} \left(\frac{D_{50}}{g\Delta} \right)^{1/2}$	Siempre que: $Re_* = \frac{U_* D_{50}}{\nu} \geq 12; D_{50} \geq 0.15mm; \sigma_g \leq 2$
Bathurst et al. (1987)	$\phi = (2.5S^{3/2} / [(\Lambda+1)D_{50}(g\Delta D_{50})^{1/2}]) [q - q_c]$ Con $D_{50}: q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{50}^{3/2}} = 0.15S^{-1.12}; D_{16}: q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{16}^{3/2}} = 0.21S^{-1.12}$	Siendo S= pendiente; q= caudal unitario de agua q _c = caudal crítico Δ= peso específico aparente adimensional
Van Rijn (1987)	$\phi = \frac{0.053}{D_*^{0.3}} \left[\frac{F_{rd}^2}{C^* \tau_c^*} - 1 \right]^{2.1}; C^* = 5.75 \log \left[\frac{12R_f}{3D_{90}} \right]; D^* = D \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3}$	F_{rd} = número de Froude Densimétrico de partículas; τ_c^* =esfuerzo cortante crítico adimensional; C^* = coeficiente de Chézy; R_f = radio hidráulico del fondo

Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca mediterránea

Resultados y análisis

Conclusiones

FORMULACIÓN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Yang (1976)	<p>Transporte de arenas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{11.8929 - 0.153 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w) + [1.78 - 0.1563 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w)\}$ <p>Transporte de gravas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{15.3836 - 0.633 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 4.816 \cdot \ln(U_* / w) + [2.784 - 0.1327 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.1228 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w - U_c \cdot S / w)\}$	<p>Si $1.2 < \frac{U_* D}{\nu} < 70$</p> $\frac{U_c}{w} = \frac{2.5}{\log(U_* D / \nu - 0.06)} + 0.66$ <p>Si $70 \leq \frac{U_* D}{\nu}; \frac{U}{w} = 2.05$</p>
Einstein y Barbarosa (1952)	$i_B g_{BT} = \Phi_* i_B \gamma_s (g \Delta D_i^3)^{1/2}; g_{BT} = g_B + g_{BS}$ $i_S g_{BSi} = i_B g_{Bi} \{P_E I_1 + I_2\}; i_{BT} g_{BTi} = i_B g_{Bi} \{1 + P_E I_1 + I_2\}$ $g_{BT} = \sum_{i=1}^n i_{BT} g_{BTi}; \Psi_* = \xi Y (\beta / \beta_x)^2 \Psi'; \xi = f(D/X); Y = f(D_{65} / \delta')$ $X = 0.77 \Delta' \text{ si } \Delta' / \delta' > 1.8; X = 1.39 \delta' \text{ si } \Delta' / \delta' < 1.8; \beta = \log 10.6 = 1.025$ $\beta_x = \log(10.6 X / \Delta'); \Psi' = \Delta(D_i / R'); E = a / d; a = 2D_i; z = w / (K \beta U_*')$ <p>Nota: Integrales se calculan por medio de ábacos. Para una descripción completa ver Simons and Sentürk (1992) y Graf (1984).</p>	$P_E = 2.303 \log\left(\frac{30.2d}{\Delta'}\right)$ $I_1 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z dy$ $I_2 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z \ln(y) dy$ $\Delta' = \frac{K_s}{\chi}; K_s = D_{65}; \chi = f(K_s / \delta'); U' = \sqrt{g R' I}$
Mizuyama y Shimohigashi (1985)	$\phi = 20 \frac{S^2}{\Delta^2} \frac{q}{\sqrt{g \Delta D_{50}^3}}$	<p>S= pendiente; q= caudal unitario de agua; Δ = peso específico aparente adimensional</p>
Aguirre-Pe et al. (2000)	$\phi = \frac{1.5 S^{1/2} F_{rd}^6}{C_*^4}; F_{rd}^2 = U / \sqrt{\Delta g D_m \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)}; C_* = \sqrt{\frac{8}{f_b}}$	<p>F_{rd}=Froude Densimétrico de partículas; S=pendiente; C_*=coeficiente adimensional de Chézy; U=velocidad media de flujo; D_m= diámetro promedio; θ= ángulo inclinación longitudinal de lecho; ϕ=ángulo fricción interna partículas; f_b= factor fricción Darcy-Weisbach para radio hidráulico de fondo.</p>
Yang S. (2005)	$C = \frac{g_t}{Vh} = k \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{\tau_o u_*'^2 - u_{*c}^2}{w}; k = \text{constante universal}=12.5$ <p>$u_*'^2$=velocidad de corte debido a grano; u_{*c}^2=velocidad crítica de Shields</p>	<p>C=concentración sedimento total de fondo; g_t=transporte total de fondo en peso; h=radio hidráulico o calado; V=velocidad media; τ_o=tensión de corte en fondo; d=diámetro sedimento; w=velocidad sedimentación partícula; γ_s=peso específico sedimento; γ=peso específico agua</p>

Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca mediterránea

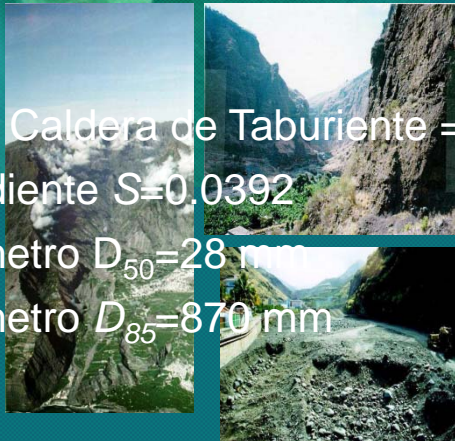
Resultados y análisis

Conclusiones

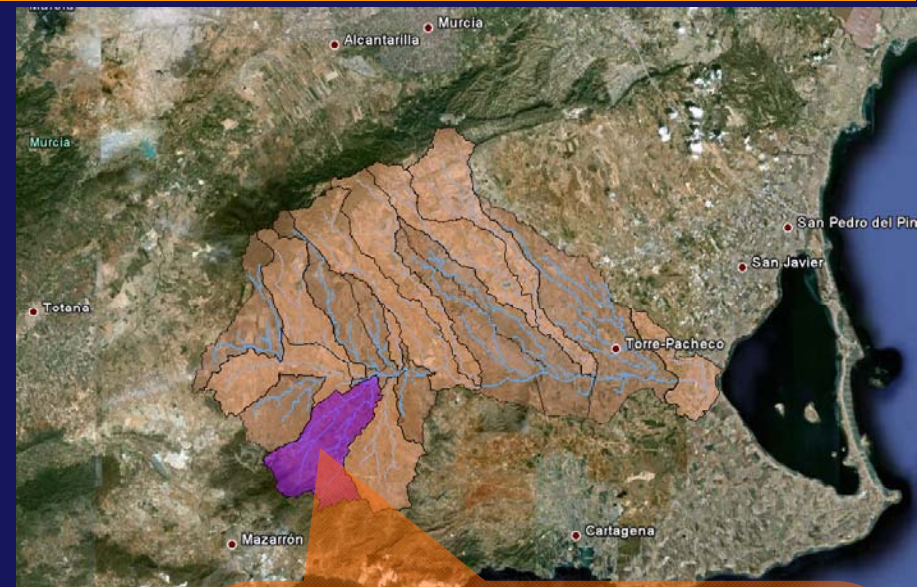
BARRANCO DE LAS ANGUSTIAS



- ✓ Área Caldera de Taburiente =56 km²
- ✓ Pendiente $S=0.0392$
- ✓ Diámetro $D_{50}=28$ mm
- ✓ Diámetro $D_{85}=870$ mm



RAMBLA DEL ALBUJÓN



- ✓ Área R. Mergajón =52 km²
- ✓ Pendiente $S=0.033$
- ✓ Diámetro $D_{50}=3.458$ mm
- ✓ Diámetro $D_{85}=14.710$ mm



Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca
mediterránea

Resultados y
análisis

Conclusiones

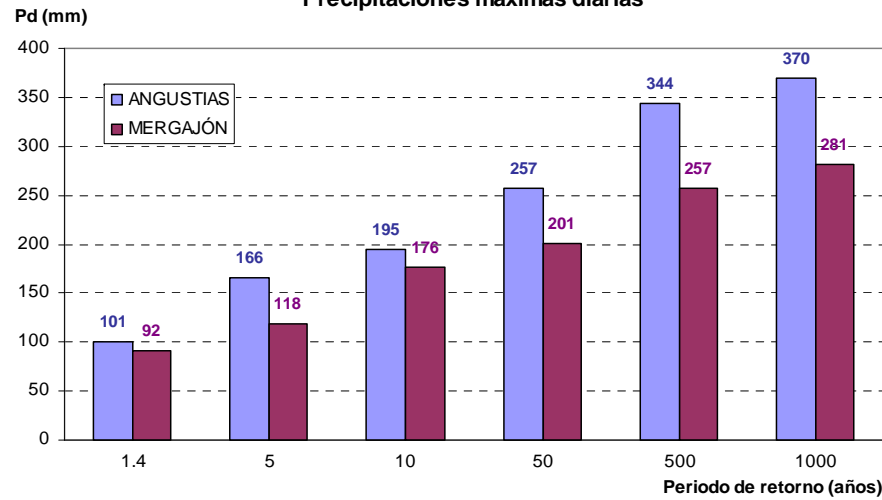
BARRANCO DE L



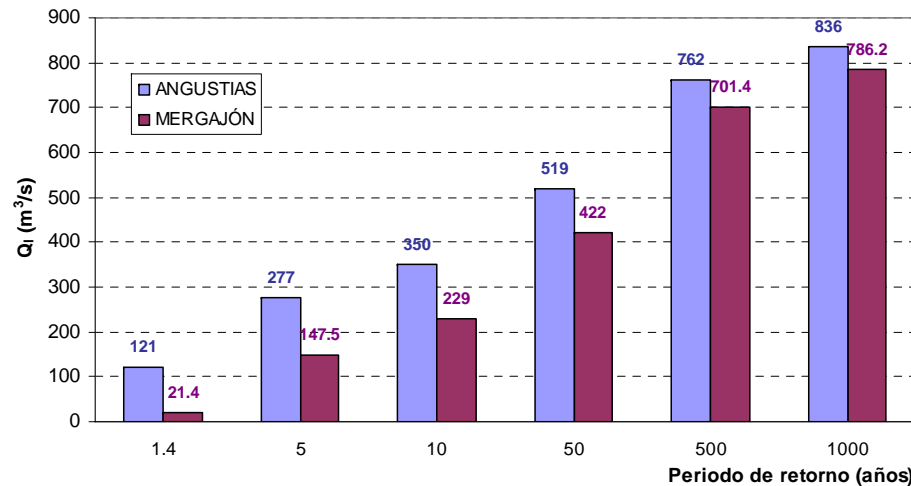
- ✓ Área Caldera
- ✓ Pendiente $S=0.033$
- ✓ Diámetro $D_{50}=3.458$ mm
- ✓ Diámetro $D_{85}=14.710$ mm



