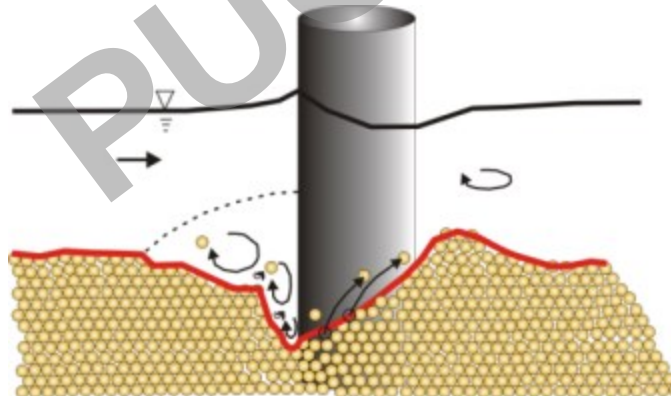




Avances en la protección de puentes ante fenómenos hidroclicmáticos

Oscar Link
Universidad de Concepción
Chile





Temario

- 1.- Motivación: Infraestructura crítica y fenómenos hidroclimáticos. Puentes
- 2.- Conceptos de diseño hidráulico de puentes
- 3.- Un modelo más cercano a la física
- 4.- Modelación física a escala



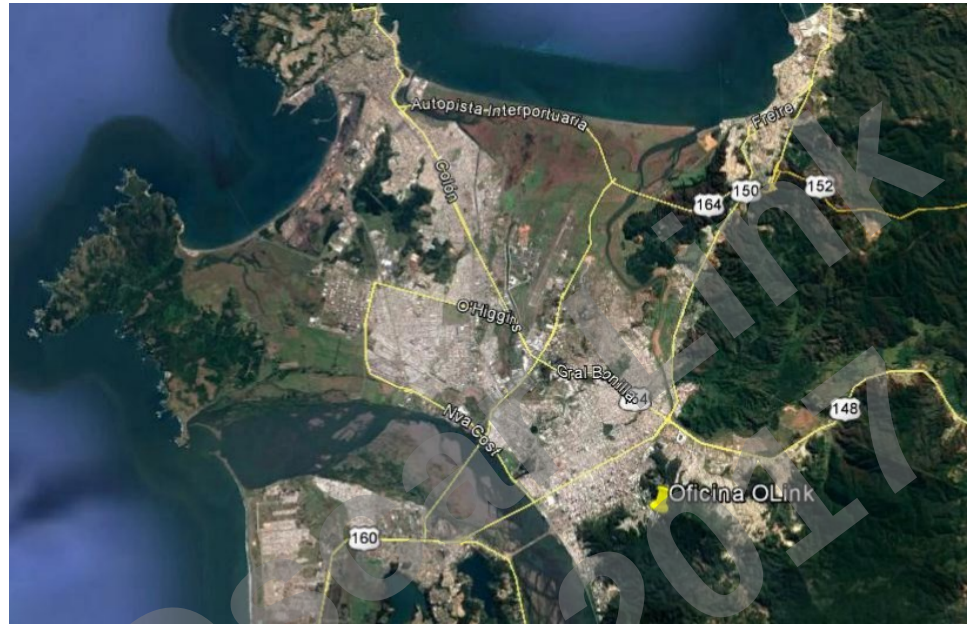


1.- Motivación: Infra crítica, fenómenos hidroclimáticos

Infraestructura crítica:

Los bienes y servicios que permitan el sano funcionamiento de la sociedad y la economía

Sistema eléctrico,
Abastecimiento agua potable,
Sistema de transporte,
Tele-comunicaciones etc.



Amenazas:

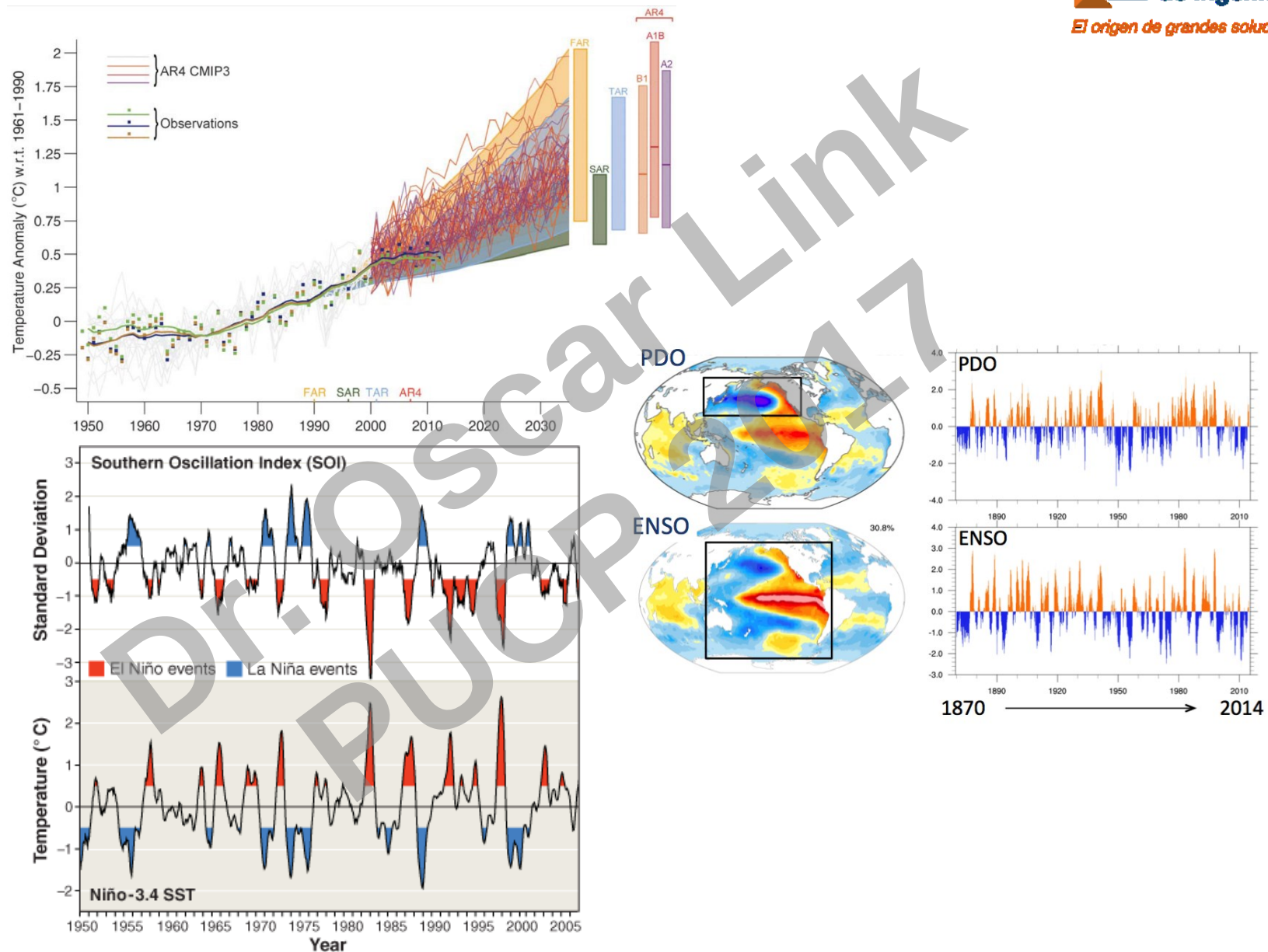
Desastres naturales:

Terremotos,
crecidas,
incendios,
erupciones volcánicas,

Terrorismo

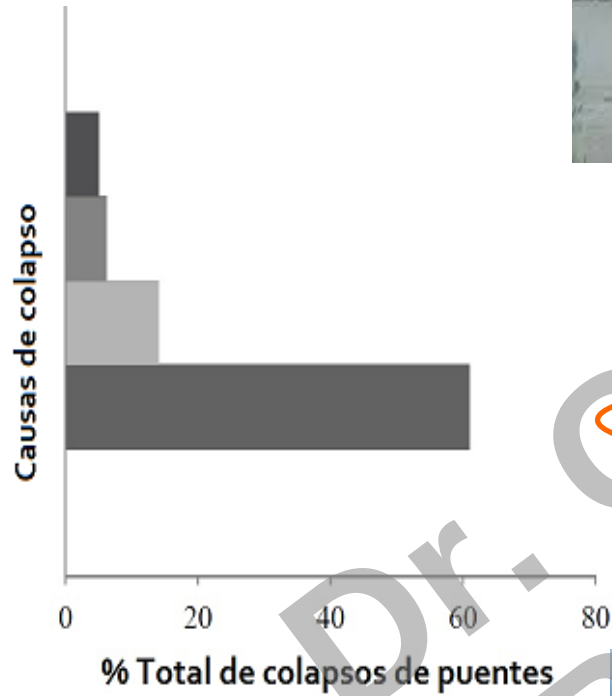


1.- Motivación: Infra crítica, fenómenos hidroclimáticos





1.- Motivación: Infra crítica, fenómenos hidroclimáticos





1.- Motivación: Infra crítica, fenómenos hidroclimáticos

Otros procesos que se suman:

