JORNADA SOBRE MODELACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA DE PRESAS

Madrid, 25 de noviembre de 2019

NORMAS DE EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DE SEDIMENTOS

Prof. Luis G. Castillo
Grupo de I+D+i Hidr@m
ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cartagena

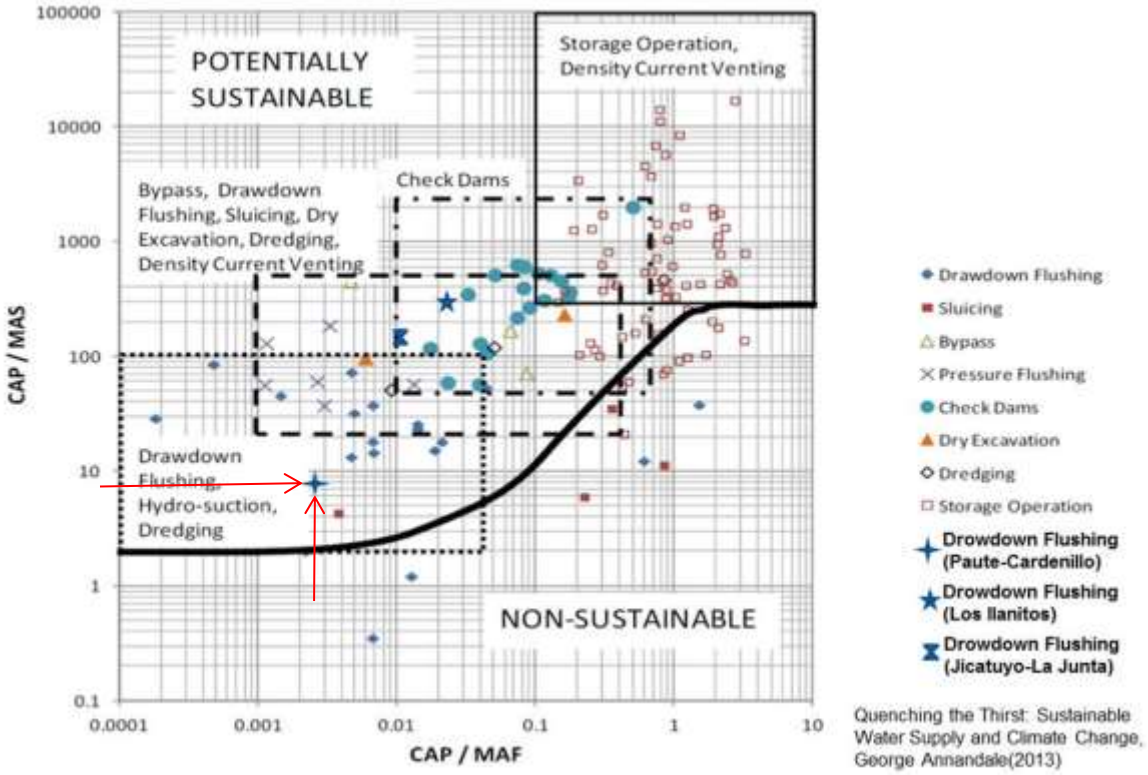
- **Introducción**
- **Coeficientes de resistencia y capacidad de transporte**
- **Simulación sedimentación de embalse**
- **Simulación lavado “flushing” de embalse**
- **Conclusiones**

Clasificación gestión sedimentos en embalses potencialmente sostenibles y no sostenibles

Paute-Cardenillo (Ecuador):

- **CAP**: Capacity almacenamiento inicial embalse: 12.33 hm^3
- **MAS**: Entrada Media Annual de Sedimentos: 1.75 hm^3/year
- **MAF**: Escorrentía Media Anual: 4299 hm^3/year

- **CAP / MAS** = 12.33/1.75 =7.05 year
- **CAP / MAF** = 12.33/4299 = 0.0029 year



Quenching the Thirst: Sustainable Water Supply and Climate Change, George Annandale(2013)

Información básica

- Estudio avenidas: Flushing no debe producir descargas con concentración sedimentos mayor a la que producen las avenidas ordinarias:

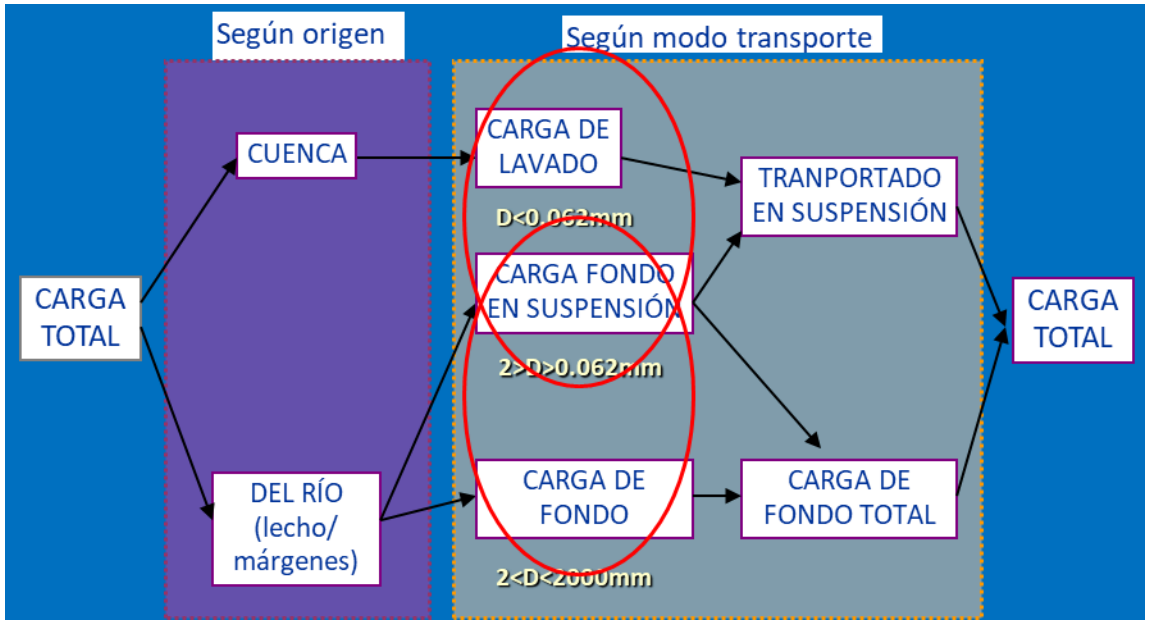
  ➔ Capacidad desagües de fondo ≈ 3 Q_{ma}

- Prospecciones de campo: Curvas granulométricas y Relaciones niveles - caudales

  ➔ Estimación coeficientes de Resistencia
  - Grano
  - Armado de lecho
  - Oclusión
  - Flujo hiperconcentrado (desagües de fondo)

➔ Estimación capacidad transporte sedimentos

- Carga de lavado,
- **Carga de fondo,**
- **Carga de fondo en suspension,**
- **Carga de fondo total**



- Modelos de turbulencia: k-ξ, (RNG) k-ξ, k-ω

Efectividad Flushing varía según forma embalse. No hay reglas generales.

