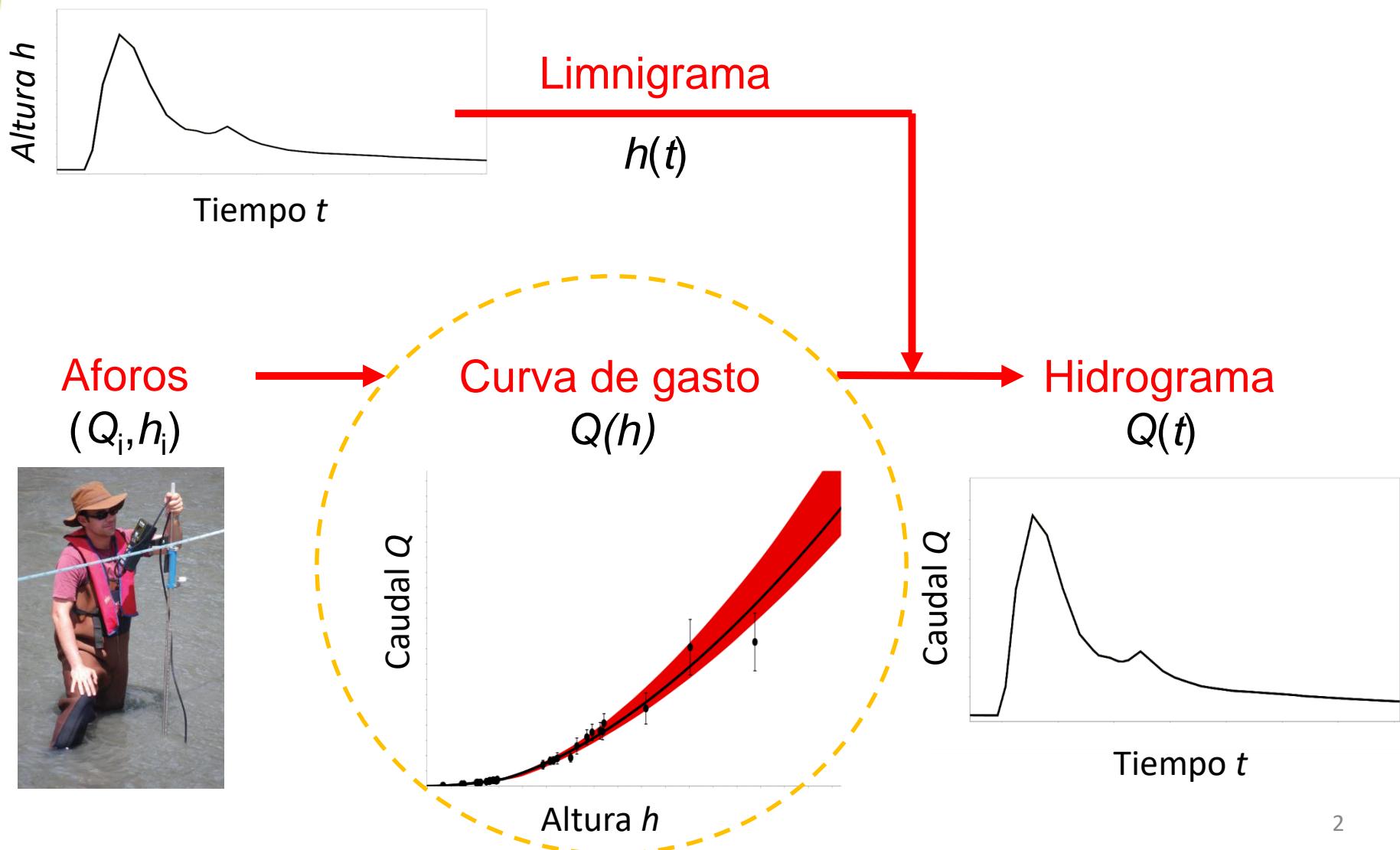


Establecer una curva de gasto y un hidrograma con incertidumbres: trabajo práctico con el software BaRatin

Jérôme LE COZ, Felipe MENDEZ-RIOS
INRAE, UR RiverLy, Hidraulica de los Ríos, Lyon, Francia