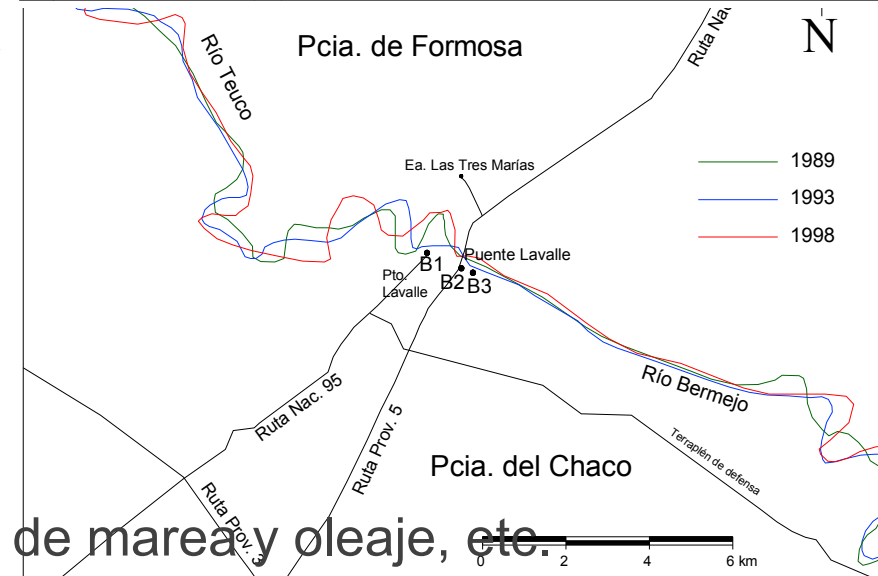
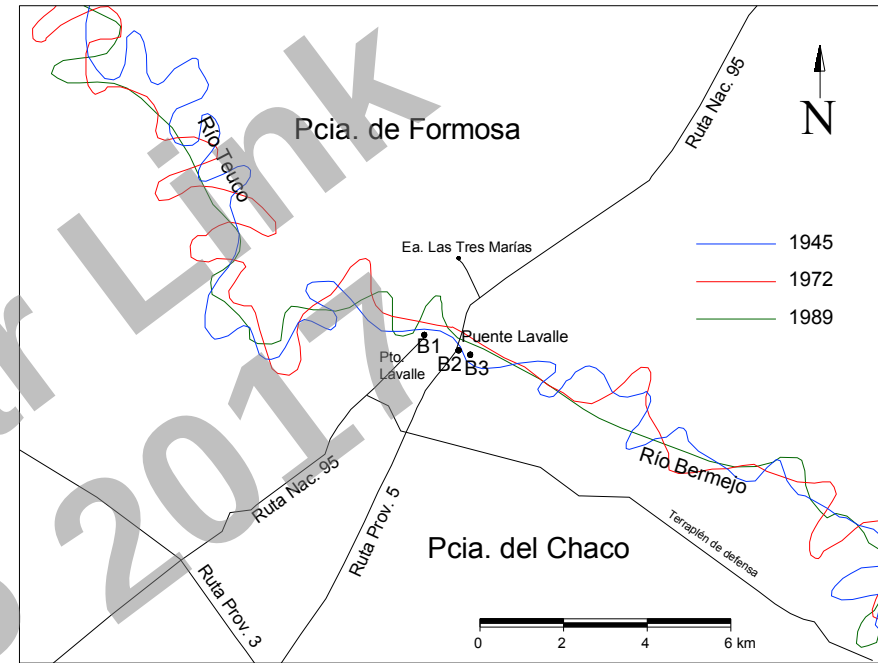
Erosión generalizada - áridos



River meandering - amazonía



... detritos, efecto de suelos finos, acción de marea y oleaje, etc.



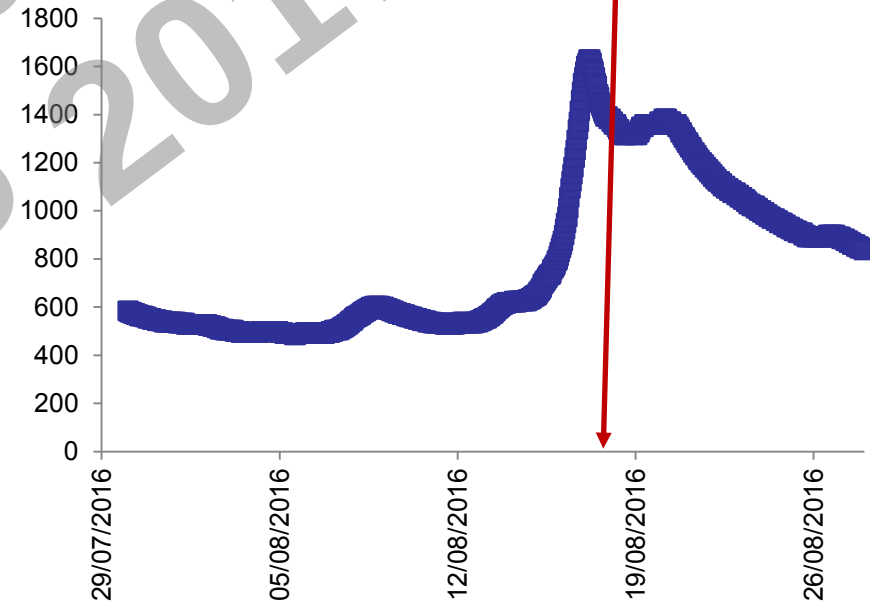


1.- Motivación: Infra crítica, fenómenos hidroclimáticos



Tadcaster Bridge colapsó en Navidad de 2016 durante una crecida con $T=100$.

En UK, la socavación se inspecciona cada 6 años. La última había sido el 2013 y se informó: No Scour.



Puente Pitrufquén. Caudal peak $T \approx 1$ año había ocurrido el día anterior.



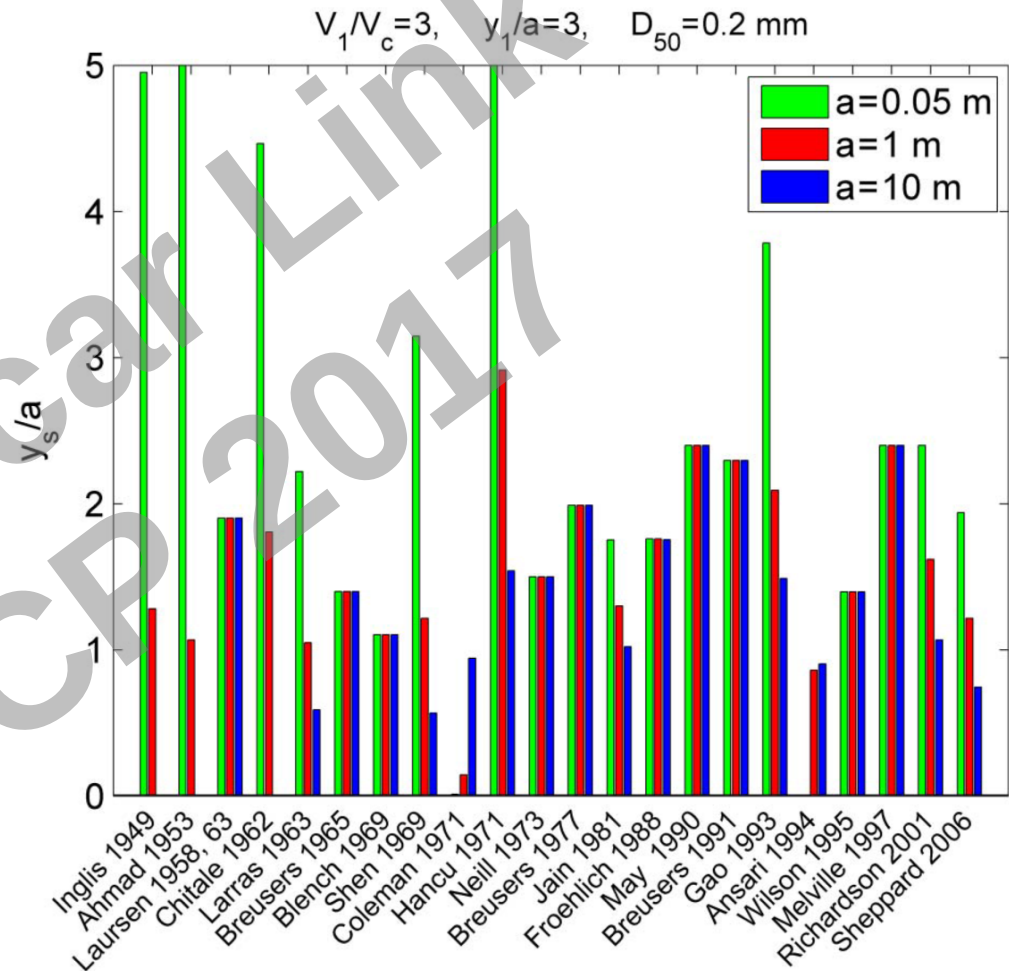
2.- Conceptos de diseño hidráulico de puentes

Diseño contra socavación en 3 pasos:

Paso 1: Calcular el caudal de diseño. Análisis de frecuencia, Q_{100}

Paso 2: Calcular la velocidad y profundidad para Q_{100}

Step 3: Calcular profundidad “máxima” de socavación $\sim 2D$, mucha dispersión





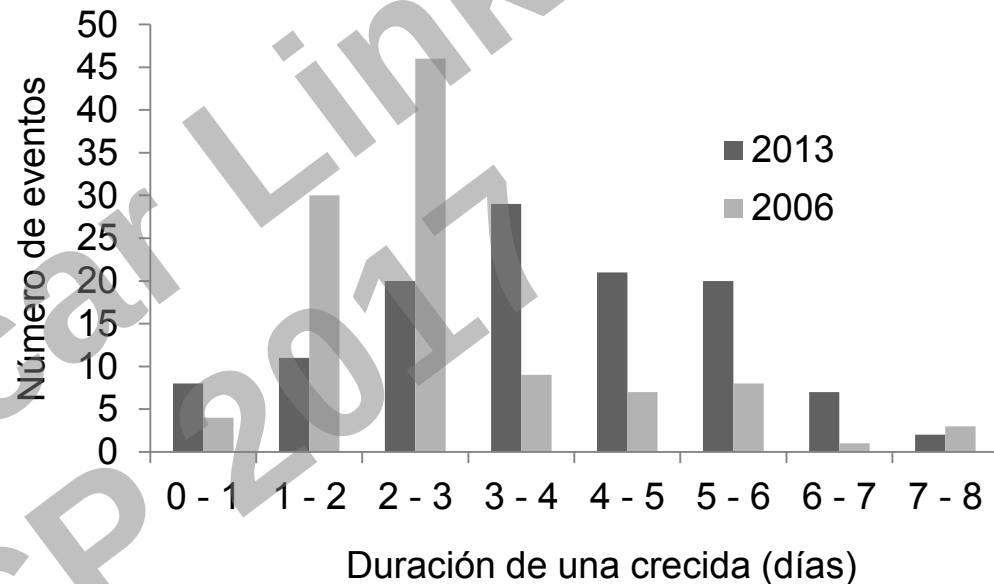
2.- Conceptos de diseño hidráulico de puentes

Q_{100} actúa sobre el lecho durante un tiempo “infinito”

En arenas ($d_{50} = 0,1-1,0$ mm) el tiempo de equilibrio $t_{eq} \approx 75 - 200$ días (M & C 1999)

➔ Poco realista!