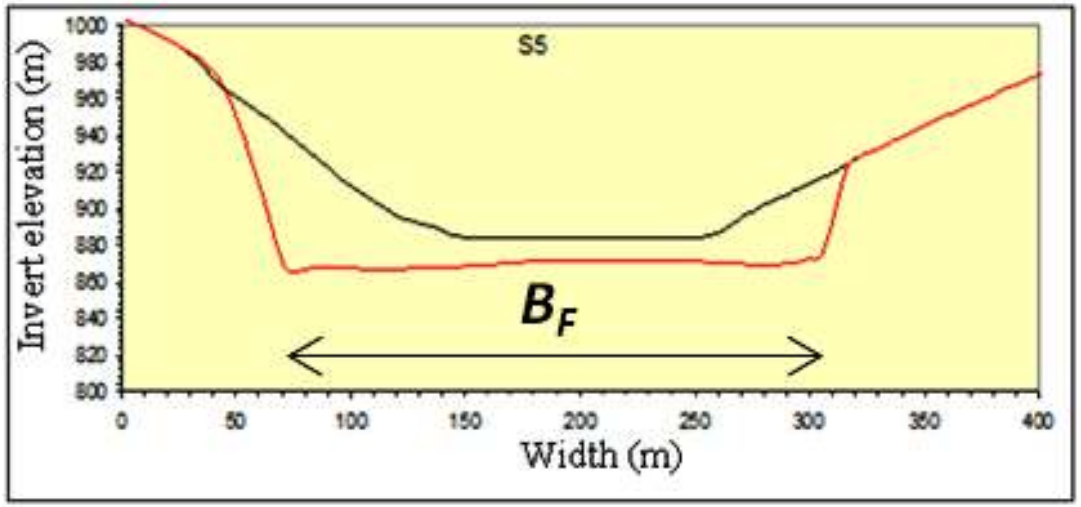
Shen (1999) propone algunas recomendaciones con datos de campo de cuatro embalses (Atkinson 1996) and diferentes datos en laboratorio (Lai and Shen 1996; Janssen 1999):

- Mejora eficiencia flushing si se realiza desembalse rápido;
- Flushing más eficiente embalses estrechos;
- Embalses amplios, se forma canal erosion regresivo o de lavado;
- El ancho canal flushing:

$$B_F \sim (11 - 12)\,(Q_{ca})^{0.50}$$

Q_{ca} – caudal dentro canal

- Modelación física y numérica



Curvas granulométricas

Diferentes sitios

Characterización material fondo independiente de materiales más finos

Materiales > 75 mm, método puntos de conteo.

Procesamiento imágenes malla 0.50 m. Identificados156 sectores.

Grain resistance coefficients

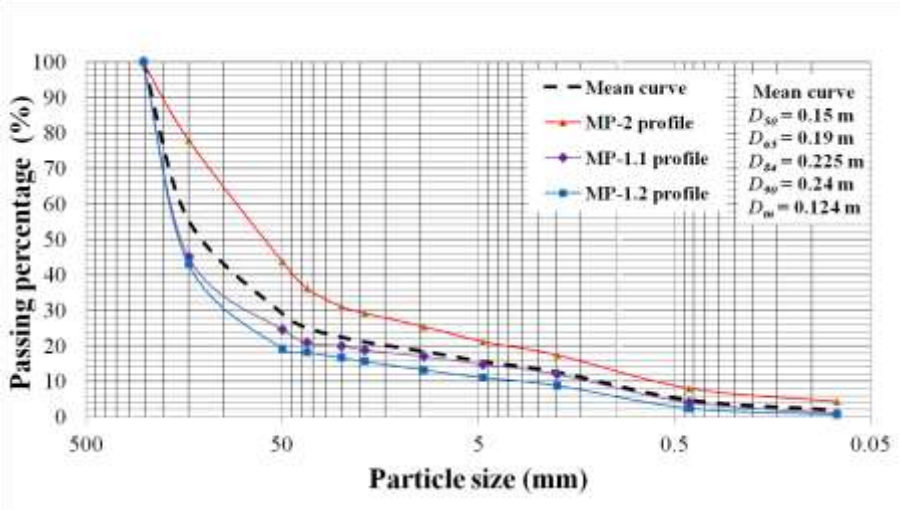
Four aspects were checked:

-Macro roughness: $\frac{y}{D_{84}} < 50$

-Resistencia formas de fondo: $\frac{R_h}{D_{50}} > 2000$

-Flujo hiperconcentrado: $C < 0.10$

- Armado de lecho: $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}} > 3$



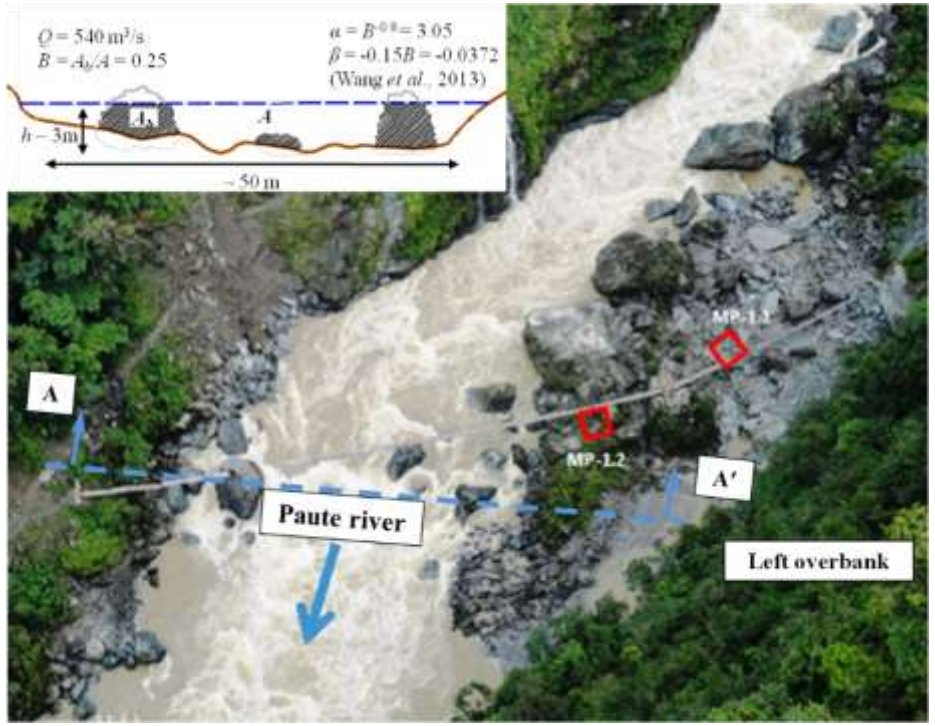
Estimación coeficientes de Resistencia

Resistencia presencia rocas (bloqueo). Factor bloqueo: $B=A_b/A$, Wang et. al (2013):