Producir series hidrométricas *probabilísticas*



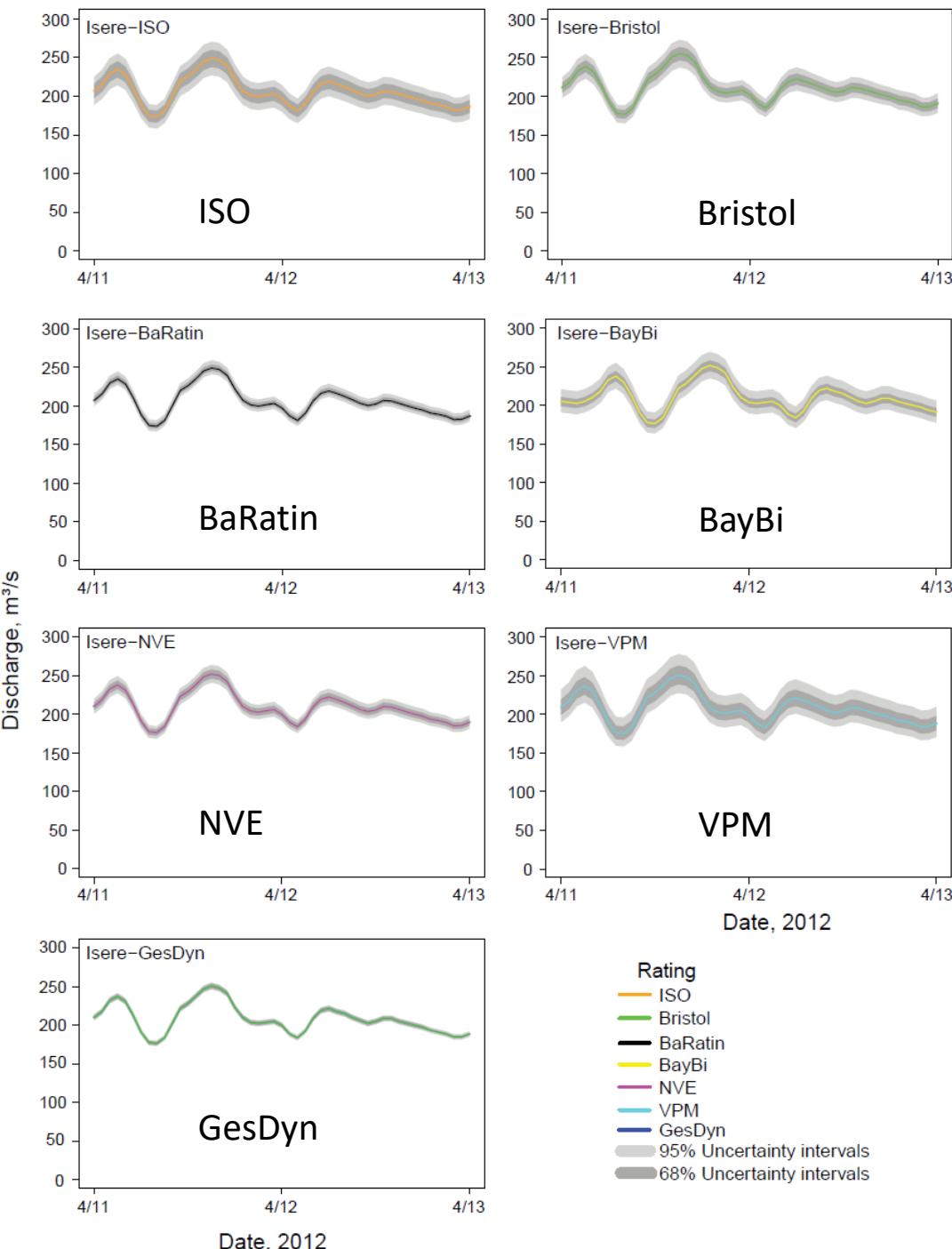
Intercomparación de 7 métodos

Dificultad para comparar y homogeneizar los métodos.

El significado de los resultados depende de las hipótesis realizadas por cada método.

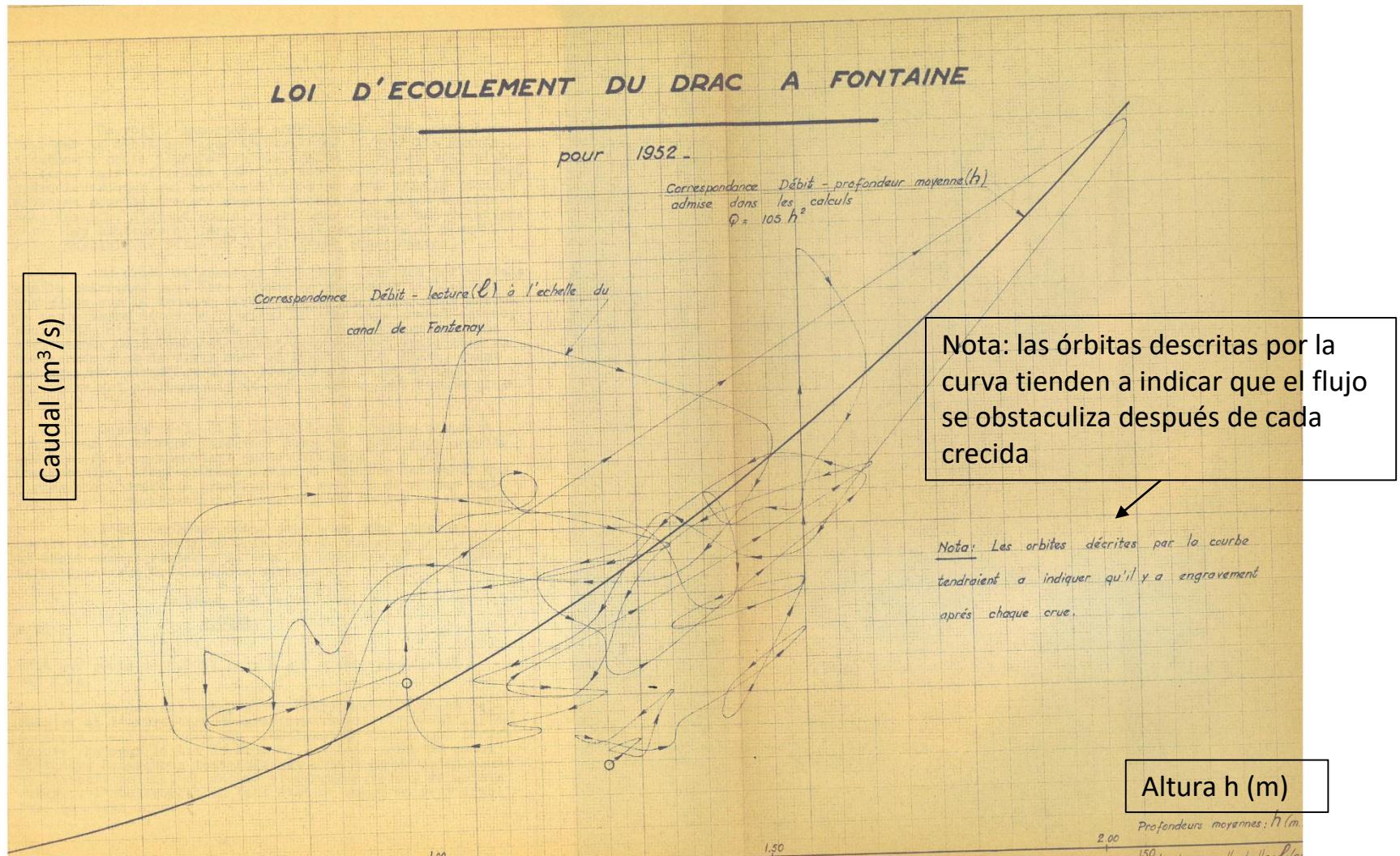
Intervalos de incertidumbre del 95% para los hidrogramas del río Isère, Grenoble.