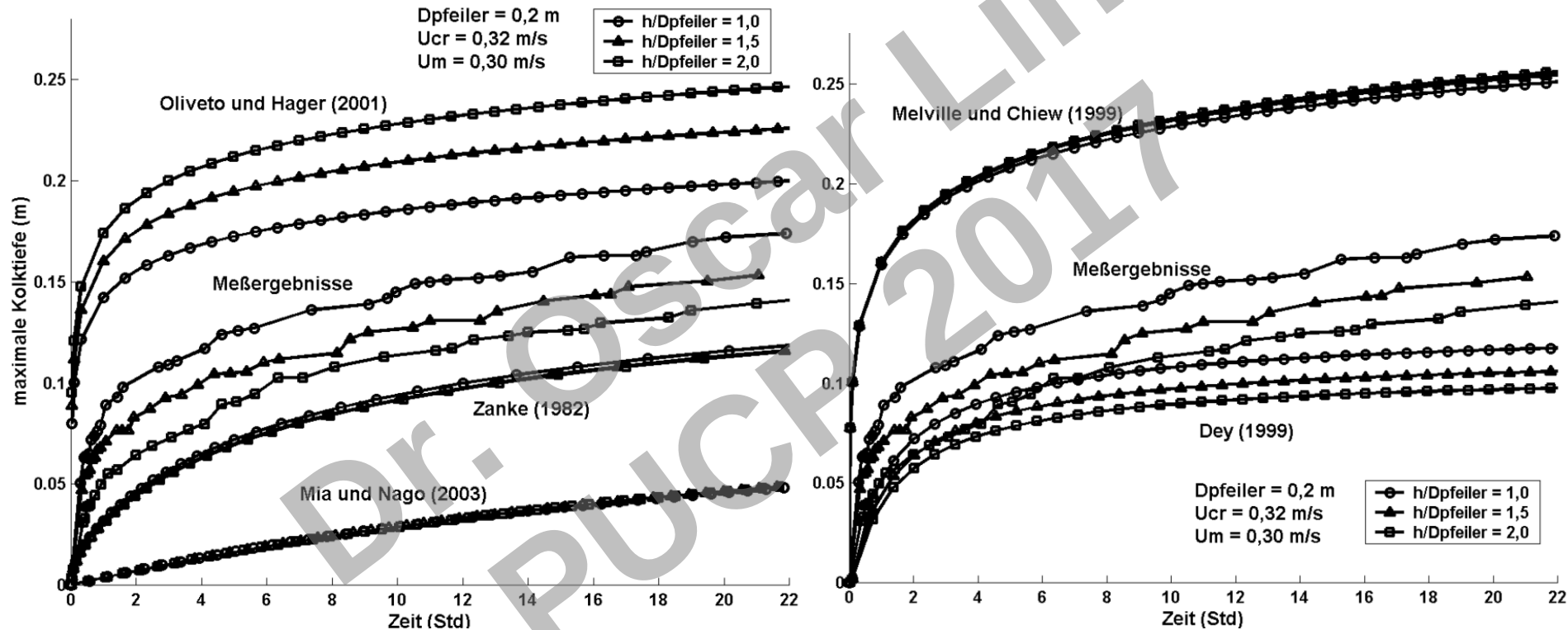
Probabilidad de falla del puente no es igual a probabilidad de excedencia del Q_{100}



Río Biobío

($QMA = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100} = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$)

Modelos para evolución de la socavación (asumen $Q = \text{cte}$)





3.- Un modelo más cercano a la física

a) Análisis dimensional: $f(\mu, \rho, u_{ef}, h, g, d_s, \rho_s, D, t, z) = 0$

$$u_{ef} = u - u_{cs}$$

$$f\left(\text{Re}', Fr', \rho', \frac{h}{d_s}, \frac{D}{d_s}, \frac{u_{ef}t}{d_s}, \frac{z}{d_s}\right) = 0$$

$$D^* = \left(\text{Re}'^2 / (Fr'^2 / \rho')\right)^{1/3} = \left((\rho' g) / \nu^2\right)^{1/3} d_s$$

$$Fr_d = Fr'(\rho')^{-0.5} = u_{ef} / \sqrt{\rho' g d_s}$$

$$U^* = 2(u_{ef}t/d_s)(D/d_s)^{-2} = u_{ef}t / (D^2/2d_s) = u_{ef}t / z_R$$

$$Z^* = 2(z/d_s)(D/d_s)^{-2} = z / (D^2/2d_s) = z / z_R$$

$$f\left(D^*, Fr_d, \rho', \frac{h}{d_s}, \frac{D}{d_s}, U^*, Z^*\right) = 0$$

$$Z^* = f(Fr_d, U^*)$$



3.- Un modelo más cercano a la física

b) De la definición de trabajo, W :

$$W \propto \tau_0 u \quad \tau_0 \propto \rho u^2 \quad W \propto u^3$$

$$w_{ef} \propto \int u_{ef}^3 \delta dt \quad \delta = \begin{cases} 0 & u/u_{cs} < 1.0 \\ 1 & u/u_{cs} \geq 1.0 \end{cases}$$

Normalizando con:

$$u_R = \sqrt{\rho' g d_s} \quad t_c = \frac{D^2}{2d_s u_{ef}}$$

$$W^* \propto \int_0^{t_{end}} \frac{1}{t_c} \left(\frac{u_{ef}}{u_R} \right)^3 \delta dt = \int_0^{t_{end}} \frac{u_{ef}}{(D^2/2d_s)} \left(\frac{u_{ef}}{u_R} \right)^3 \delta dt$$

$$W^* \propto \int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{Z_R} \delta dt \quad Z^* = f(Fr_d, U^*)$$



3.- Un modelo más cercano a la física

Para relacionar Z^* con W^* se adopta una función exponencial de 3 parámetros:

$$Z^* = c_1 \left(1 - e^{-c_2 W^{*c_3}} \right)$$

Asumiendo:
$$W^* = \int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{Z_R} \delta dt$$

La tasa de socavación es:

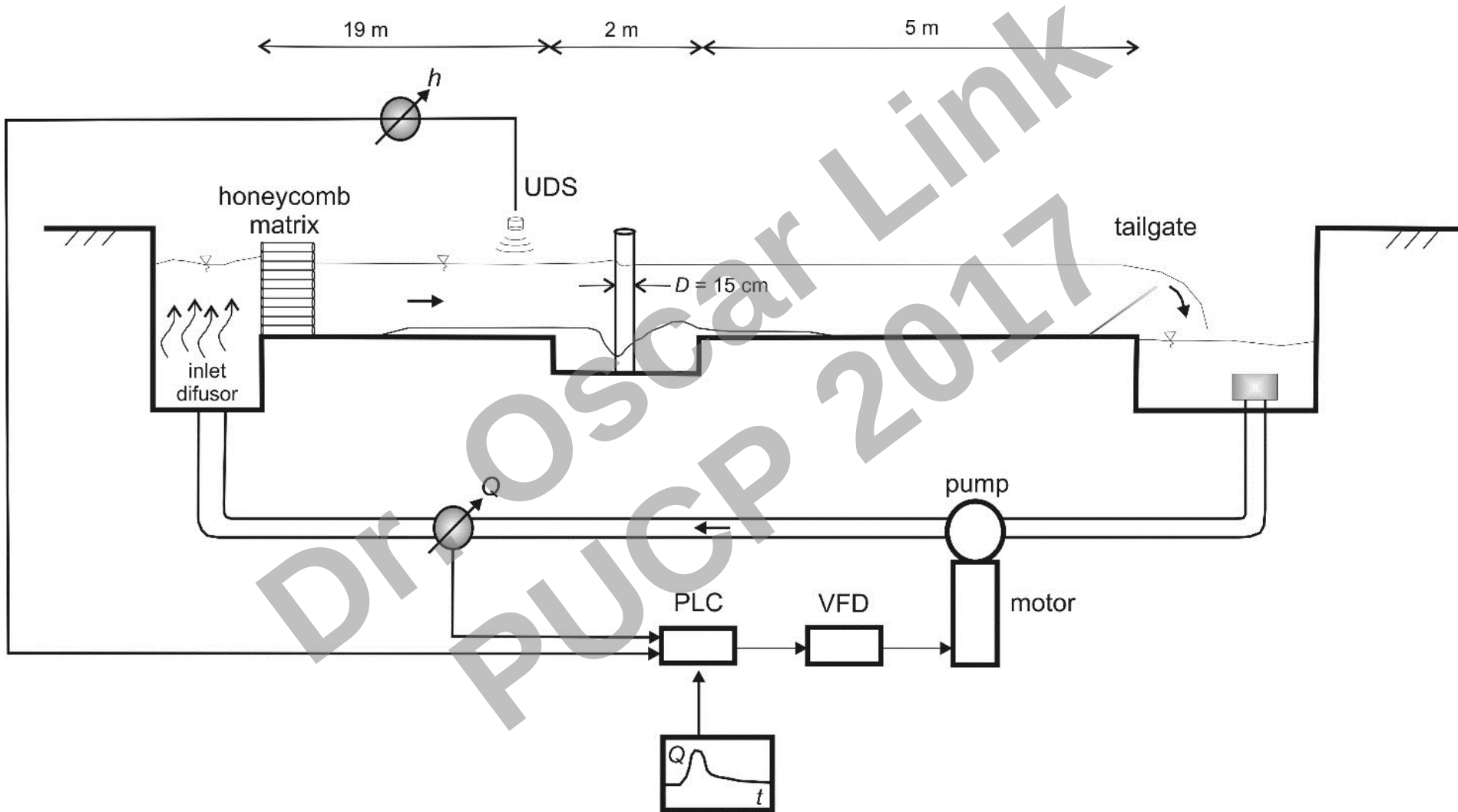
$$\frac{dZ^*}{dW^*} = c_1 c_2 c_3 W^{*(c_3-1)} e^{(-c_2 W^{*c_3})}$$

$$\frac{dZ^*}{dt} = Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{Z_R} \delta c_1 c_2 c_3 \left[\int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{Z_R} \delta dt \right]^{c_3-1} e^{\left[-c_2 \left(\int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{Z_R} \delta dt \right)^{c_3} \right]}$$