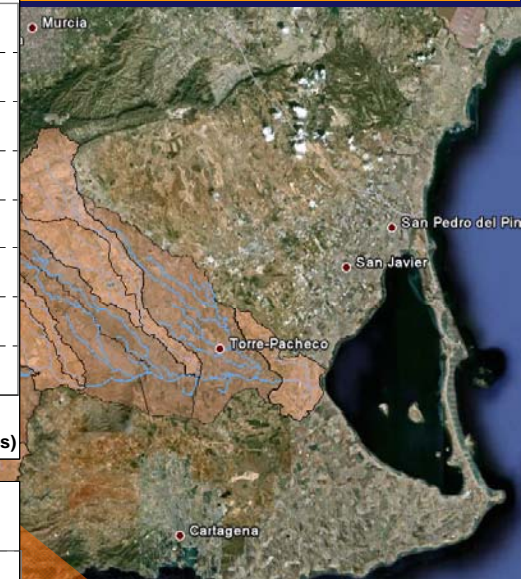
Precipitaciones máximas diarias



Caudales líquidos



EL ALBUJÓN



Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca
mediterránea

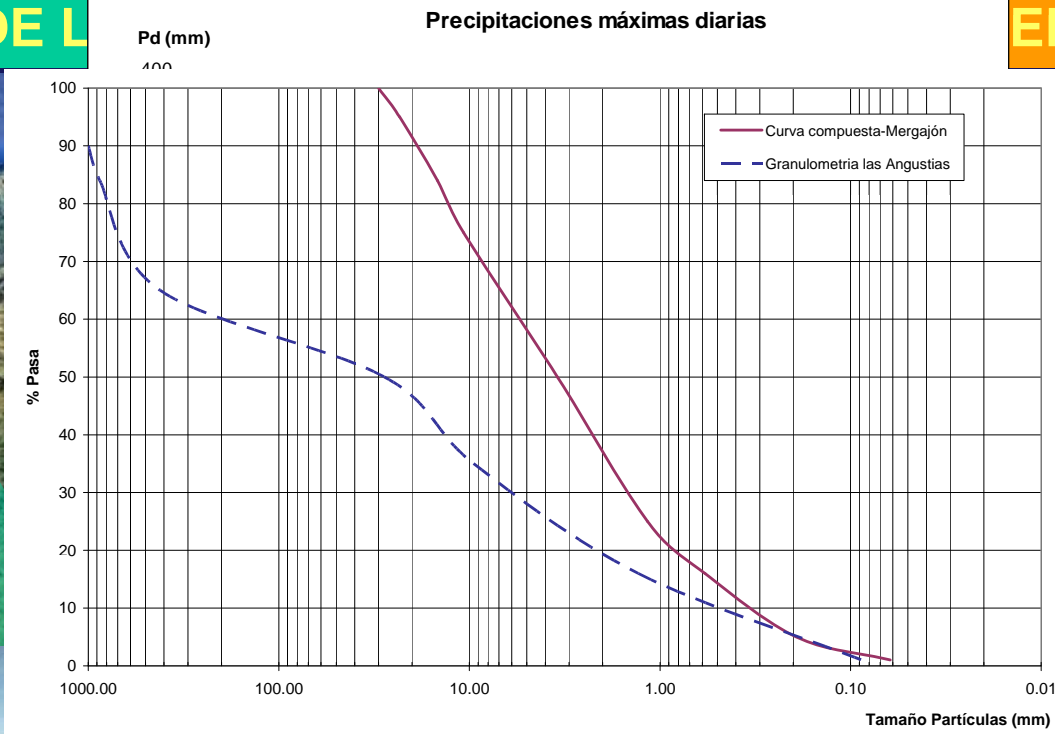
Resultados y
análisis

Conclusiones

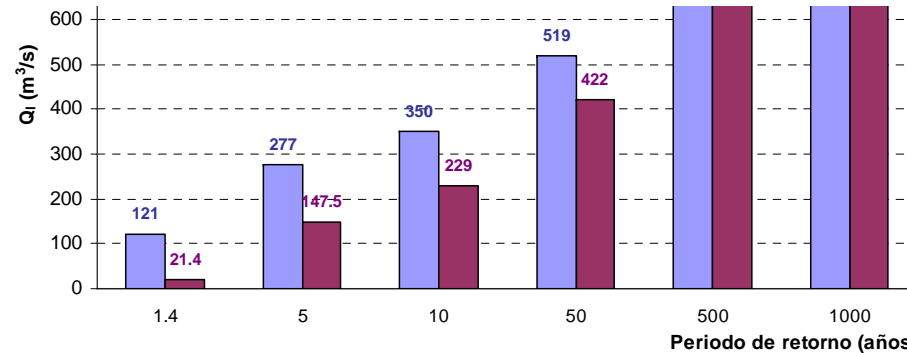