Kiang et al., WRR (2018)



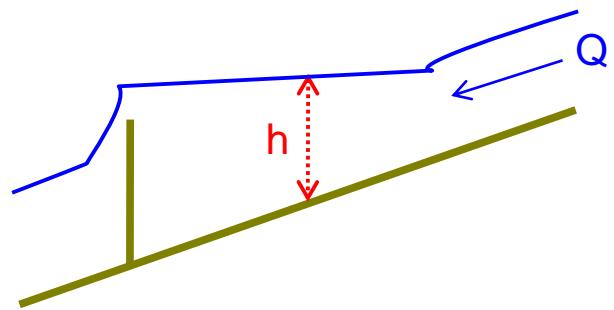
Controles hidráulicos

¿Por qué necesitamos una base física para las curvas de gastos?



Controles hidráulicos

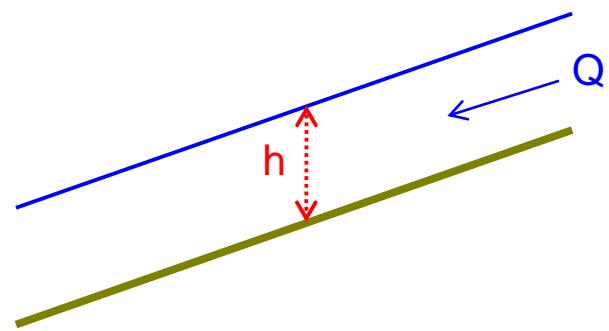
- Propiedades físicas de un canal que determinan la relación entre la altura y el caudal en un punto (OMM, 2012).



Control hidráulico tipo sección

Controles hidráulicos

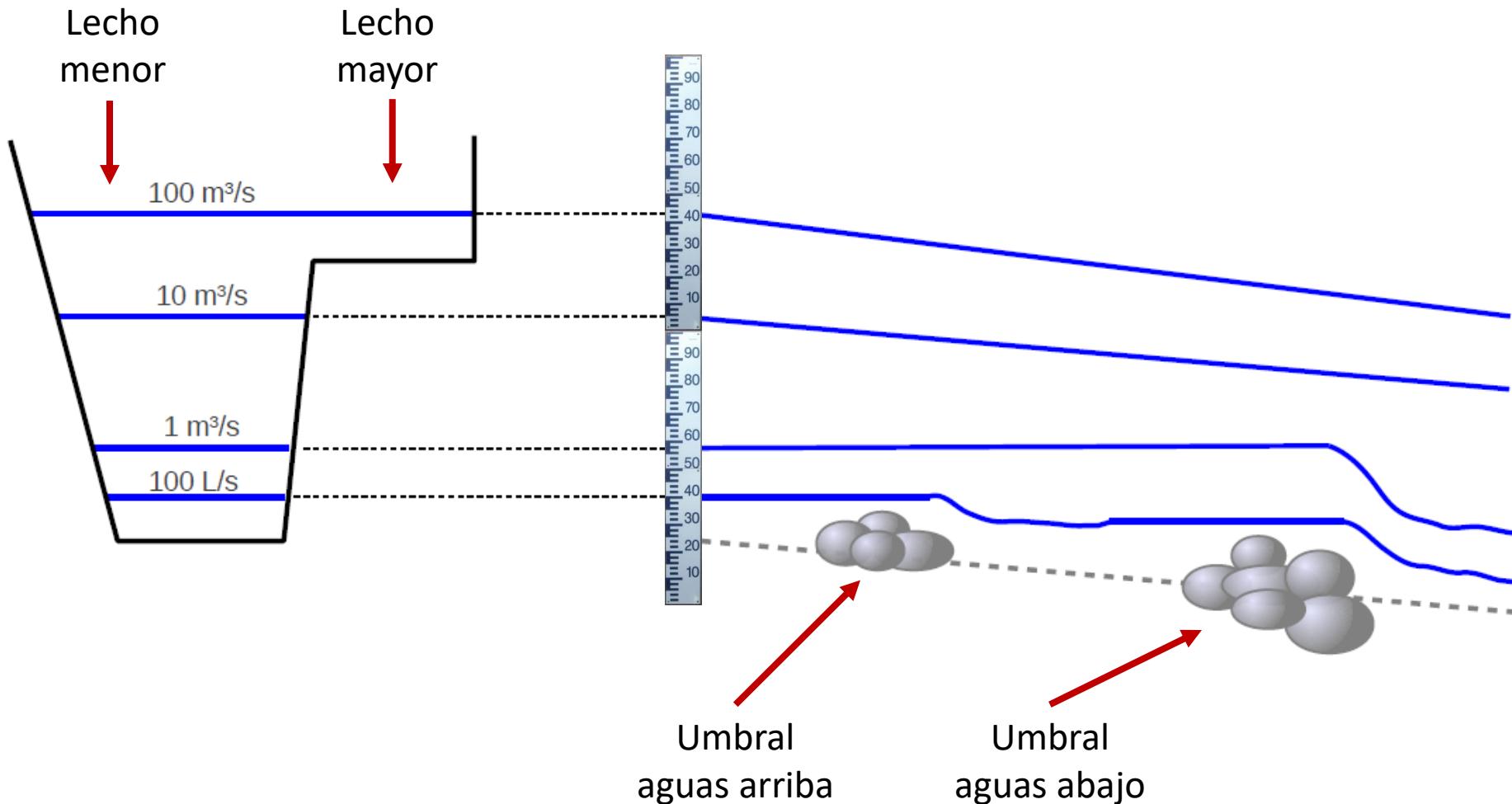
- Propiedades físicas de un canal que determinan la relación entre la altura y el caudal en un punto (OMM, 2012).