$$n_b = \alpha[(1-B)^{\beta} - 1]$$
$$\alpha = B^{-0.8}; \quad \beta = -0.15B$$

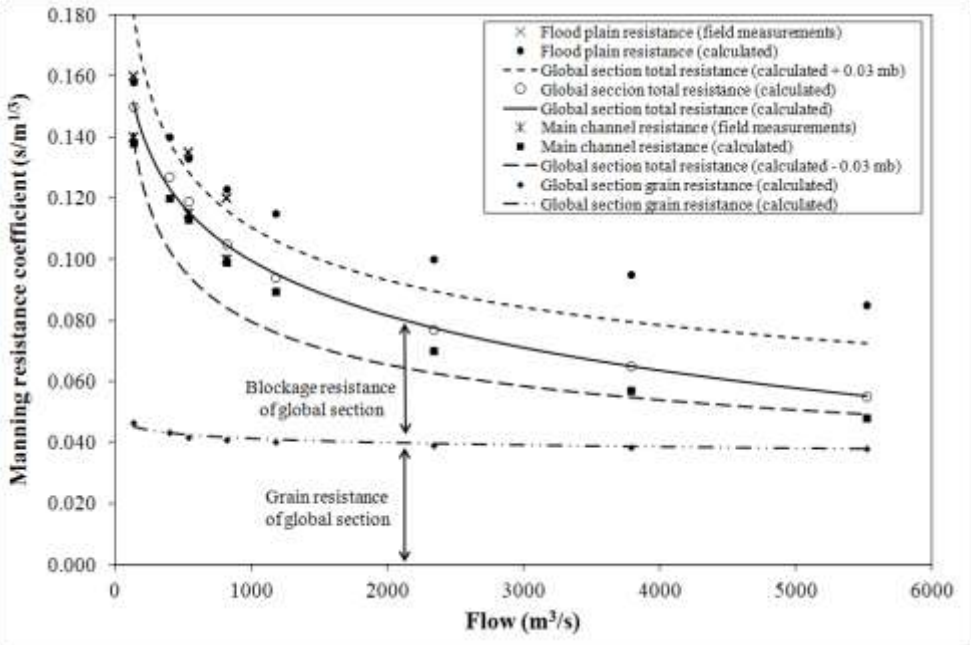
Resistencia total (Palt, 2001):

$$n_{tot} = 10S^{0.36}\sqrt{n_s^2 + n_b^2}$$



Niveles medidos en campo para caudales de 136, 540 y 820 m³/s

➔Coeficientes Resistencia canal principal y planicies inundación calibrados con HEC-RAS.



Simulación numérica sedimentación embalse

Cambio nivel de fondo Z_b, se calcula con ecuación de balance de masa del sedimento de fondo (Ecuación de Exner):

$$(1\text{-}p)\frac{\partial Z_b}{\partial t}+\frac{\partial Q_{bs}}{\partial s}+\frac{\partial Q_{bn}}{\partial n}=0$$

p, porosidad material de fondo.

Q_{bs} y Q_{bn} - flujo de material de fondo en la dirección principal (s) and transversal (n), calculado desde equación transporte de fondo en condiciciones de no-equilibrio:

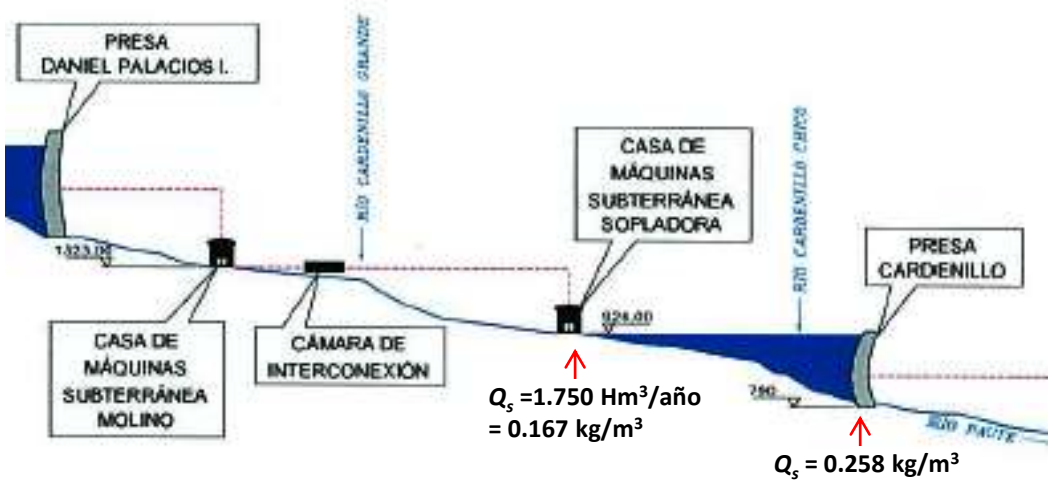
$$\frac{\partial(Q_b\alpha_{bs})}{\partial s}+\frac{\partial(Q_b\alpha_{bn})}{\partial n}=-\frac{1}{L_s}(Q_b\text{-}Q_e)$$

α_{bs} y α_{bn} - vectores dirección coseno. Determinan las componentes de transporte de fondo en direcciones s y n.

Efectos de no-equilibrio son proporcionales a la diferencia entre transporte de fondo en no-equilibrio, Q_b y transporte de fondo en equilibrio, Q_e. Esto se relaciona con longitude de adaptación de no-equilibrio, L_s.

Simulación 1D: Programa HEC-RAS

• Caudal medio anual (Q_{ma}=136.3 m^3/s) equally distributed in 23 km.