C_1 , C_2 y C_3 cambian con el sedimento



3.- Un modelo más cercano a la física





3.- Un modelo más cercano a la física

Propiedad	Cantidad
-----------	----------

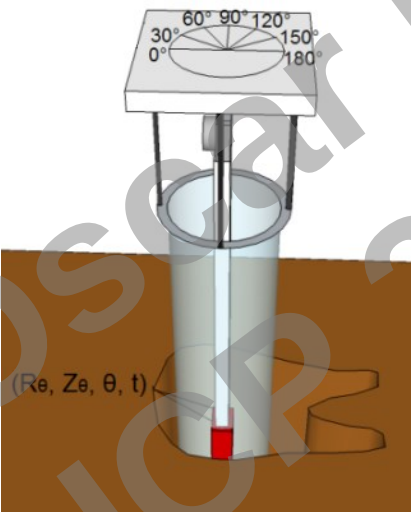
ρ_s [kg/m ³]	2650
-------------------------------	------

d_{50} [mm]	0.36
---------------	------

σ_g [-]	1.45
------------------	------

u_c [m/s]	0.32
-------------	------

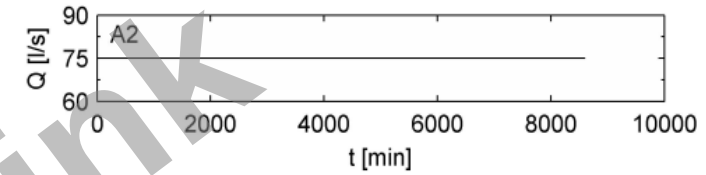
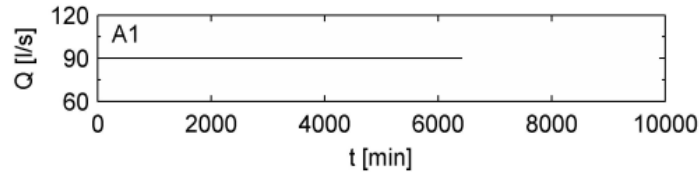
u_{cs} [m/s]	0.16
----------------	------



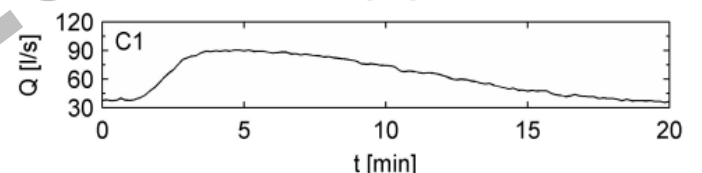
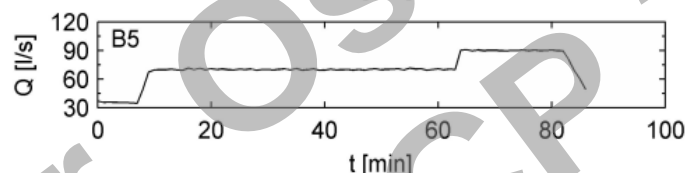
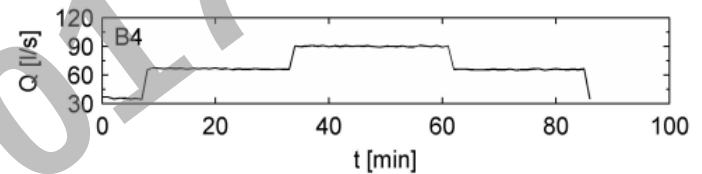
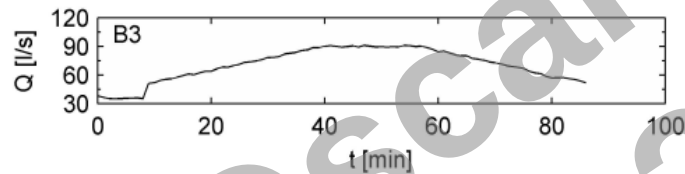
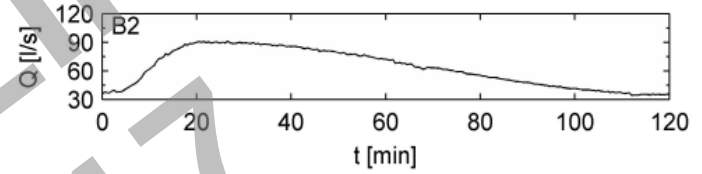
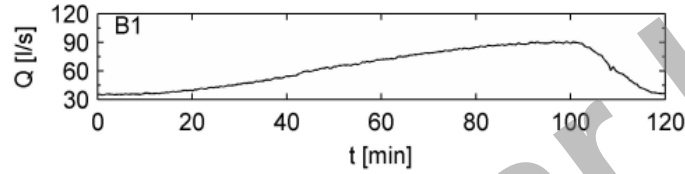


3.- Un modelo más cercano a la física

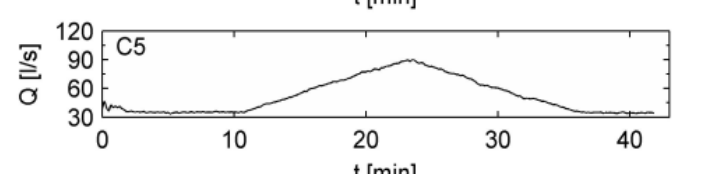
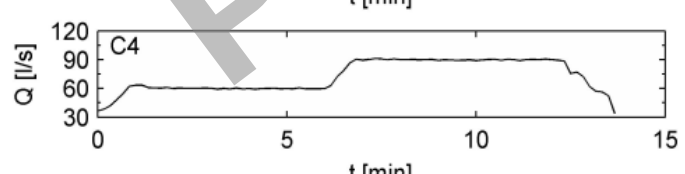
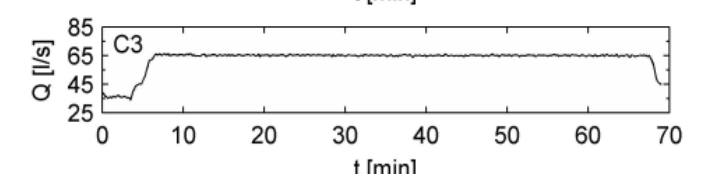
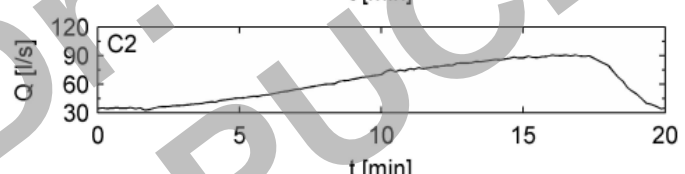
Serie A:
 $W^* = 1100, 5300$



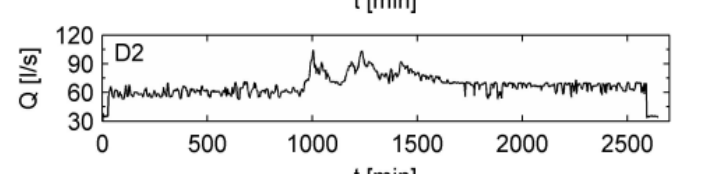
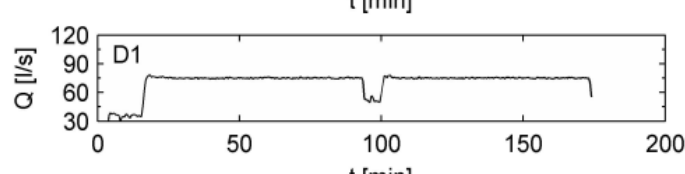
Serie B:
 $W^* = 38 - 42$



Serie C:
 $W^* = 4.0 - 4.8$



Serie D:
 $W^* = 44$ and 396

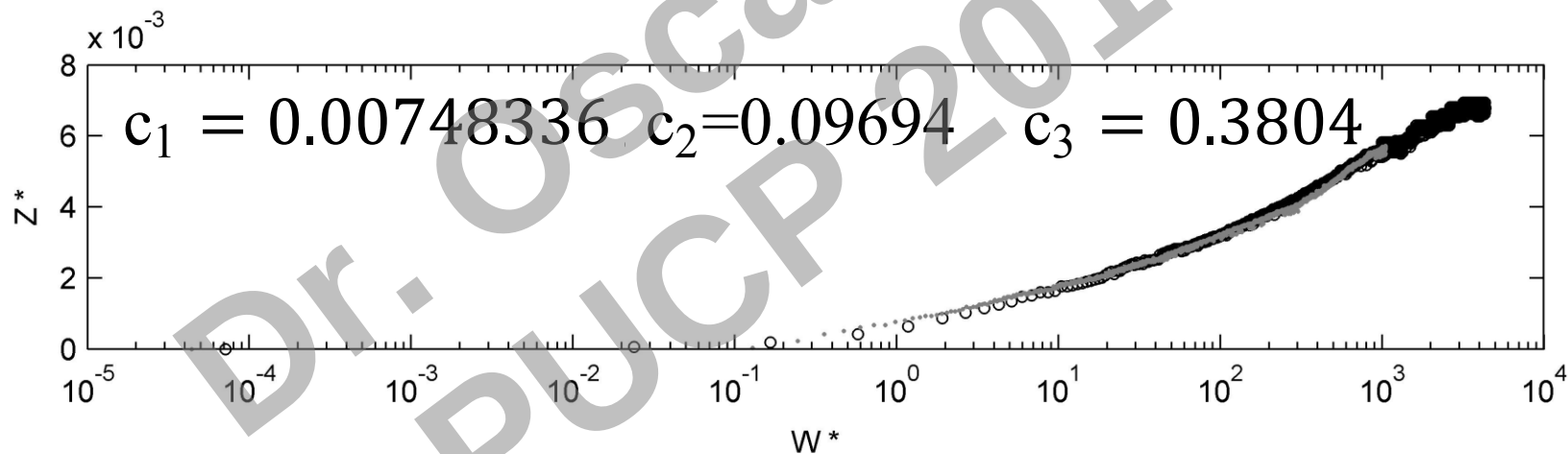
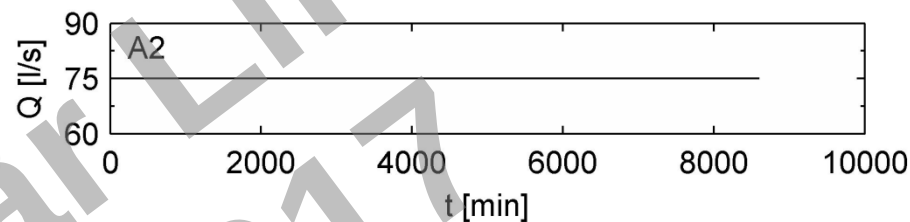
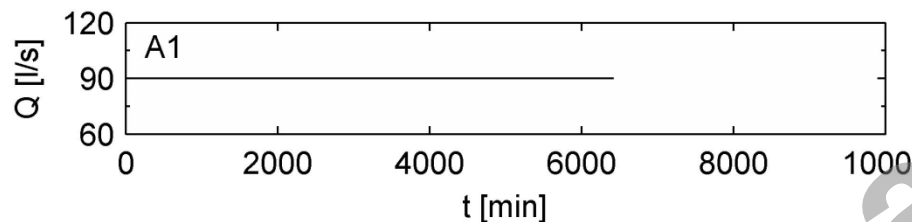