Control hidráulico
tipo canal

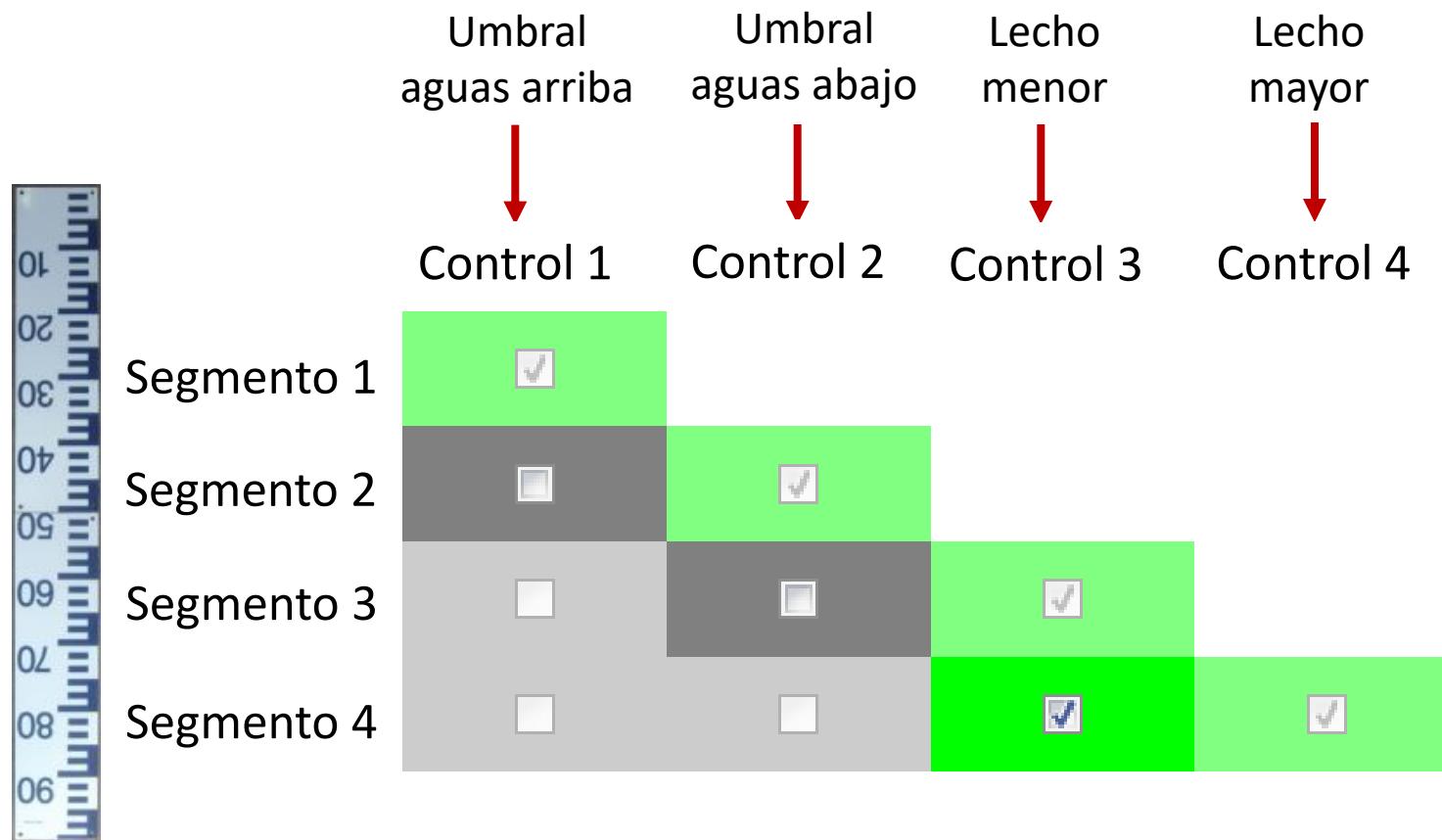
Controles hidráulicos

Los controles se suceden, sustituyendo o añadiendo unos a otros



Controles hidráulicos

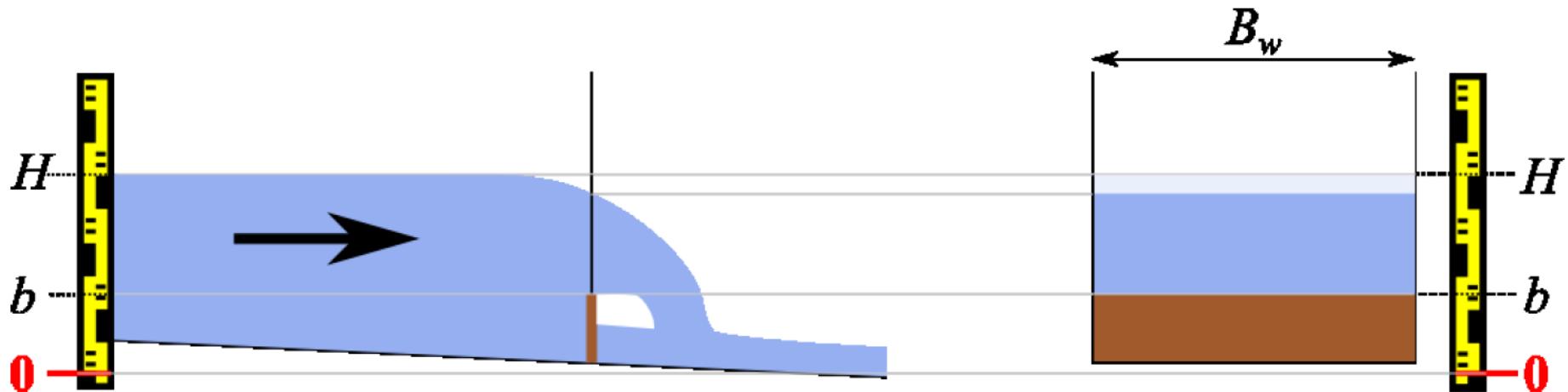
Los controles se suceden, sustituyendo o añadiendo unos a otros



Matriz de controles, o « Matriz de Bonnifait »

Controles hidráulicos tipo en BaRatin

- Vertedero rectangular / vertedero natural (umbral)