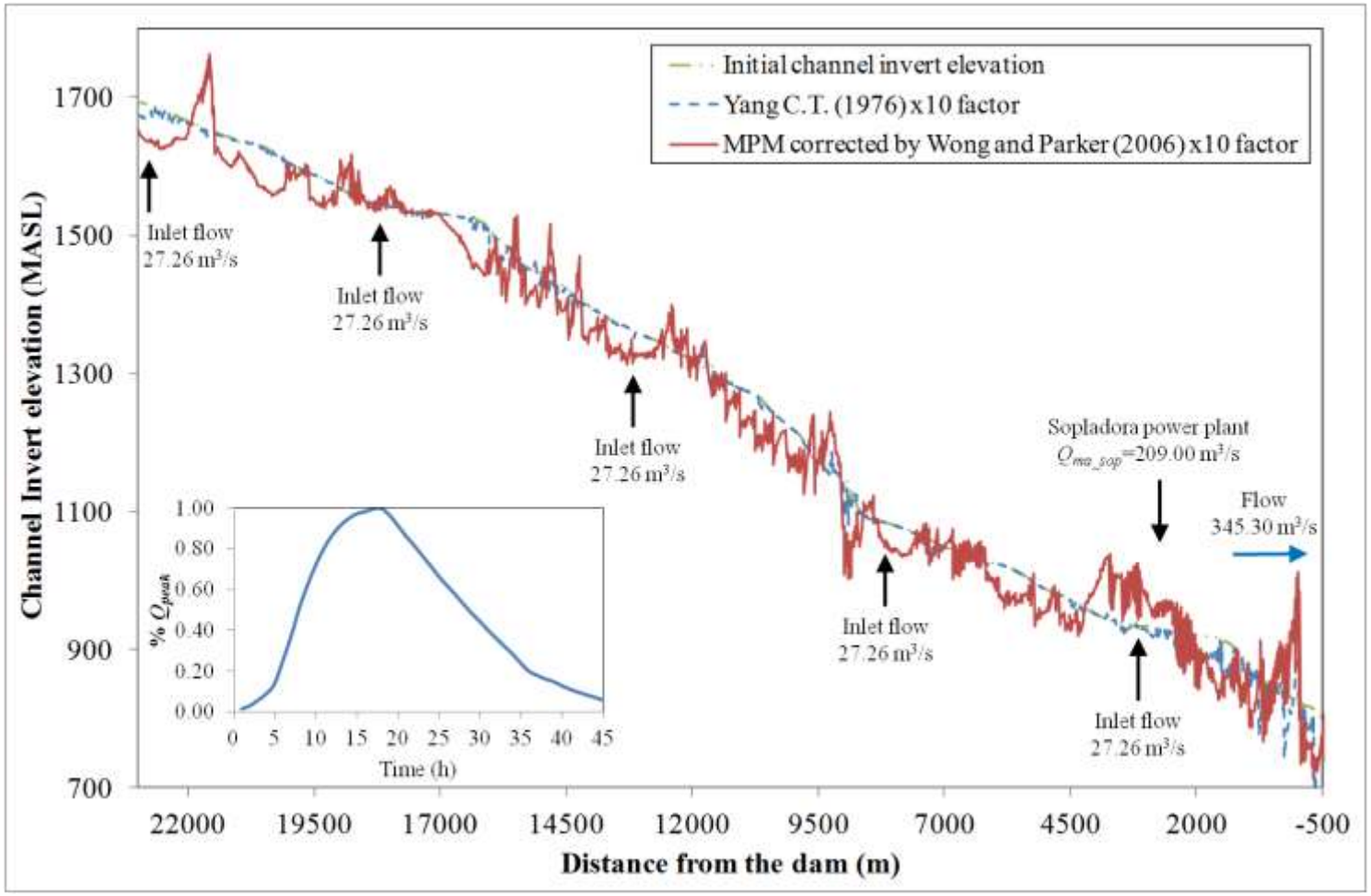


Caudal (m^3/s)	Sediment volume (Hm^3/año)
Q_{ma} = 136.3	0.430
$Q_{Sopladora}$ = 209	1.000
$Q_{base} = Q_{ma} + Q_{sopladora}$ = 345	1.750

• Fórmulas de Meyer-Peter and Müller (1948) corregido por Wong y Parker (2006) y Yang (1976).

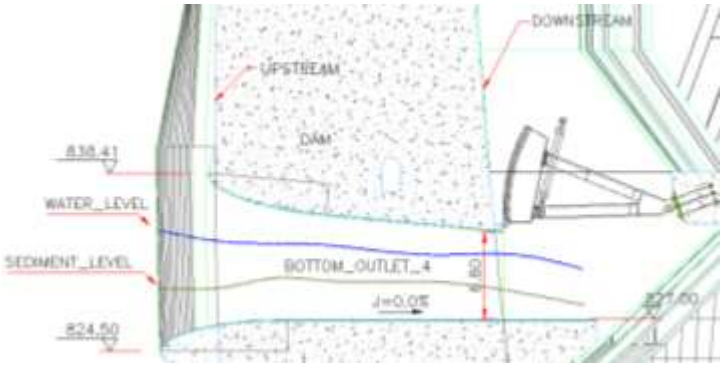
Simulación 1D: Programa HEC-RAS

- Hidrograma de referencia, tres veces el caudal medio anual



Simulación numérica sedimentation embalse

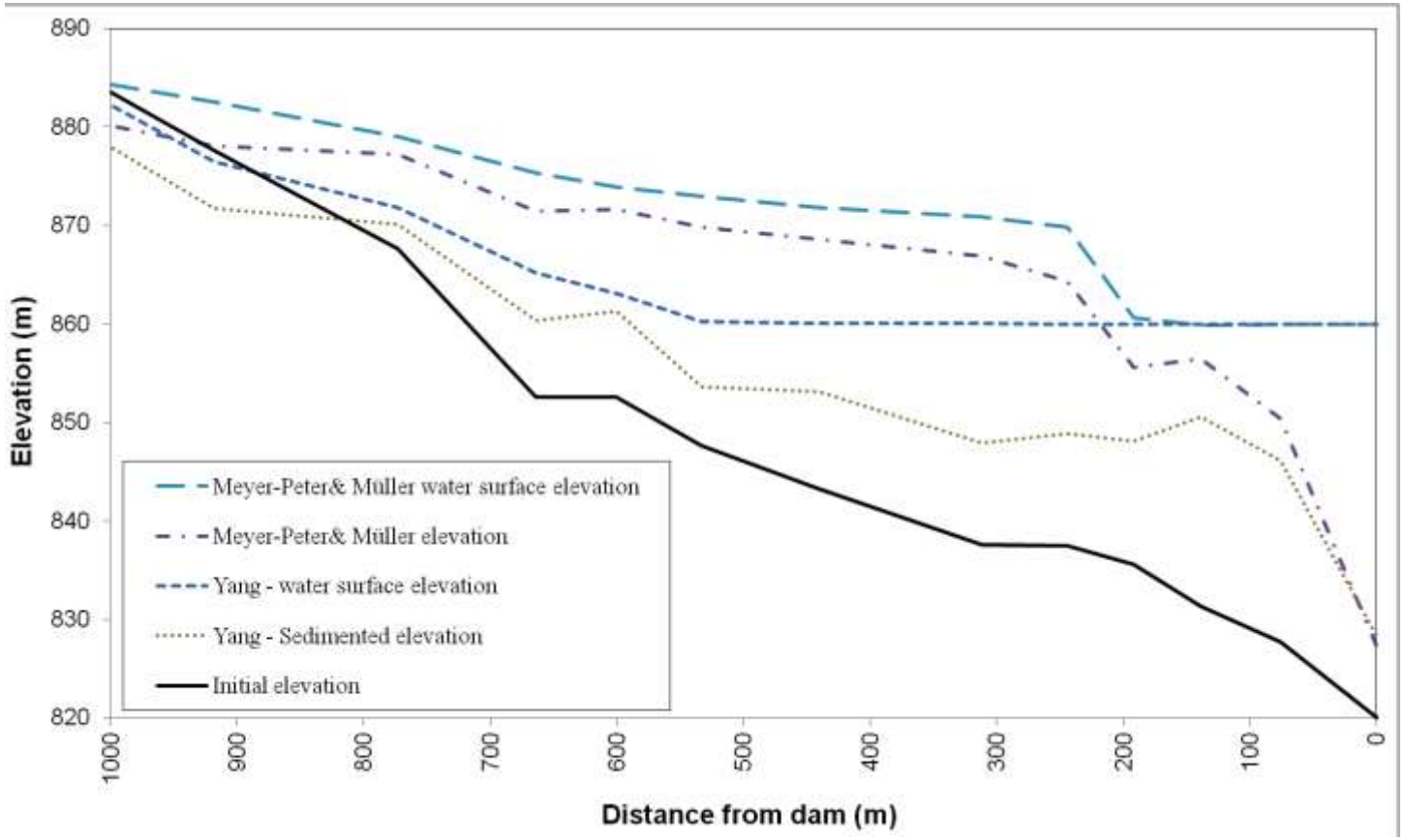
Tiempo y volumen cuando sedimentos alcanzan desagües de fondo (827 m.s.n.m)