3.- Un modelo más cercano a la física

Calibración de parámetros

$$Z^* = c_1 \left(1 - e^{(-c_2 W^{*c_3})} \right)$$

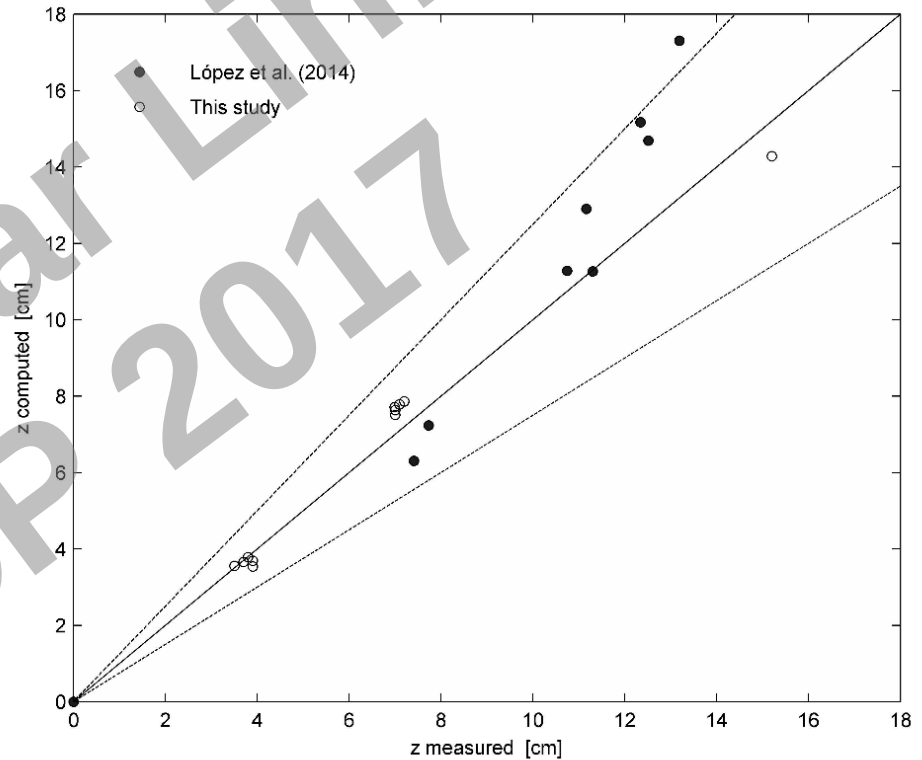
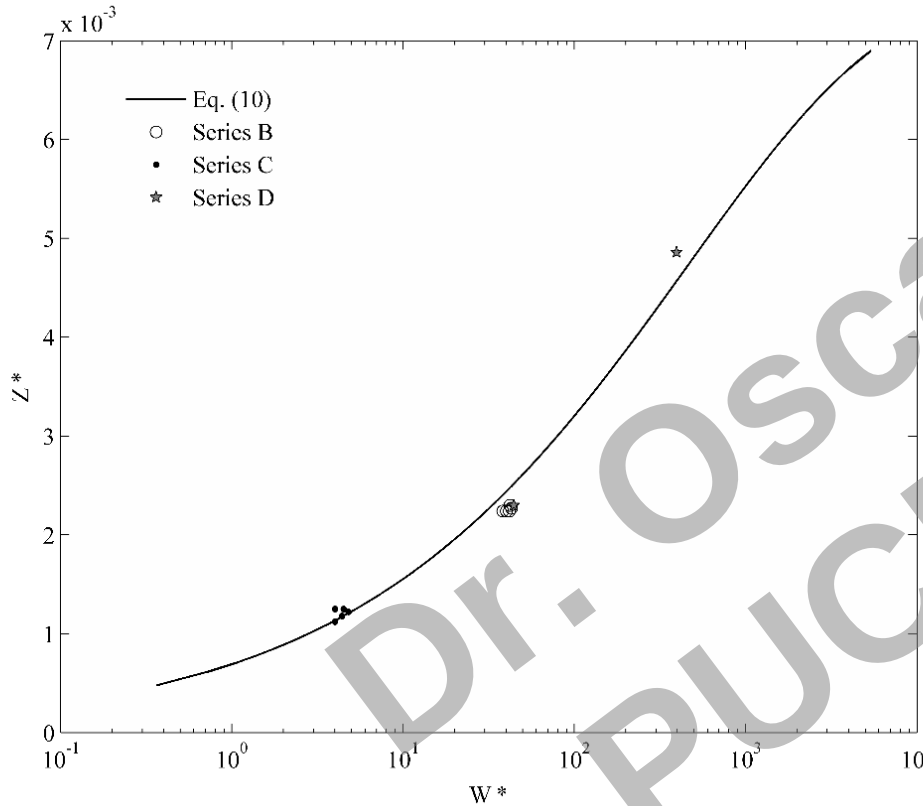


→ Notar que la relación entre Z^* y W^* es única!



3.- Un modelo más cercano a la física

Socavacion después de crecidas:

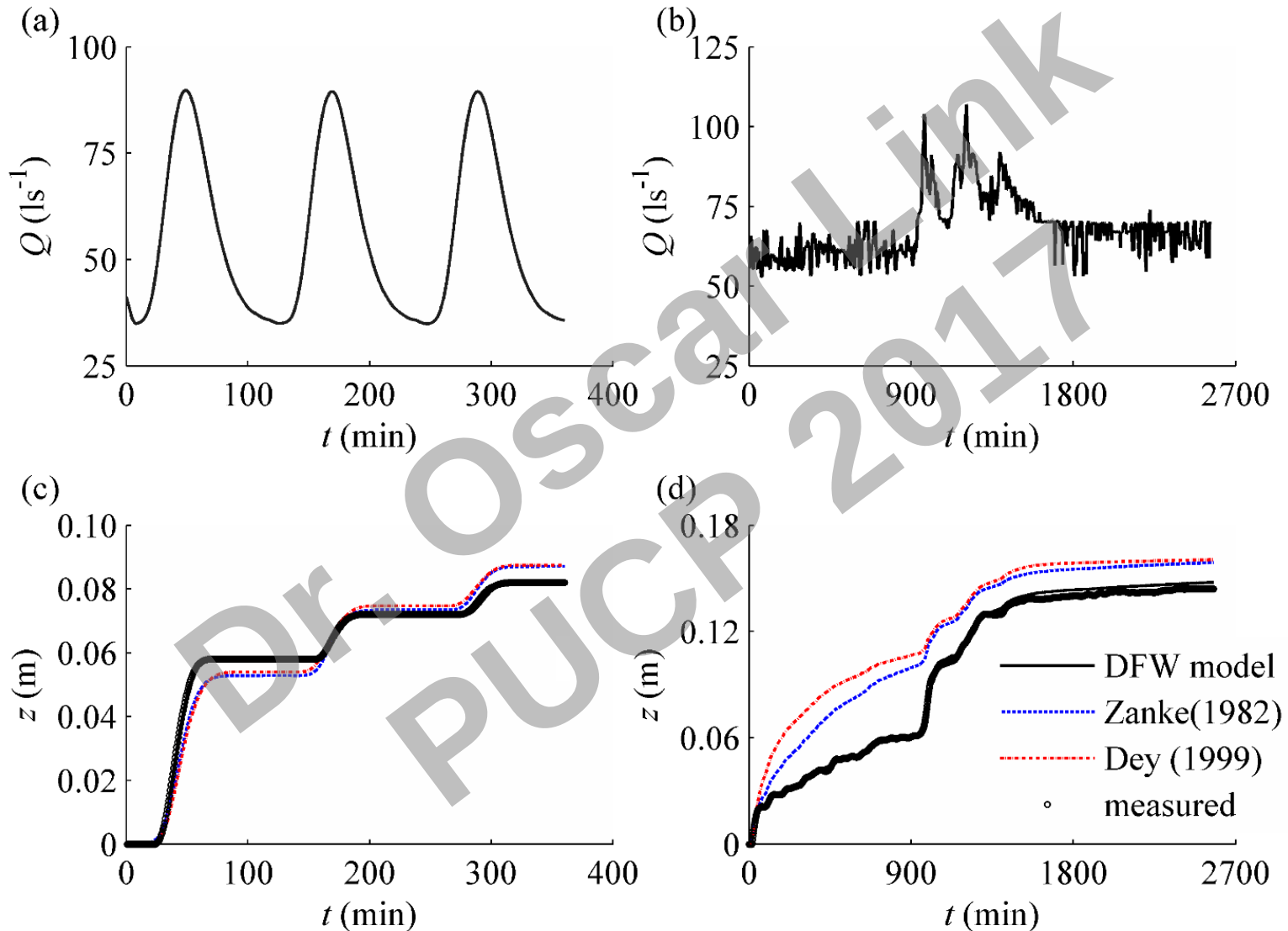


➔ Para un mismo W^* , pueden encontrarse hidrogramas equivalentes, incluso con $Q=\text{cte}$.