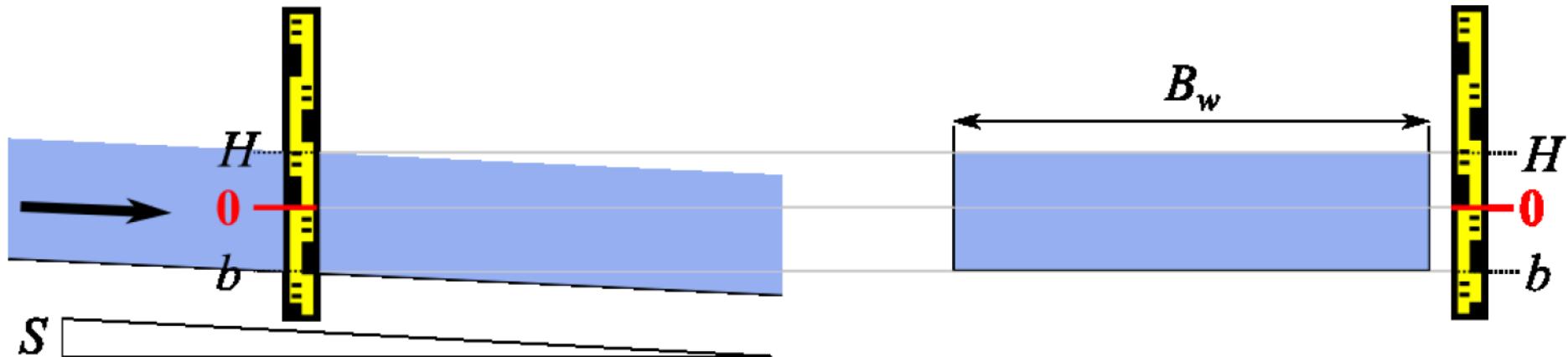


$$Q(H) = C_r \sqrt{2g} B_w (H - b)^c$$

con C_r = coeficiente de descarga, g = gravedad y exponente $c = 1.5$

Controles hidráulicos tipo en BaRatin

- Canal rectangular (régimen uniforme, canal ancho)

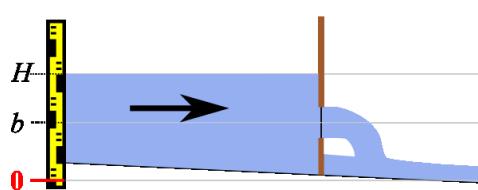
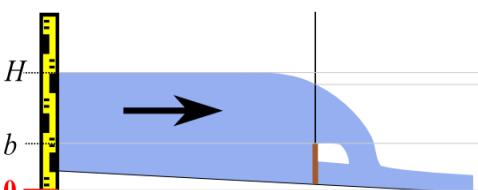
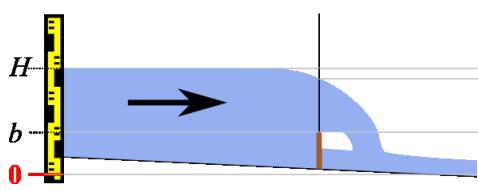
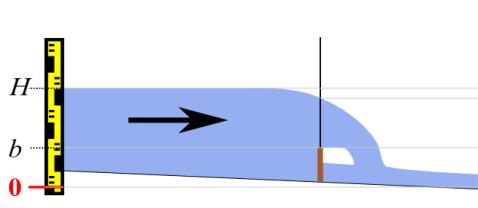


$$Q(H) = K_S \sqrt{S} B_w (H - b)^c$$

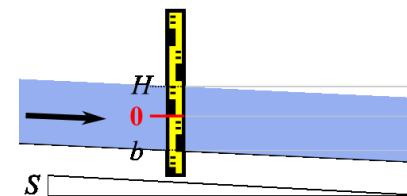
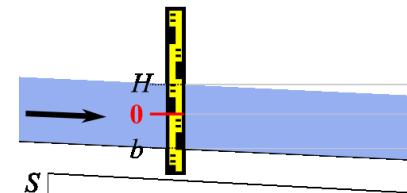
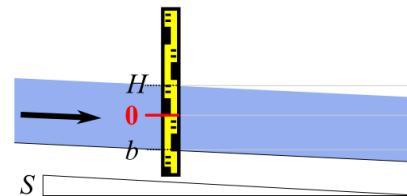
con K_S = coeficiente de Strickler (fricción) y exponente $c = 1.67$

Controles hidráulicos tipo en BaRatin

Control tipo sección



Control tipo canal



Controles “libres”

$$Q = a(h - b)^c$$

Aproximaciones de los controles naturales

Un control tipo canal es modelizado por un canal uniforme equivalente.

- *Atención! La geometría de un control tipo canal es un promedio sobre el tramo que se extiende aguas abajo y aguas arriba de la estación.*