	YANG		MEYER-PETER & MÜLLER	
NIVEL EMBALSE	**TIEMPO (AÑOS)**	**VOL. SEDIMENTOS (hm^3)**	**TIEMPO (AÑOS)**	**VOL. SEDIMENTOS (hm^3)**
860	**0.36**	**0.65**	**0.33**	**1.47**
892	5.10	2.77	2.58	3.86
918	12.90	6.07	8.80	7.34
920	13.60	6.33	9.50	7.64
924	14.80	6.62	10.90	8.97

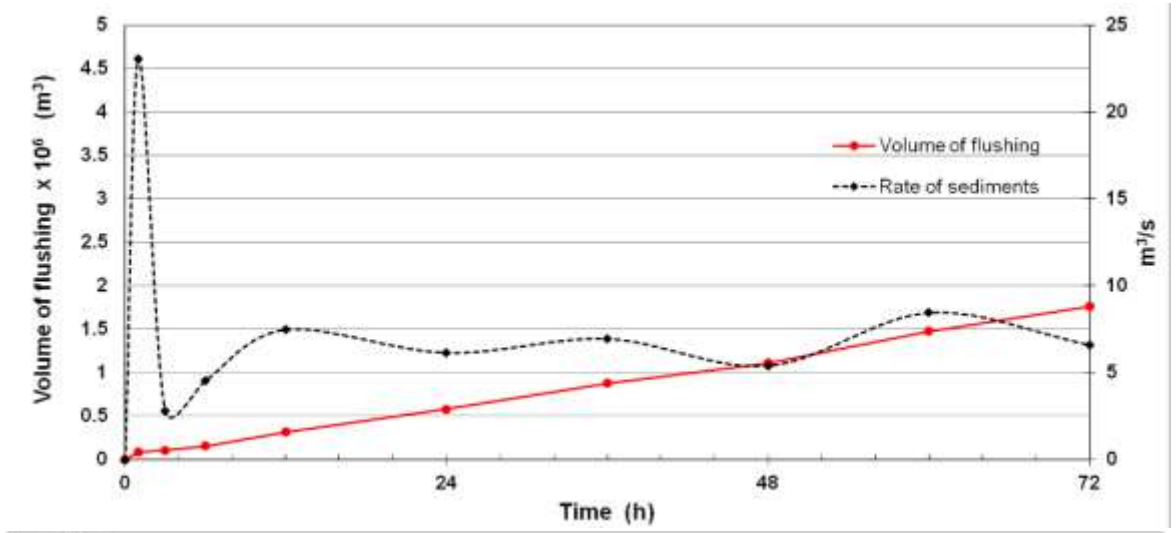
Simulación numérica sedimentation embalse

Tiempo y volumen cuando sedimentos alcanzan desagües de fondo (827 m.s.n.m)

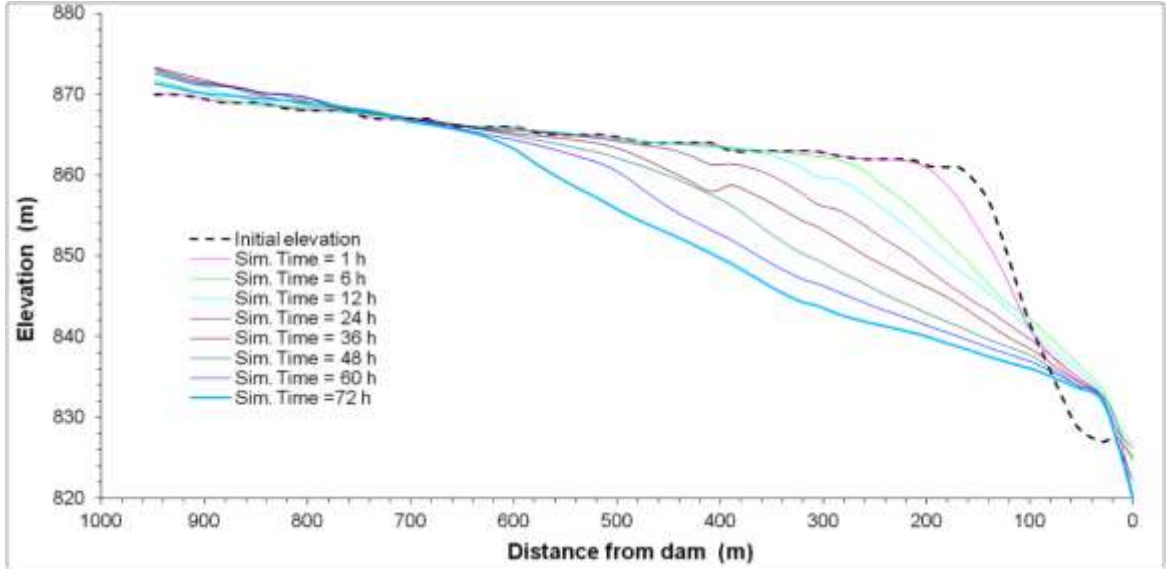


Operación flushing : Programa bidimensional Iber

- Iber v1.9.
- Malla no estructurada y esquema en volúmenes finitos.
- Módulo hidrodinámico resuelve ecuaciones de agua poco profunda "shallow water equations" (ecuaciones 2D Saint-Venant).
- Modelo de turbulencia: k-ε.
- Nivel inicial embalse: 860 m.sn.m
- Condición inicial perfil sedimentación: simulación 1D HEC-RAS (1.47 hm^3 sedimento)
- Módulo transporte sedimentos: Meyer-Peter & Müller y van Rijn .