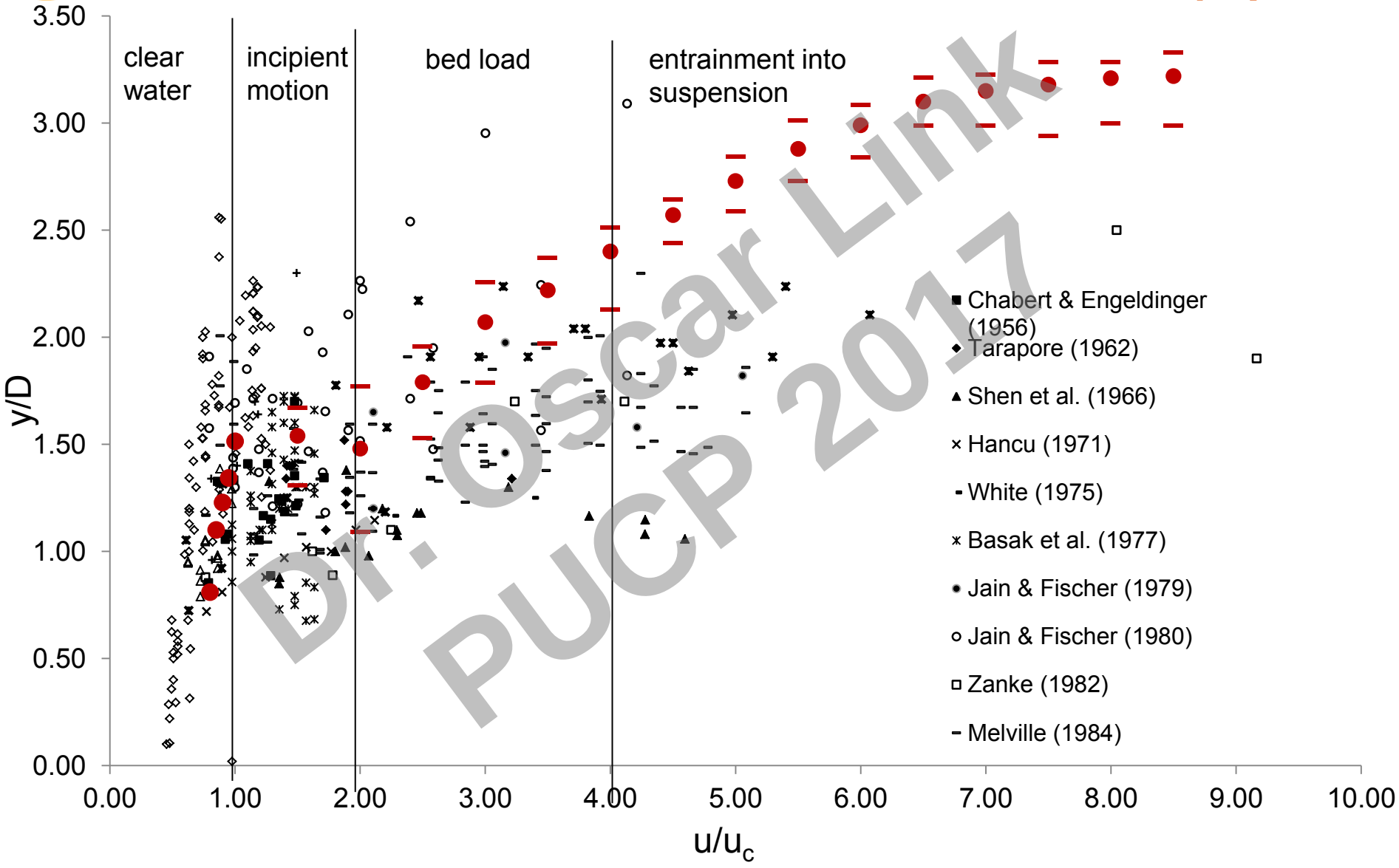
3.- Un modelo más cercano a la física

Evolución de la socavación durante crecidas





3.- Un modelo más cercano a la física

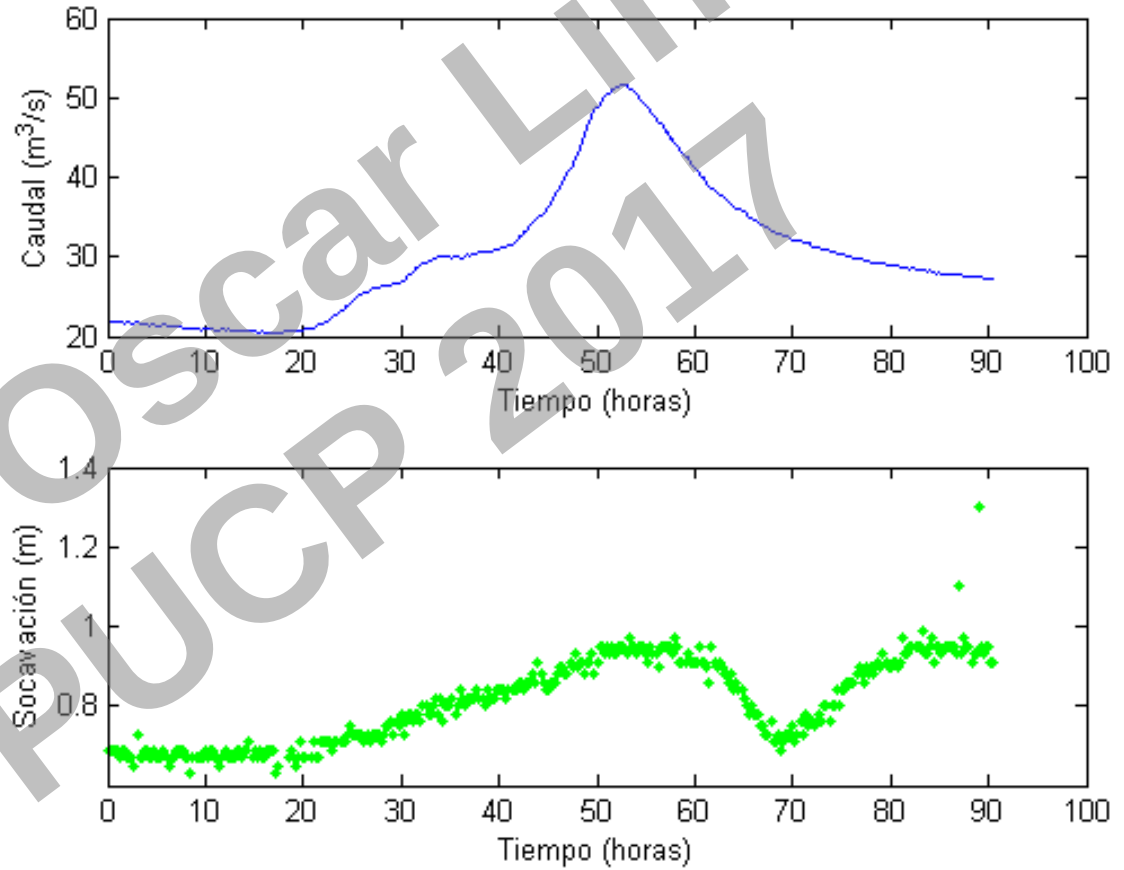


Ettmer B, Orth F & Link O. (2015) Live-bed scour at bridge piers in a lightweight Polystyrene bed. Journal of Hydraulic Engineering 141(9):1-10.



3.- Un modelo más cercano a la física

El desafío es extender el modelo para aplicarlo en casos reales:





4.- Modelación física a escala

Las formulas de socavación tienen aplicabilidad restringida a casos idealizados. Aparecen dificultades en caso de **cepas compuestas**, **cepas complejas**, **cepas giradas** y también para **grupos de cepas**.





4.- Modelación física a escala

$$f(\mu, \rho, u_{ef}, h, g, d_s, \rho_s, D, t, z) = 0$$

$$f\left(\text{Re}', Fr', \rho', \frac{h}{d_s}, \frac{D}{d_s}, \frac{u_{ef}t}{d_s}, \frac{z}{d_s}\right) = 0$$

“The use of laboratory flumes in developing accurate predictors of scour depth at full-scale piers is limited due to scale effects that may produce greater scour depths at the laboratory than at actual piers in rivers” (Ettema et al. 1998)

2

- Ettema et al. (1998) Scale Effect in Pier Scour Experiment. J. of Hydraulic Engrg. 124(6):639-642.
- Ettema et al. (2006) Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders. J. of Hydraulic Engrg. 132(1):33-40.
- Cheng et al. (2016) Scaling Analysis of Pier-Scouring Processes. J. of Engrg Mechanics. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001107



4.- Modelación física a escala

$$D^* = \left(\text{Re}'^2 / \left(Fr_d'^2 / \rho' \right) \right)^{1/3} = \left((\rho' g) / \nu^2 \right)^{1/3} d_s$$

$$Fr_d = Fr'(\rho')^{-0.5} = u_{ef} / \sqrt{\rho' g d_s}$$

$$U^* = 2(u_{ef} t / d_s) (D / d_s)^{-2} = u_{ef} t / (D^2 / 2 d_s) = u_{ef} t / z_R$$

$$Z^* = (z / d_s) (D / d_s)^{-1} = z / D$$

$$f \left(D^*, Fr_d, \rho', \frac{h}{d_s}, \frac{D}{d_s}, U^*, Z^* \right) = 0 \quad W^* \propto \int_0^{t_{end}} Fr_d^3 \frac{u_{ef}}{z_R} \delta dt$$

$$Z^* \cong a_1 e^{a_2 W^{*a_3}}$$



4.- Modelación física a escala

Hipóthesis:

$$Z^* = f\left(W^*, D^*, \frac{D}{d_s}\right)$$

Similitud:

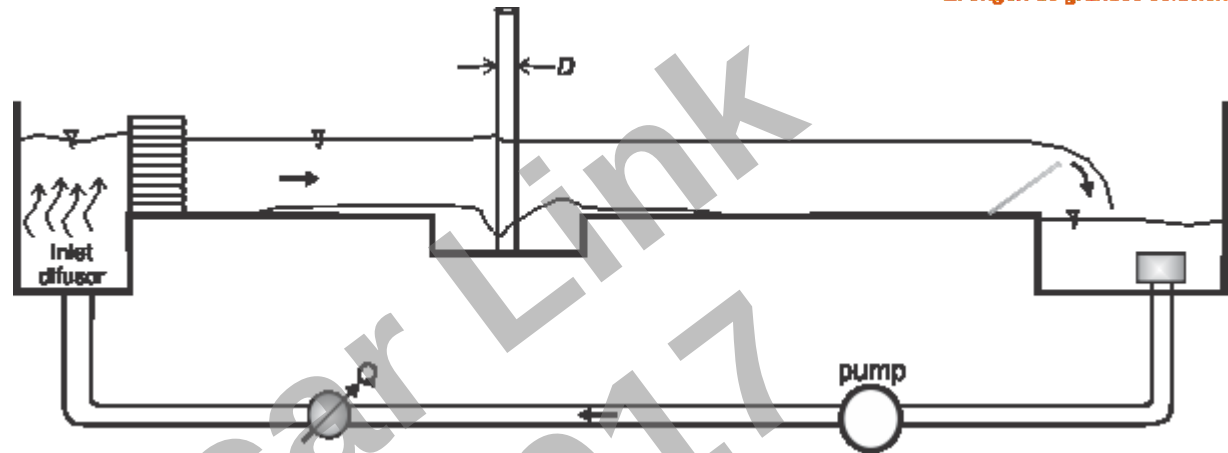
$$\lambda_{Z^*} = \lambda_{W^*} = \lambda_{D^*} = \lambda_{D/d_s} = 1$$

Escala temporal:

$$\lambda_t = \left(\frac{u_{ef,p}}{u_{ef,m}}\right)^4 \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^2 \left(\frac{\rho'_m}{\rho'_p}\right)^{3/2} \left(\frac{d_{s,m}}{d_{s,p}}\right)^{1/2} = \lambda_{u_{ef}}^{-4} \lambda_D^2 \lambda_{\rho'}^{3/2} \lambda_{d_s}^{1/2}$$