BARRANCO DE L



- ✓ Área Caldera
- ✓ Pendiente $S=0.033$
- ✓ Diámetro $D_{50}=3.458$ mm
- ✓ Diámetro $D_{85}=14.710$ mm



EL ALBUJÓN



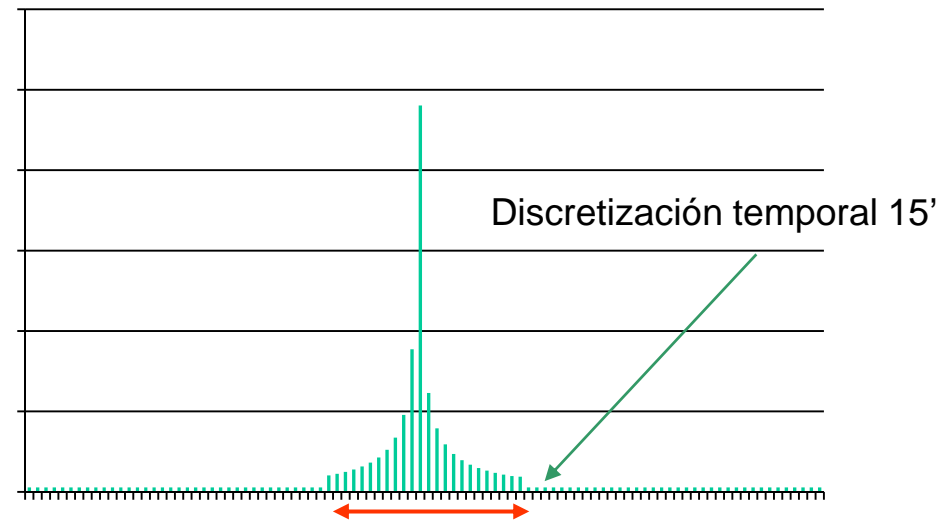
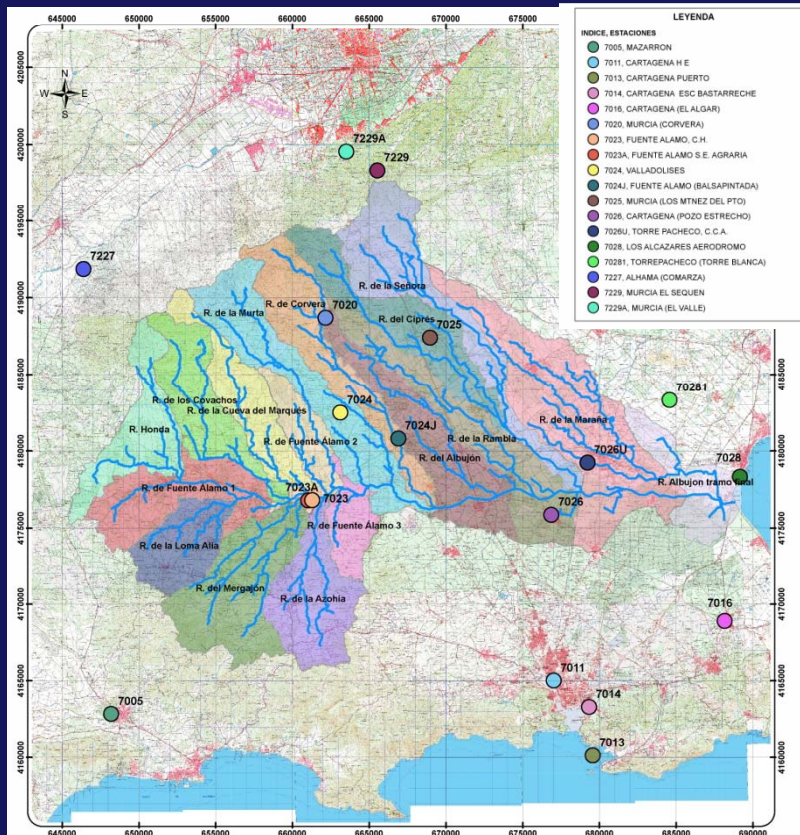
Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca mediterránea