River Derwent, Reino Unido

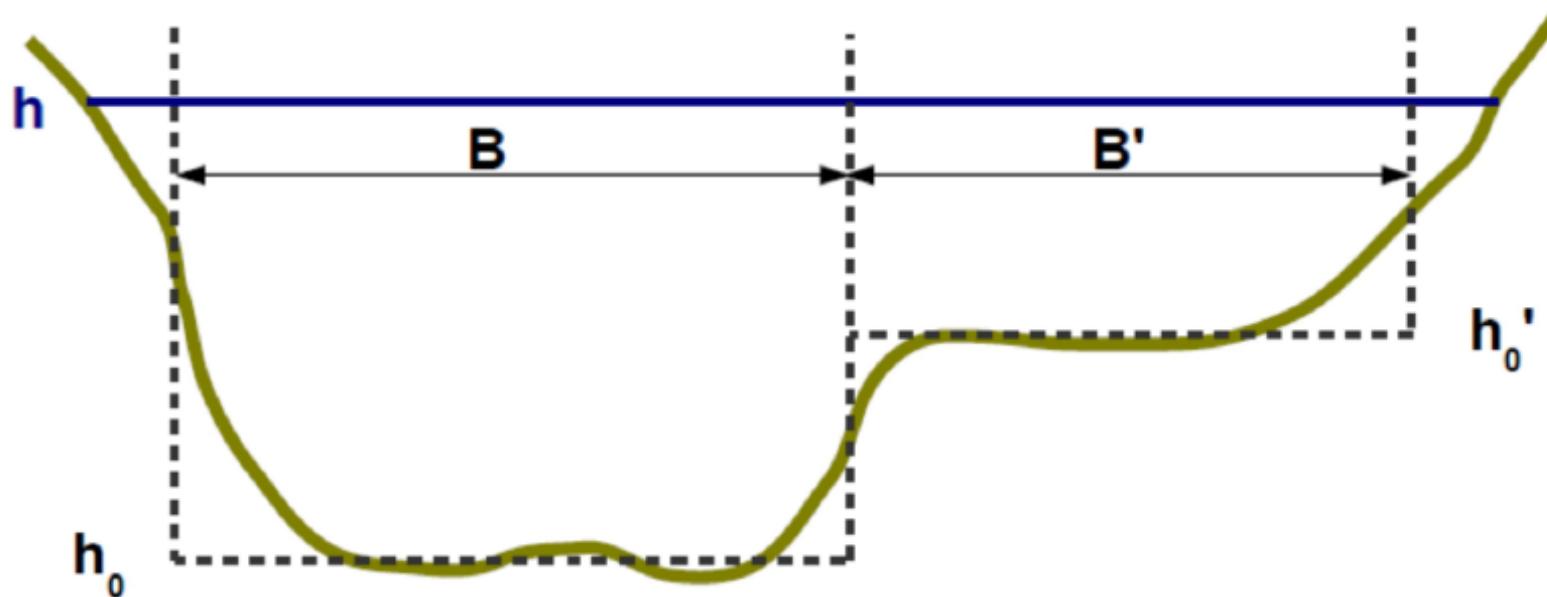
Upper Truckee River, EEUU

Waimakariri, Nueva Zelanda

Aproximaciones de los controles naturales

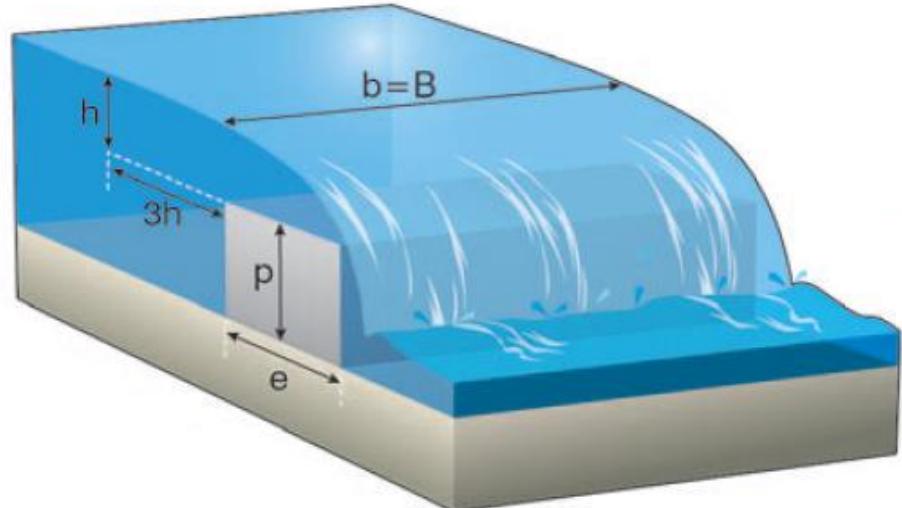
Aproximación de un lecho compuesto por dos canales rectangulares

- *Atención! La geometría de un control tipo canal es un promedio sobre el tramo que se extiende aguas abajo y aguas arriba de la estación.*



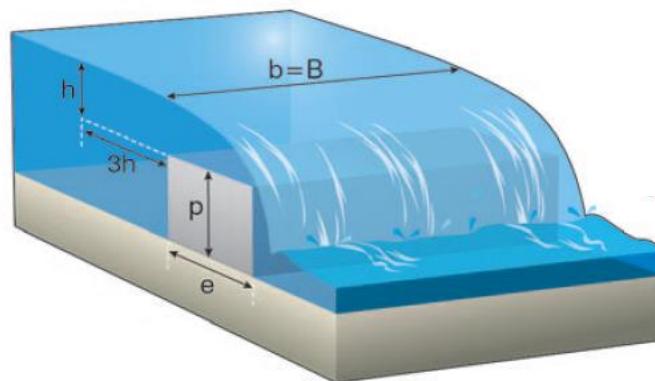
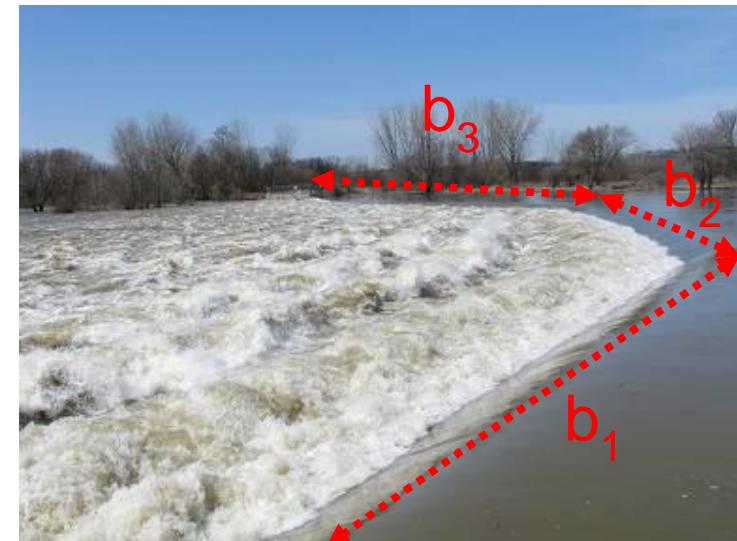
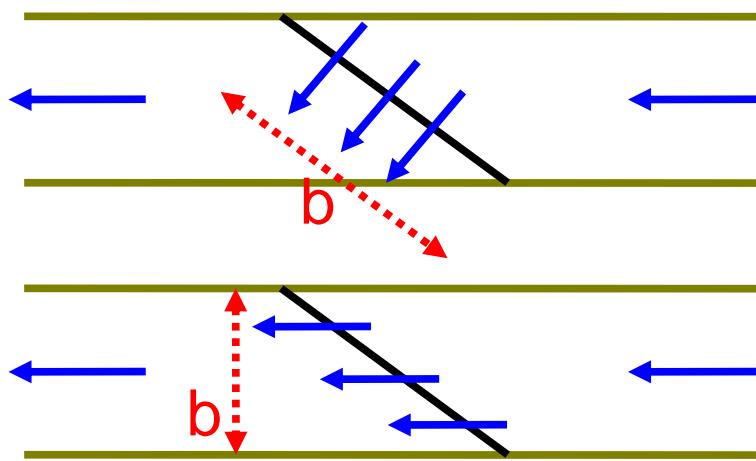
Aproximaciones de los controles naturales