4.- Modelación física a escala



5 Series con 17 experimentos:

S1: igual sedimento, Q no estacionario

S2: arena vs polyst, agua clara y lecho vivo

S3: arena vs polyst, Q cte hasta socavación de equilibrio

S4: Intensidades de flujo distintas para probar escala temporal

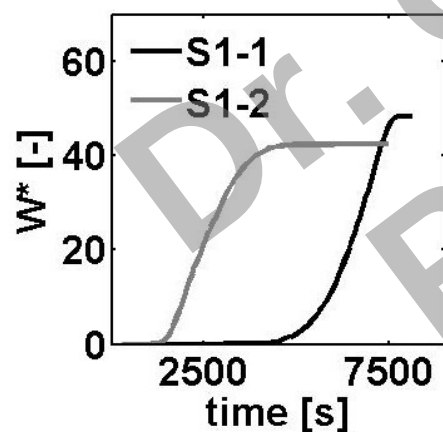
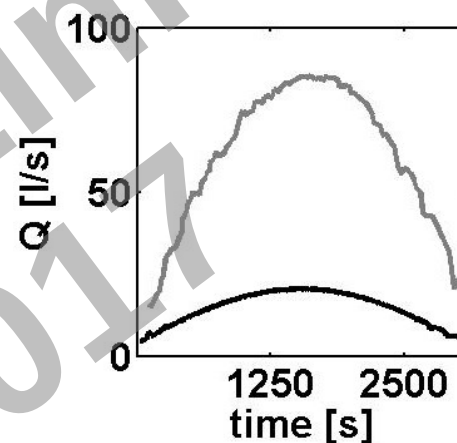
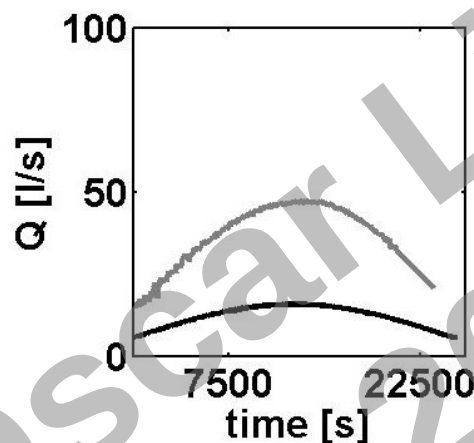
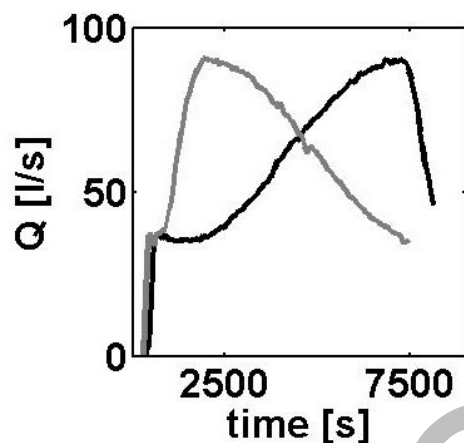
S5: distintos D/d para cuantificar efectos de escala

	D	B
Canal 1	0.150	1.4
Canal 2	0.046	0.4
Canal 3	0.030	0.3

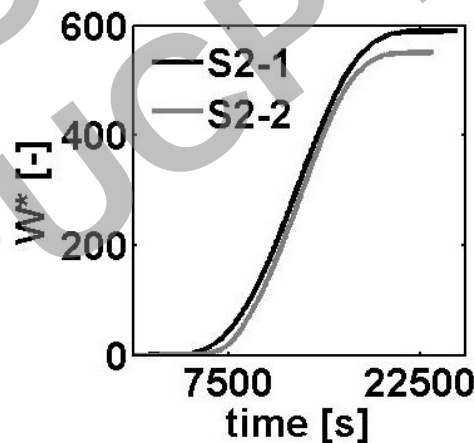
	d (mm)	ρ (t/m ³)	D*
Arena 1	0.36	2.65	9
Arena 2	0.74	2.65	18
Arena 3	0.80	2.65	21
Arena 4	1.60	2.65	40
Acetal	2.60	1.39	41
Polystyrene	2.74	1.04	20



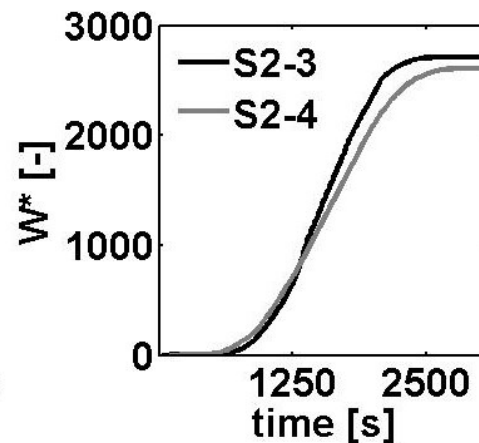
Serie S1 y S2: Caudal variable



Agua clara,
Solo arena



Agua clara,
arena v/s polystyrene

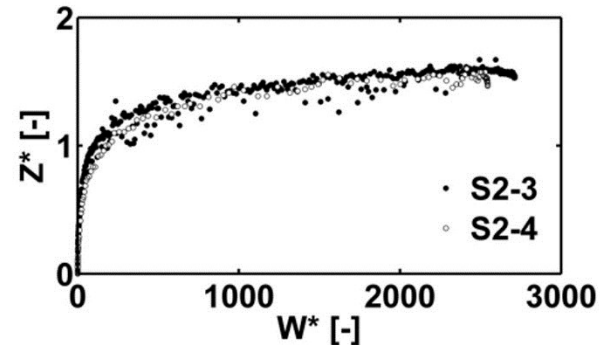
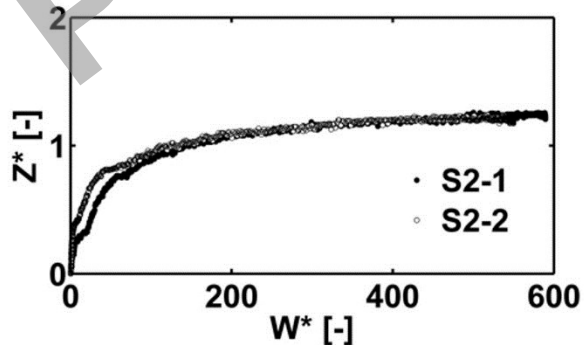
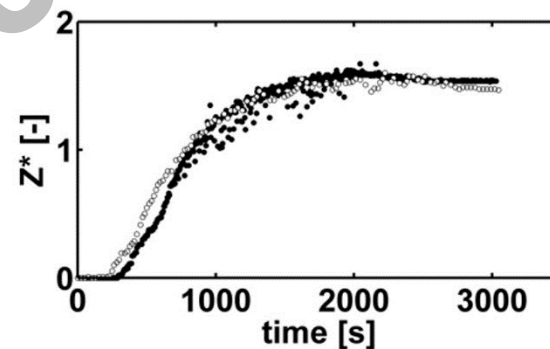
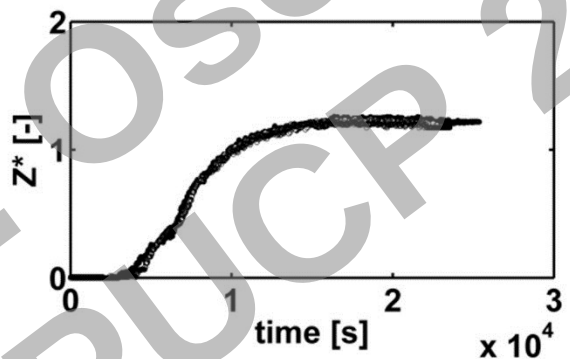
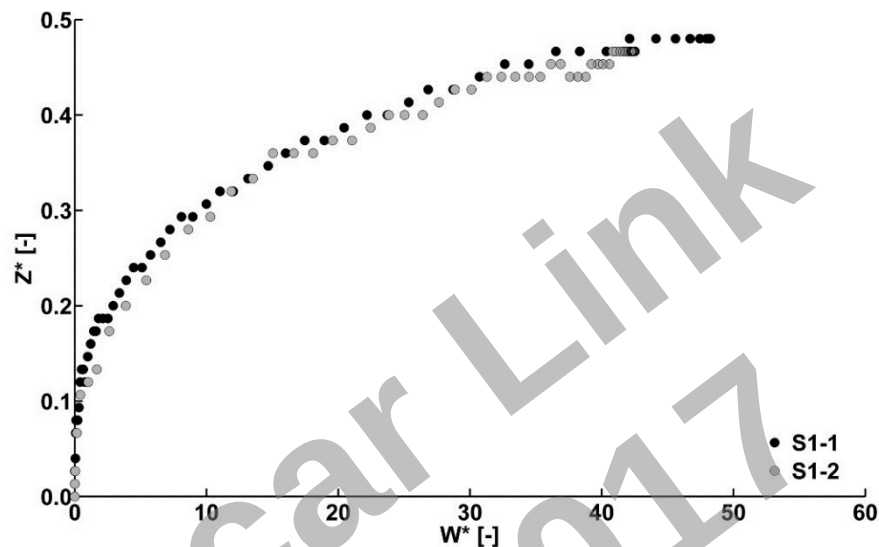