Excepto instante inicial, desagües de fondo funcionan en superficie libre



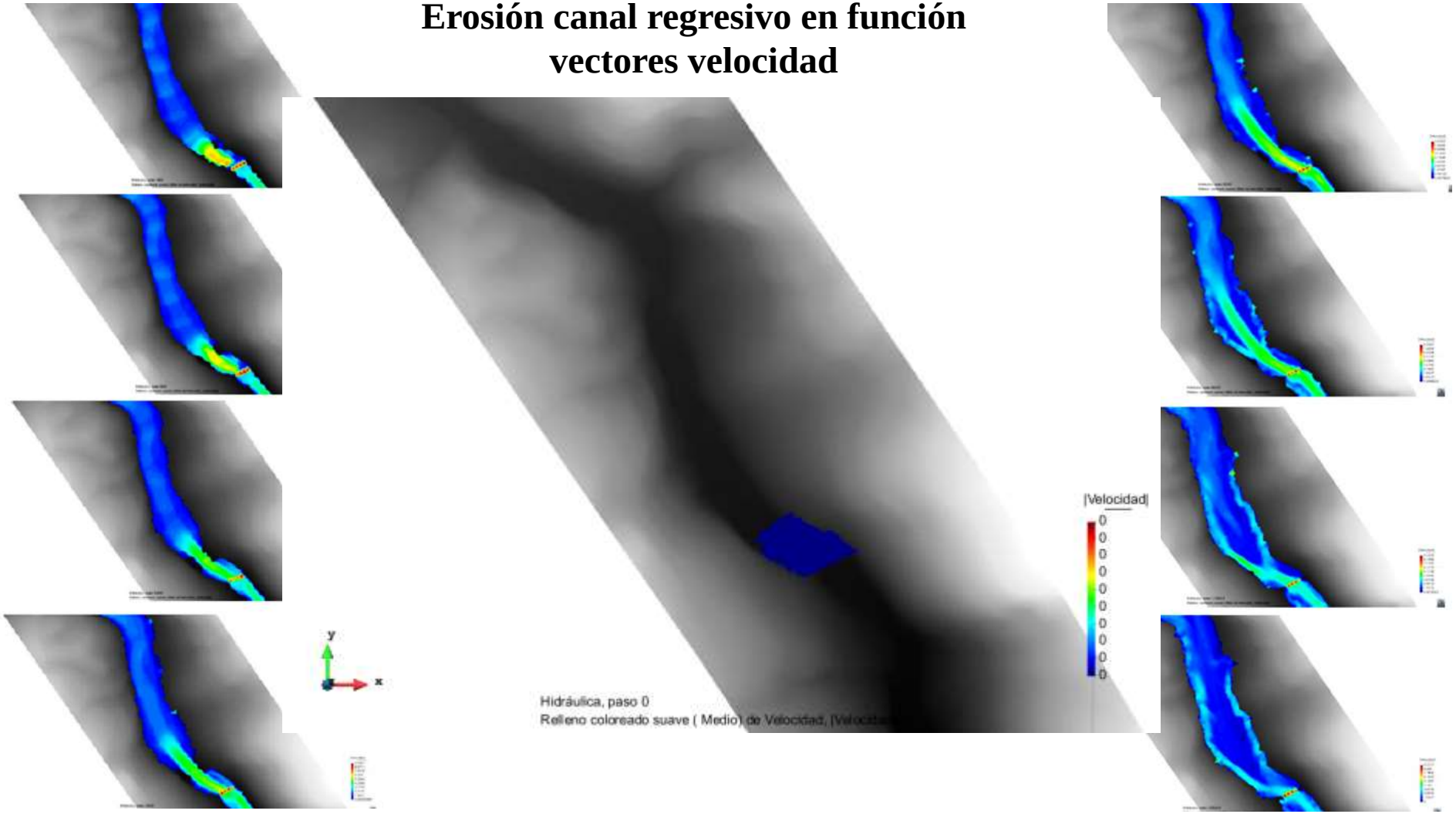
Nivel sedimentos antes y después de período de flushing de 72 hours.

A las 72 h se puede movilizar un volume de 1.77 hm^3.

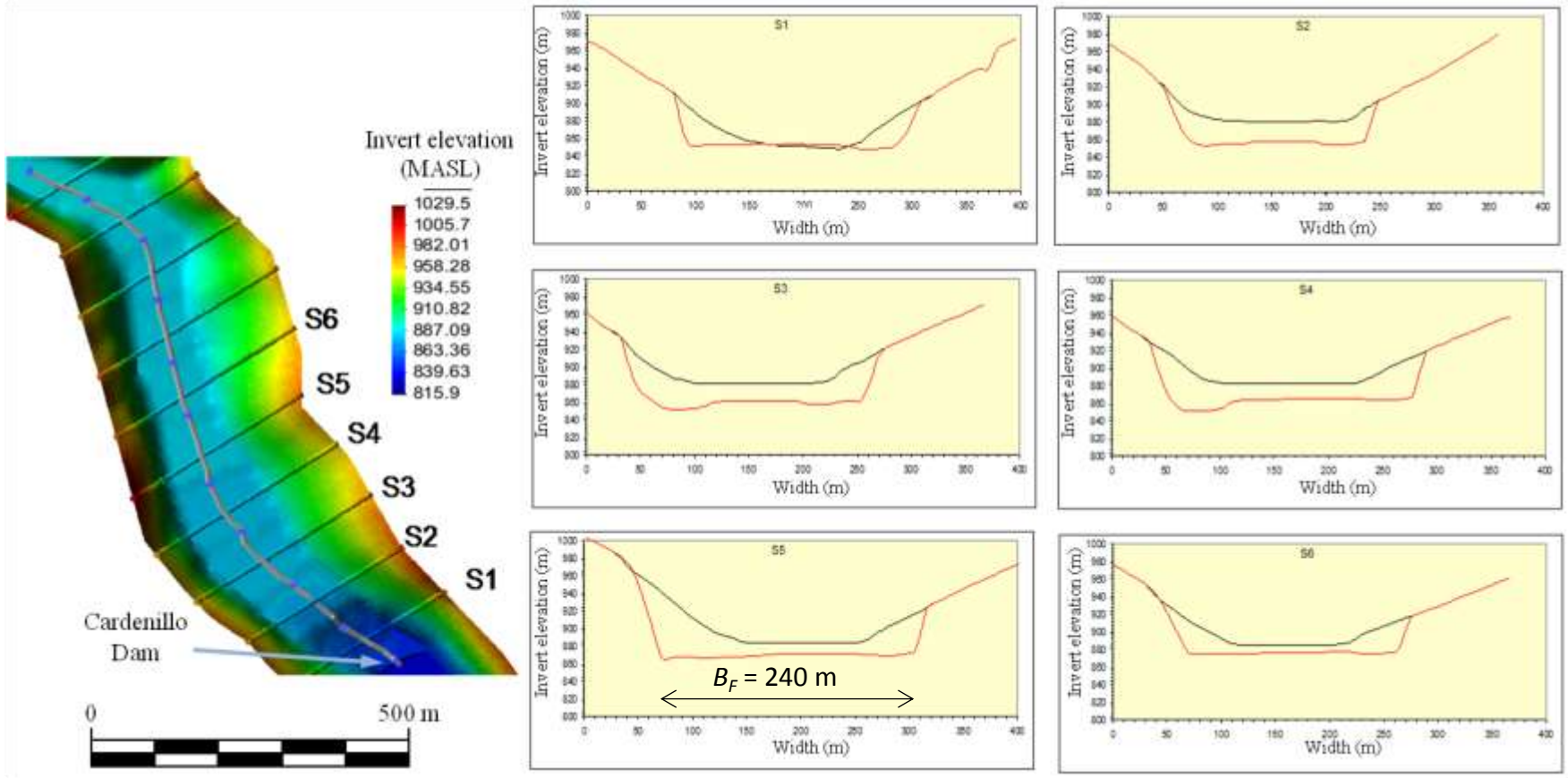
Erosión canal regresivo en función vectores velocidad

0.5, 1, 3 and 6 hours

12, 24, 48 and 72 hours



Formación canal erosion regresivo después período 72 h



$$B_F \sim (11 - 12)\,(Q_{ca})^{0.50}\ ; \quad B_F = 11.87\,(409)^{0.50} = 240 \text{ m}$$