Un control tipo sección es modelizado por un vertedero (espeso o delgado) regular equivalente



Aproximaciones de los controles naturales

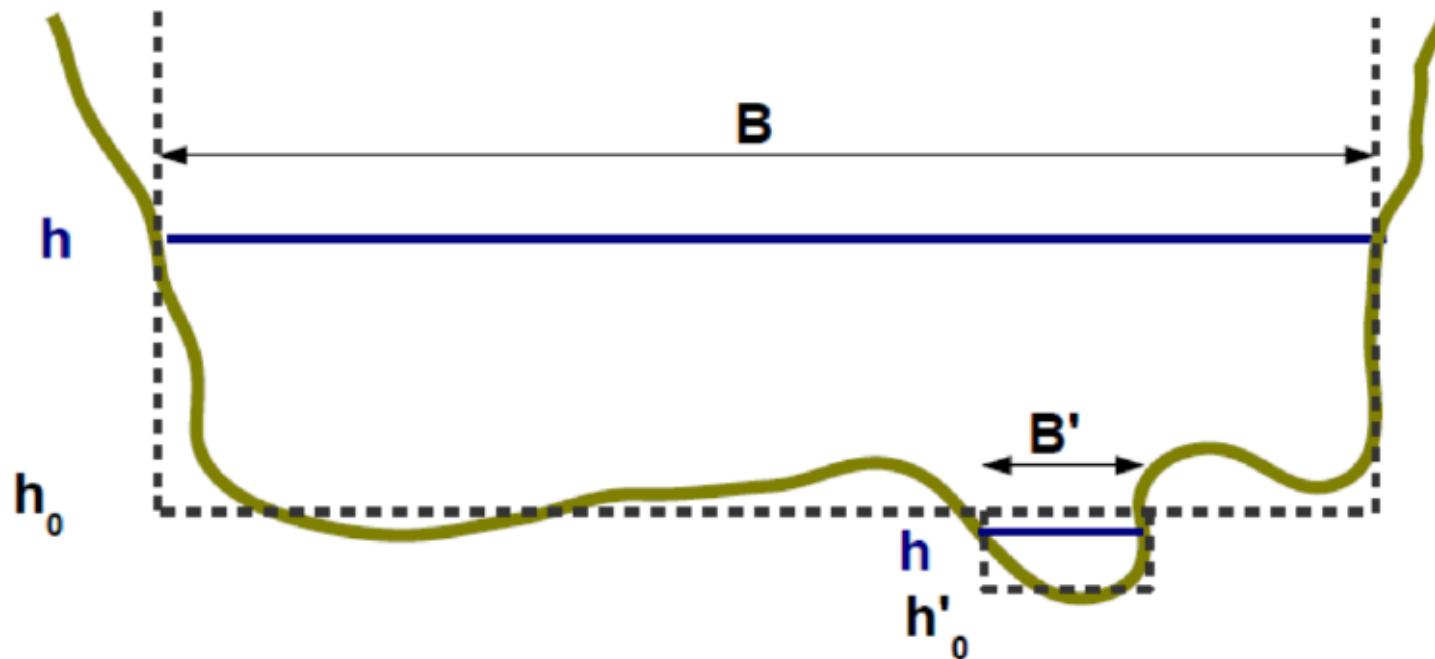
- *Atención! El ancho del vertedero es medido perpendicularmente a la dirección del flujo.*



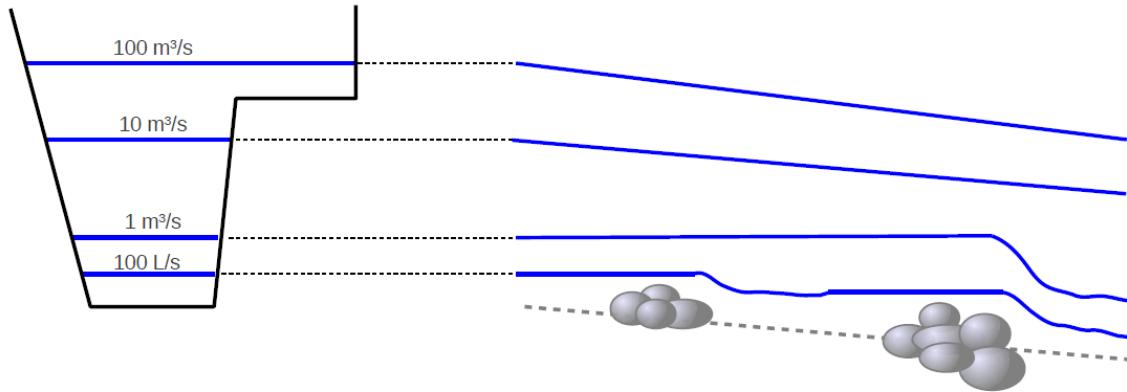
$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

Aproximaciones de los controles naturales

- Aproximación de una sección crítica compleja (umbral) por dos vertederos rectangulares encajados.



Y ahora, qué es lo que hago?...



$$Q(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h < k_1 \\ a_1(h - b_1)^{c_1} & \text{si } k_1 \leq h < k_2 \\ a_2(h - b_2)^{c_2} & \text{si } k_2 \leq h < k_3 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} & \text{si } k_3 \leq h < k_4 \\ a_3(h - b_3)^{c_3} + a_4(h - b_4)^{c_4} & \text{si } k_4 \leq h \end{cases}$$

Calcular :
3 parámetros
por control

Ahora tenemos la ecuación de la curva de gasto...

... Se necesita calcular los parámetros k_i, a_i, c_i (los b_i sont déducidos por continuidad)

La magia de la inferencia bayesiana

*Ahora debemos invocar al
espíritu de Réverend Thomas
Bayes (1702-1761)*



*Además de cualquier
otro poder espiritual a
mano...*



Imagen del Dios Huiracocha en la Puerta del Sol
de Tiahuanaco (Bolivia)

La magia de la inferencia bayesiana



El teorema de Bayes permite calcular la distribución “a posteriori” de los parámetros de la curva de gasto.