Resultados y análisis

Conclusiones



80% precipitación en 6 horas

20 % restante distribuidas en 18 h

Datos de partida para el cálculo de parámetros físicos y número de curva:

- MDT 4x4 m. Proyecto Natmur 2008. Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad Región de Murcia
- Mapas Geológicos 1:50000. Instituto Geominero
- Usos de suelo del Corine Land Cover

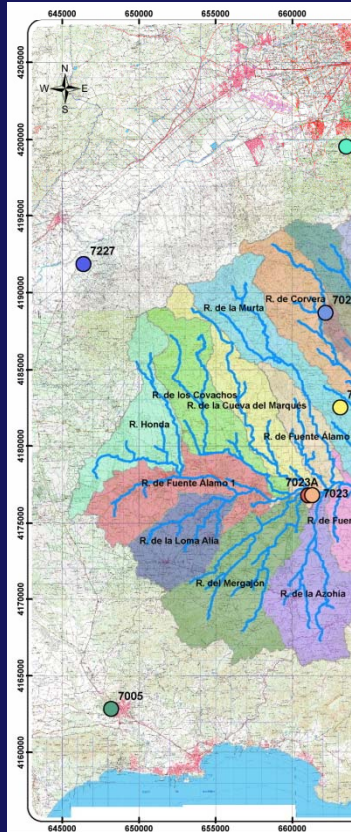
Introducción

Metodología

Aplicación a cuenca mediterránea

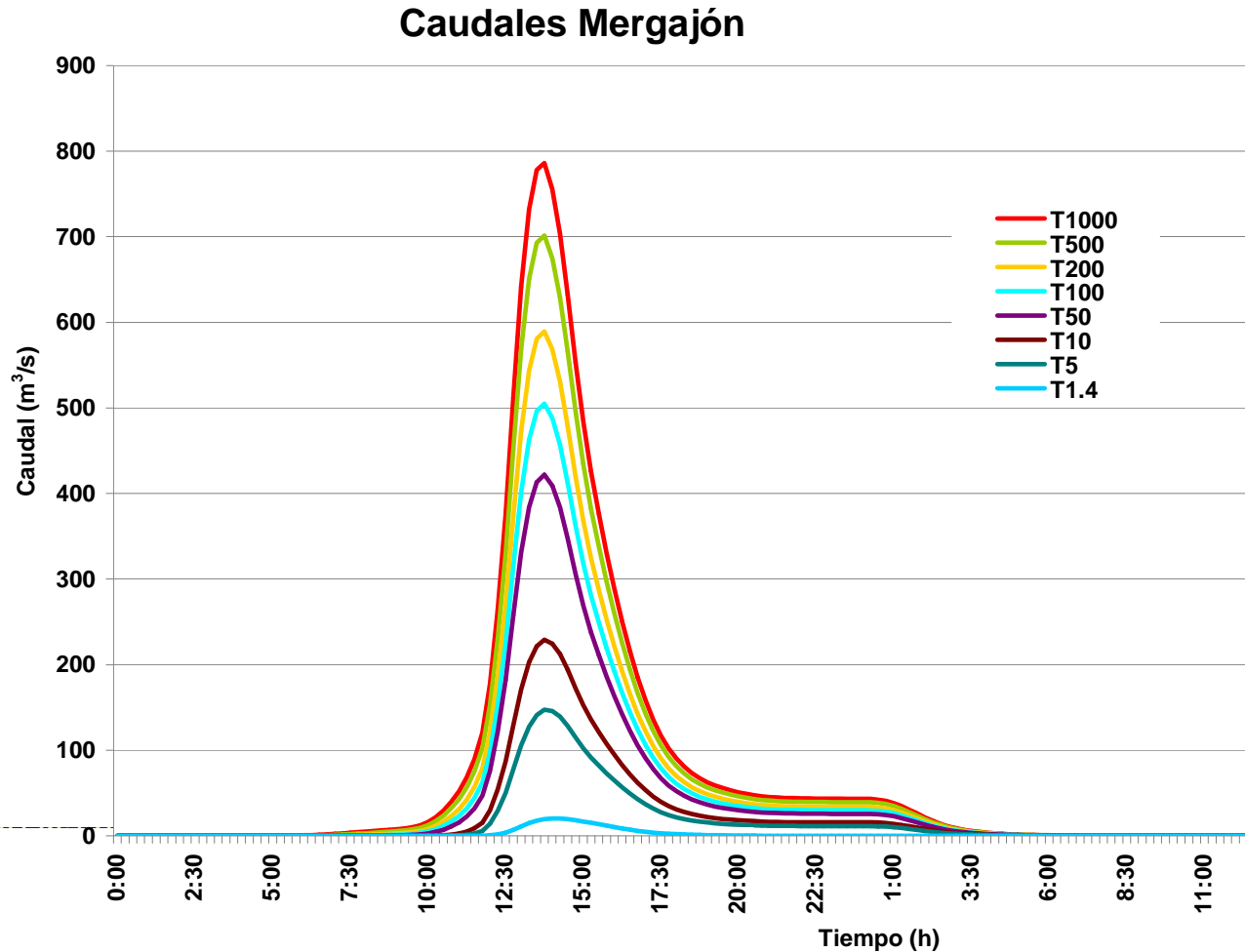
Resultados y análisis

Conclusiones



Datos de partida para

- MDT 4x4 m. Proyección
- Mapas Geológicos
- Usos de suelo del C



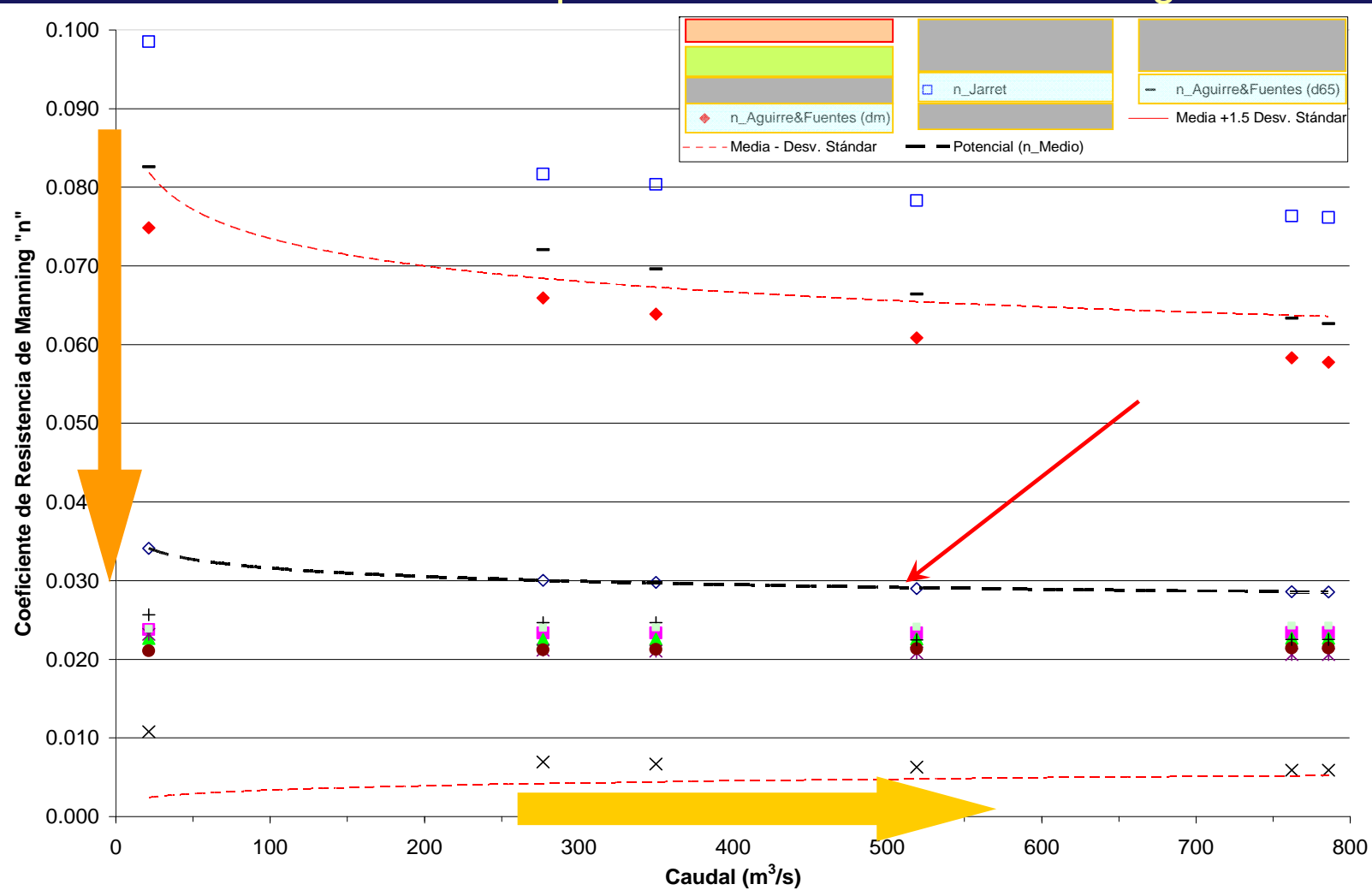
temporal 15'