Operación flushing : Simulación 3D

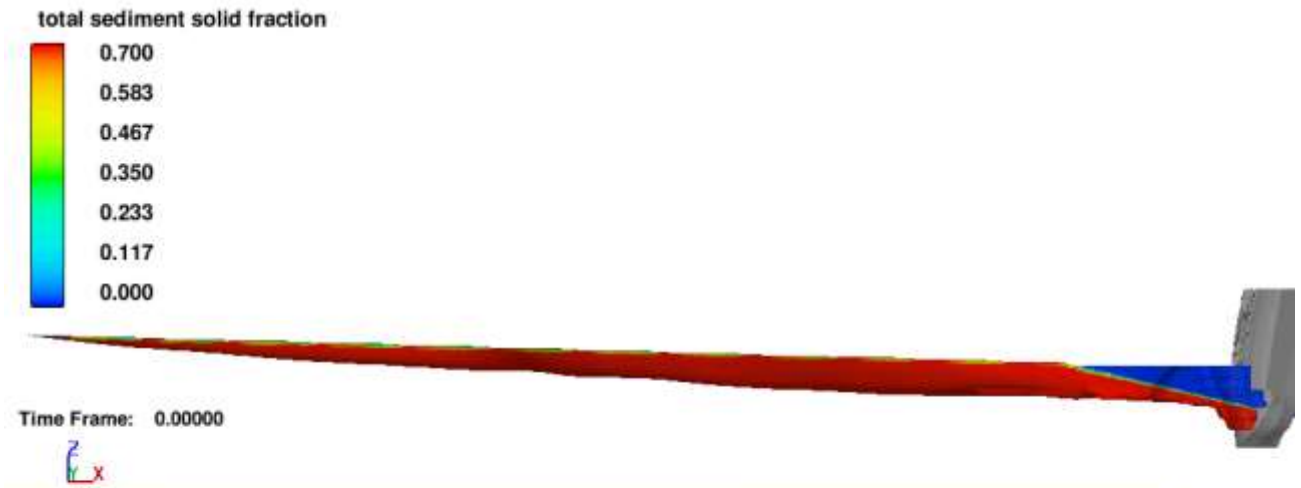
- FLOW-3D v11.0.
- Ecuaciones Navier-Stokes se discretizan en diferencias finitas.
- Various modelos de turbulencia, un modelo transporte sedimentos y un modelo empírico de erosion de fondo, junto con método cálculo superficie libre fluido.
- Cierre de ecuaciones de Navier-Stokes equations con modelo turbulencia (RNG) k-ξ.
- Transporte fondo: Meyer-Peter & Müller.
- Condiciones iniciales sedimentación obtenido con HEC-RAS.

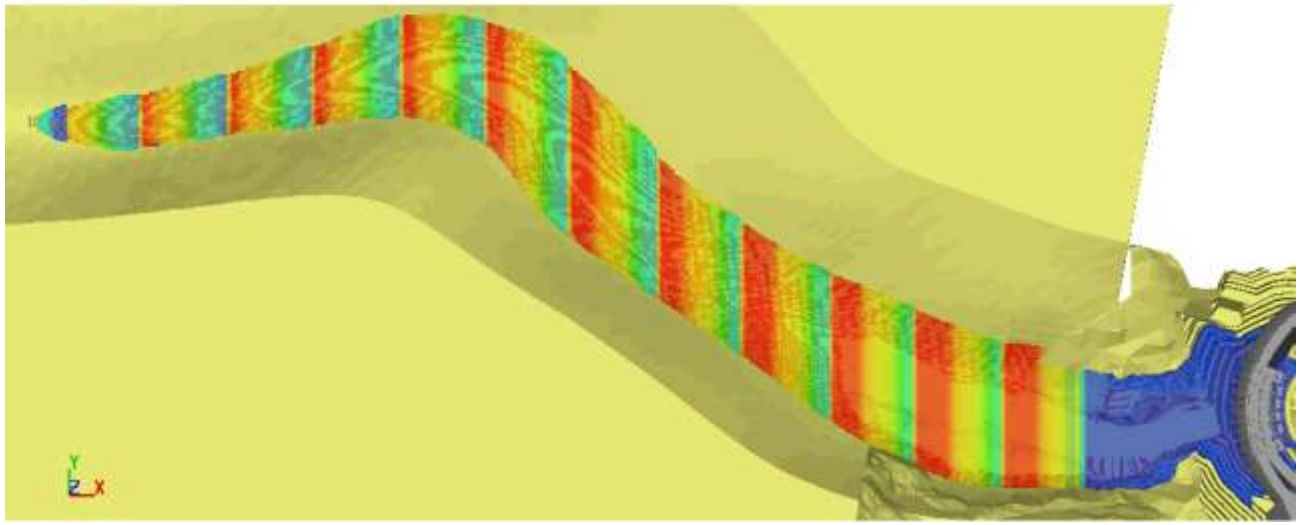
Procesador:
- Intel(R) Core(TM) i7-2600
- CPU@3.40 GHz
- RAM 24.0GB
- Núcleos: 8