Lecho vivo,
arena v/s polystyrene



4.- Modelación física a escala

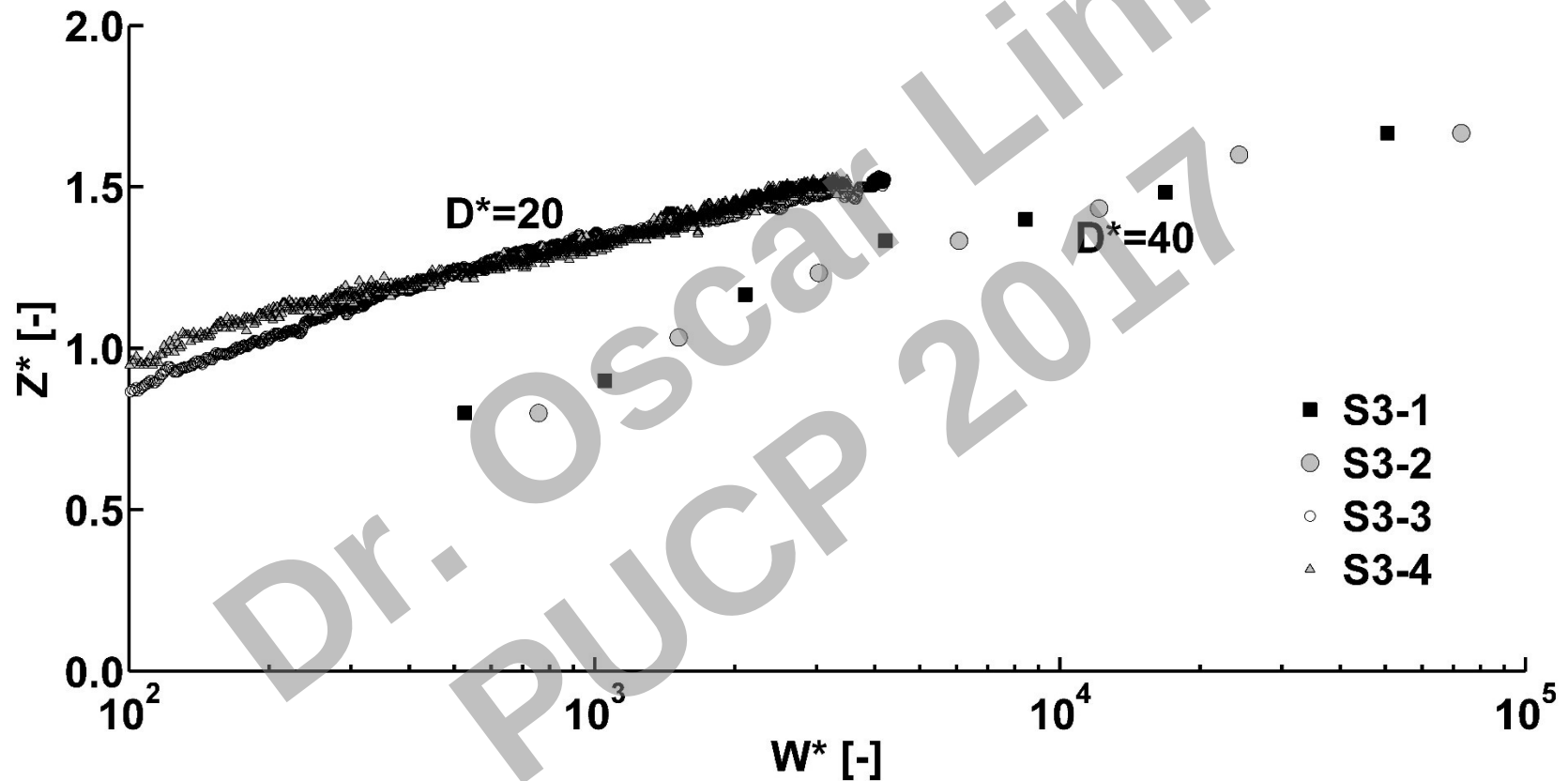
Parámetro del
flujo: W^*





4.- Modelación física a escala

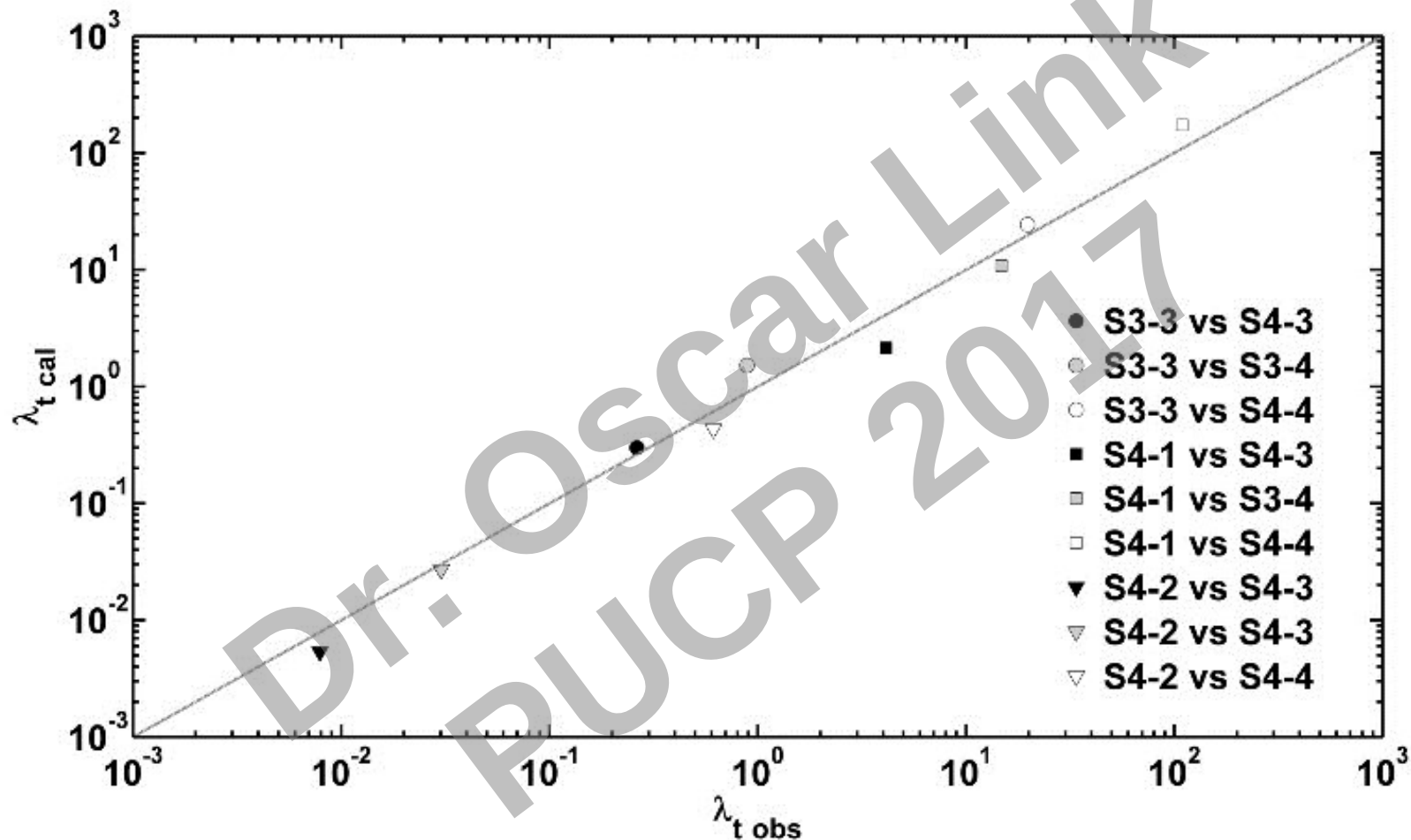
Q cte hasta socavación de equilibrio





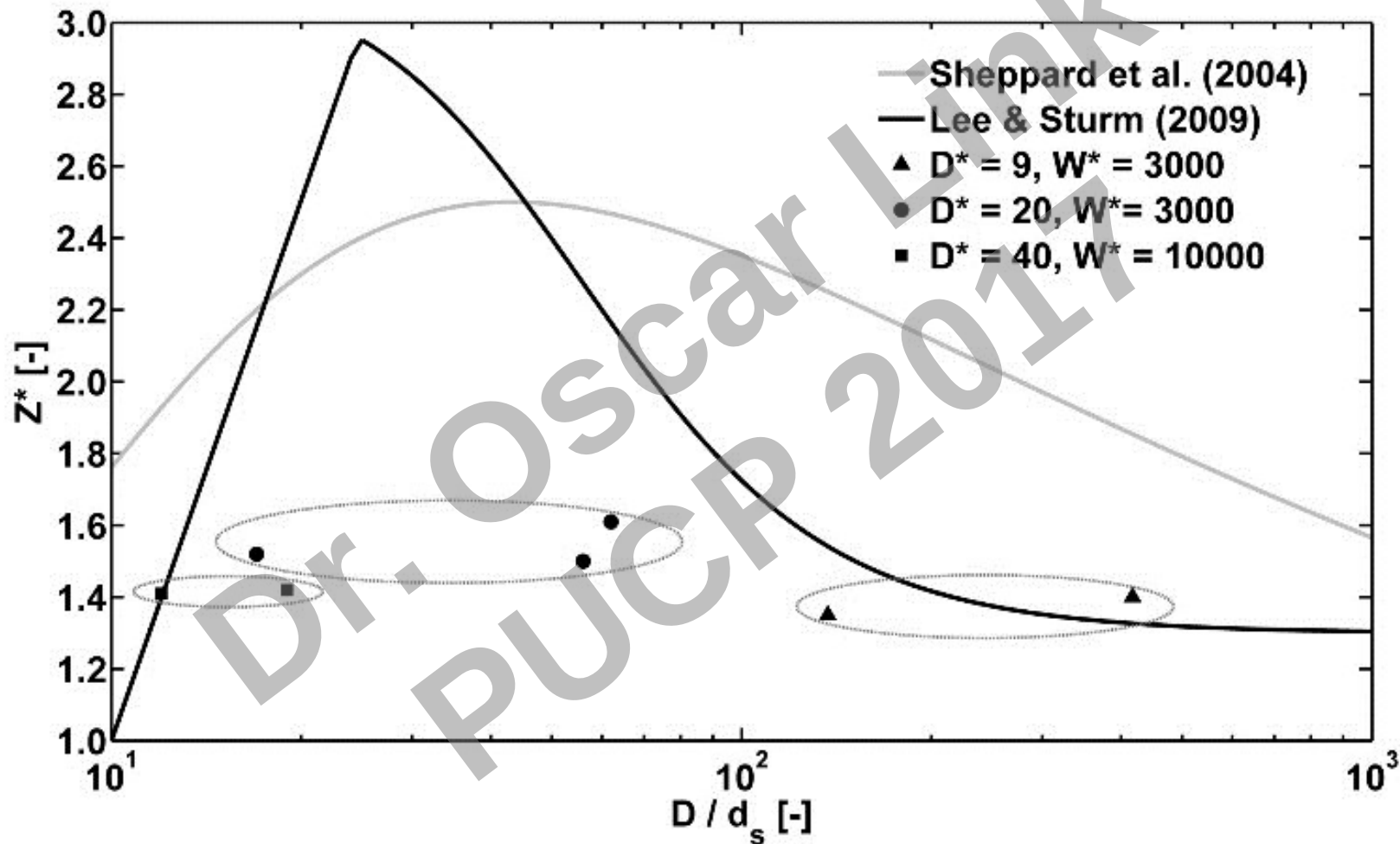
4.- Modelación física a escala

Escala temporal:





Efectos de escala en modelos distorsionando d_s/D



Sheppard, D. M., Odeh, M., & Glasser, T. (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 957-963.

Lee, S. O., & Sturm, T. W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), 793-802.



A la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica CONICYT
por financiar el proyecto Fondecyt 1150997:

Bridge pier scour under flood waves

Gracias por su atención!

Preguntas?