as

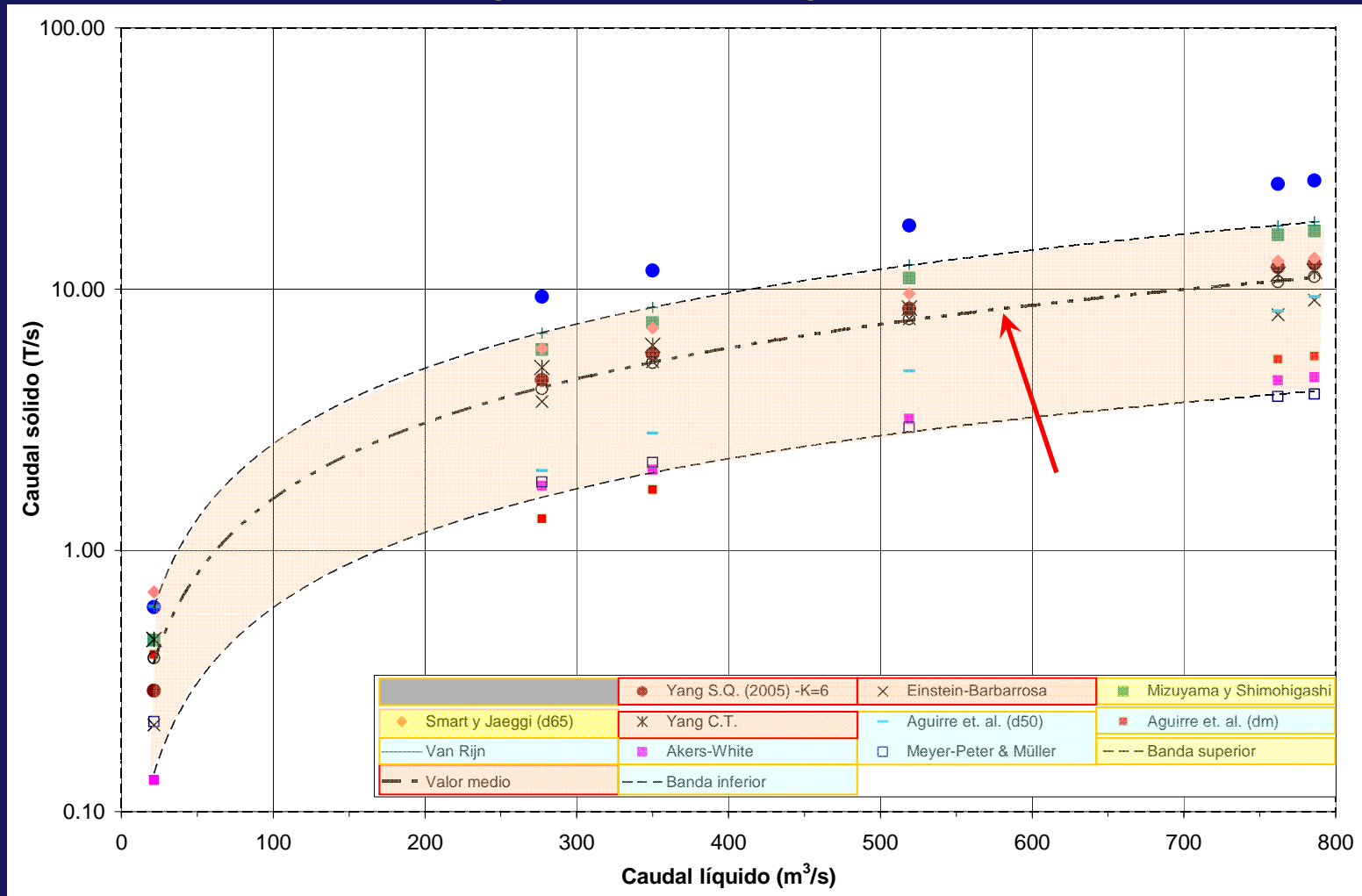
18 h

ión de Murcia

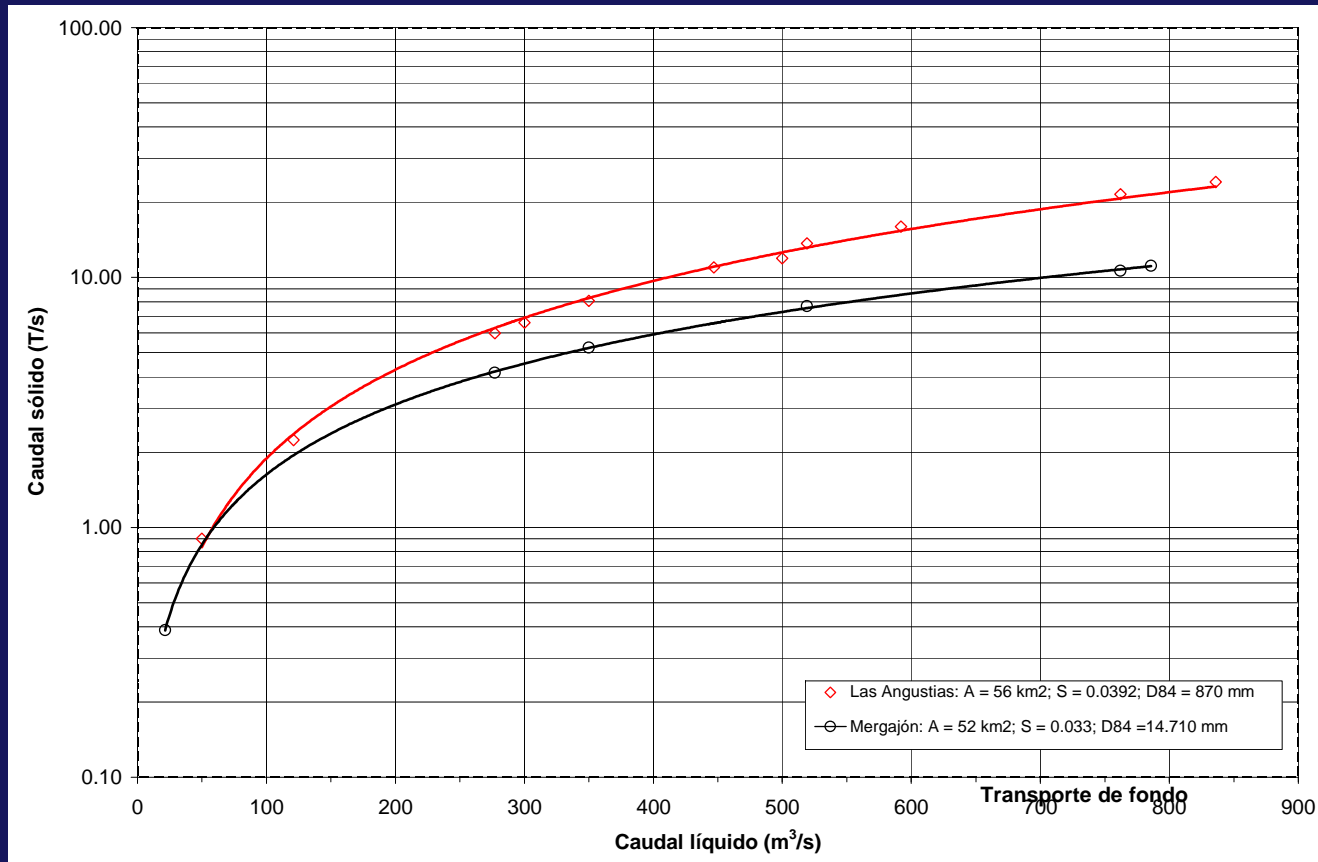
Resultados obtenidos para el coeficiente de Manning



Resultados obtenidos para el transporte de sedimentos



Comparativa Las Angustias - Mergajón



Proporción transporte de fondo y fondo en suspensión