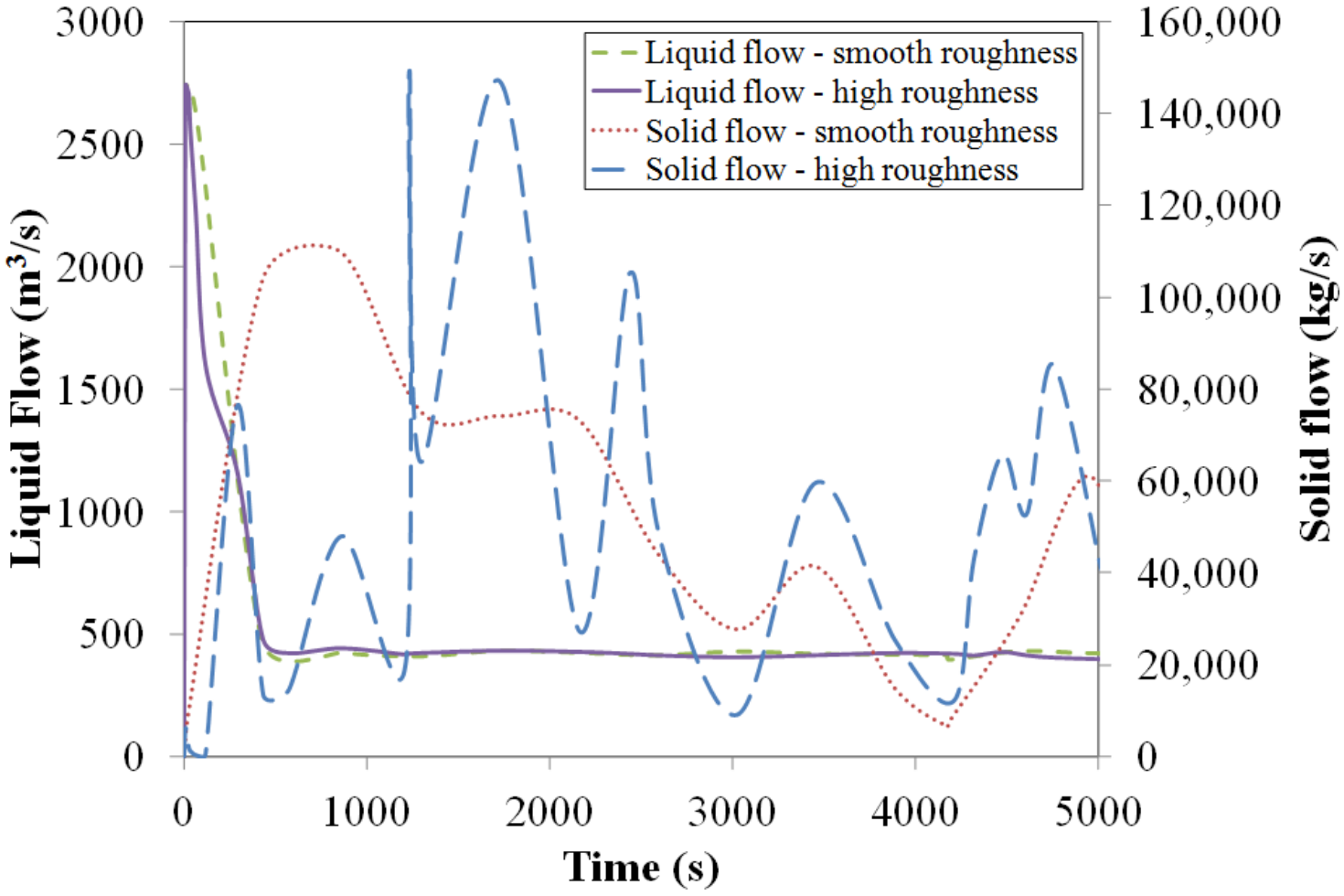
Longitud embalse: 1050 m

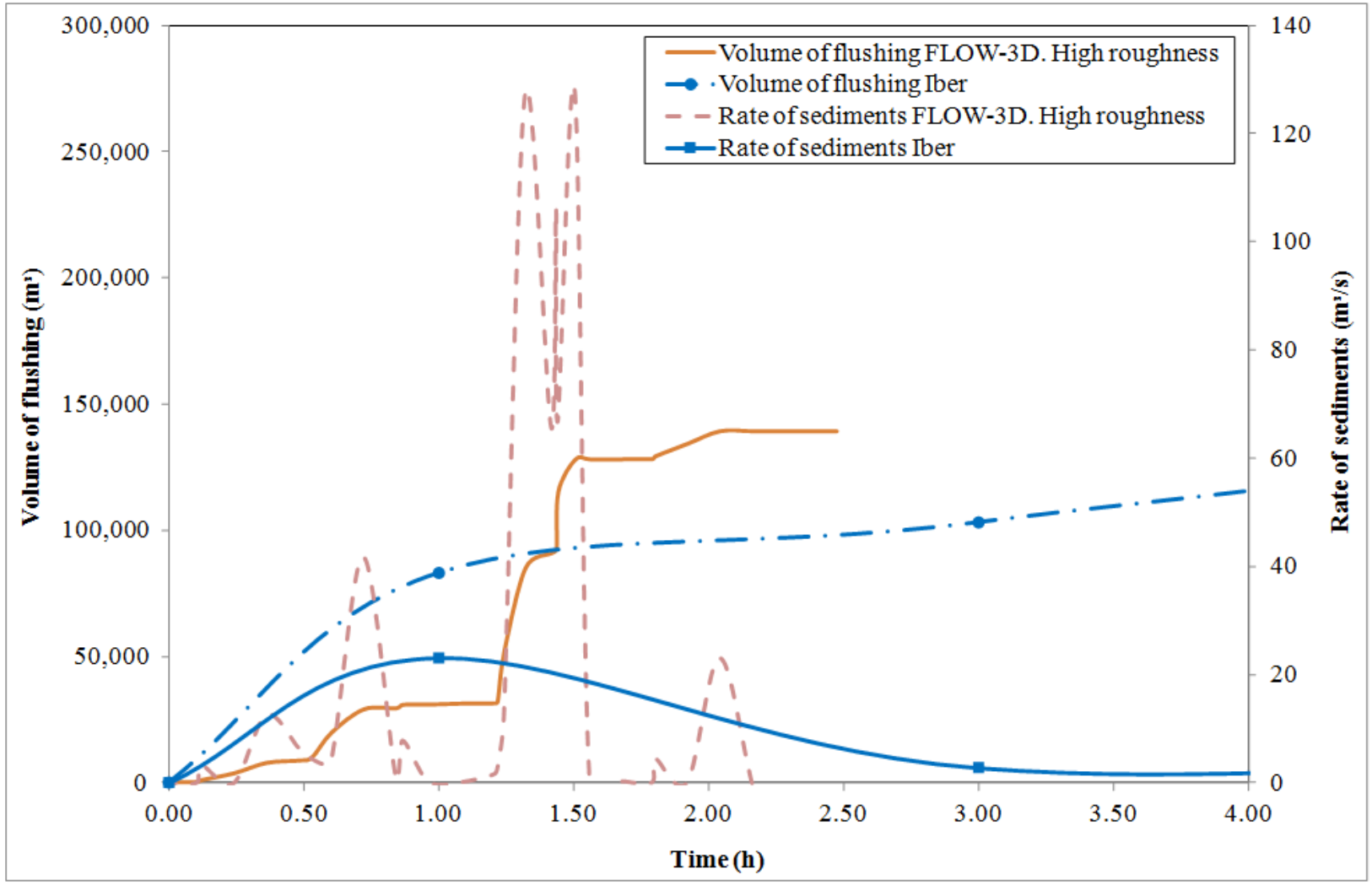
Mallado:
- Embalse: 2m
- Zonas próximas a presa: 1 m (desagües de fondo 5 mx6.80 m)
- Células activas: 827 293
- Paso cálculo: 0.025 s

- Primeras 10 h de flushing requiere 343 h tiempo real cálculo
-72 h flushing → ≈ 100 days






Liquid flow - smooth roughness
Liquid flow - high roughness
Solid flow - smooth roughness
Solid flow - high roughness
Liquid Flow (m³/s)
Solid flow (kg/s)
Time (s)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
0
20,000
40,000
60,000
80,000
100,000
120,000
140,000
160,000
0
1000
2000
3000
4000
5000


Volume of flushing FLOW-3D. High roughness
Volume of flushing Iber
Rate of sediments FLOW-3D. High roughness
Rate of sediments Iber
Volume of flushing (m³)
Rate of sediments (m³/s)
Time (h)
300,000
250,000
200,000
150,000
100,000
50,000
0
140
120
100
80
60
40
20
0
0.00
0.50
1.00
1.50
2.00
2.50
3.00
3.50
4.00

Conclusions

Estimaciones empíricas constituyen envolvente superior capacidad transporte sedimento. Procedimeinto permite estimar coeficientes de resitencia.

Período tiempo (un año) y longitud tramo (23.128 km), proceso se simuló con programa 1D (HEC-RAS).

Operación “Flushing” se simuló con programa 2D (Iber) y 3D (FLOW-3D). Simulación tridimensional para analizar comportamiento flujo en primeros instantes proceso.

Resultados simulaciones 2D están del lado de seguridad. Requiere menor tiempo computacional para remover el mismo volume de sedimentos que con simulación 3D (teóricamente más preciso).

Calibración modelo numérico con medidas modelo físico.