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{p(y)}$$

Diagram illustrating the components of the Bayesian formula:

- a posteriori (yellow speech bubble)
- Verosimilitud (yellow speech bubble)
- a priori (yellow speech bubble)
- constante de normalización (yellow speech bubble)

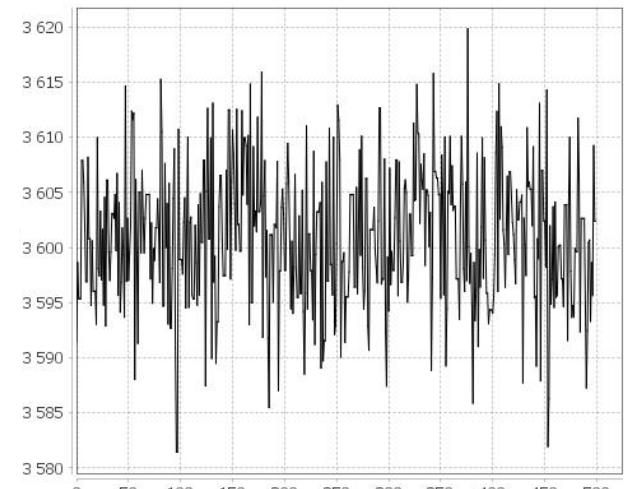
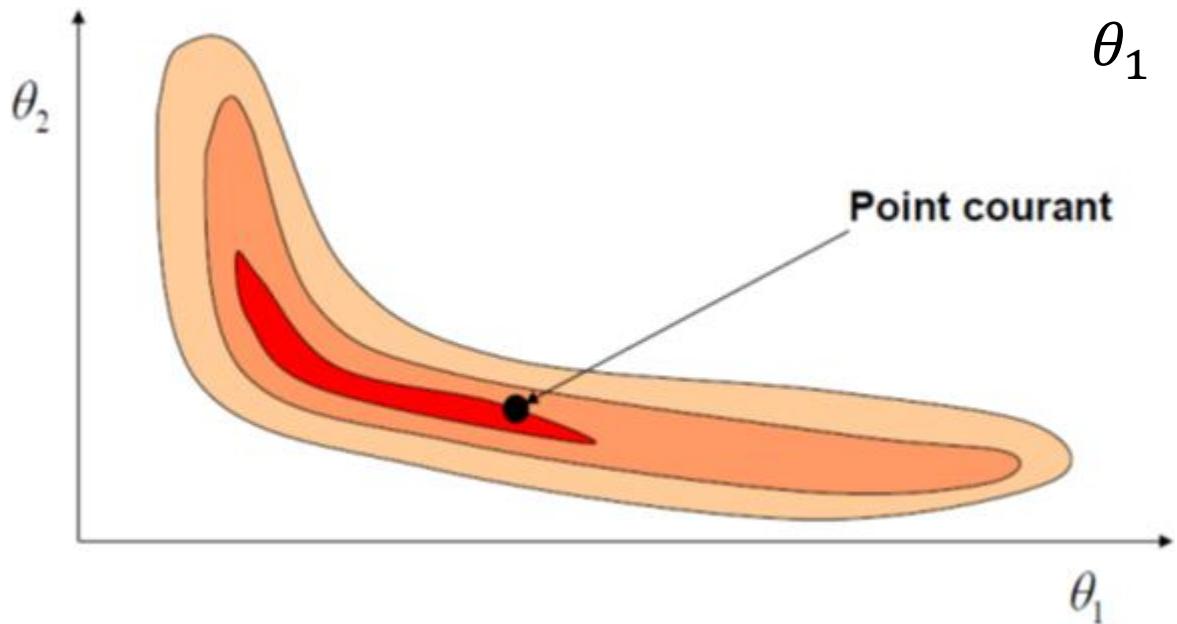
y : observaciones (parejas altura – caudal: los aforos)

θ : parámetros de la curva de gasto

La magia de la inferencia bayesiana



La distribución a posteriori es muestrada por medio de simulaciones via el método de Cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC, algoritmo de Metrópolis)



iteraciones

La magia de la inferencia bayesiana

Ejemplo de un vertedero horizontal : $Q(h) = a(h - b)^c$



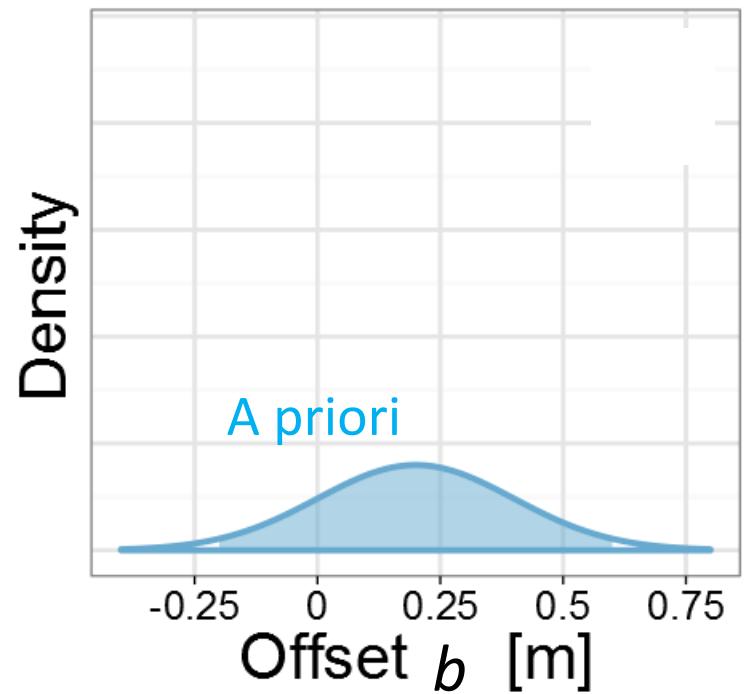
L'Altier en Goulette, Francia (EDF-DTG)

La magia de la inferencia bayesiana

Conocimientos a priori :



$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$



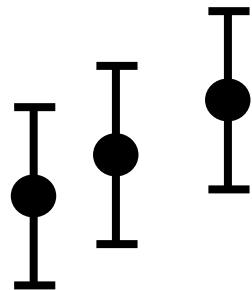
La magia de la inferencia bayesiana

Conocimientos a priori :

A posteriori :

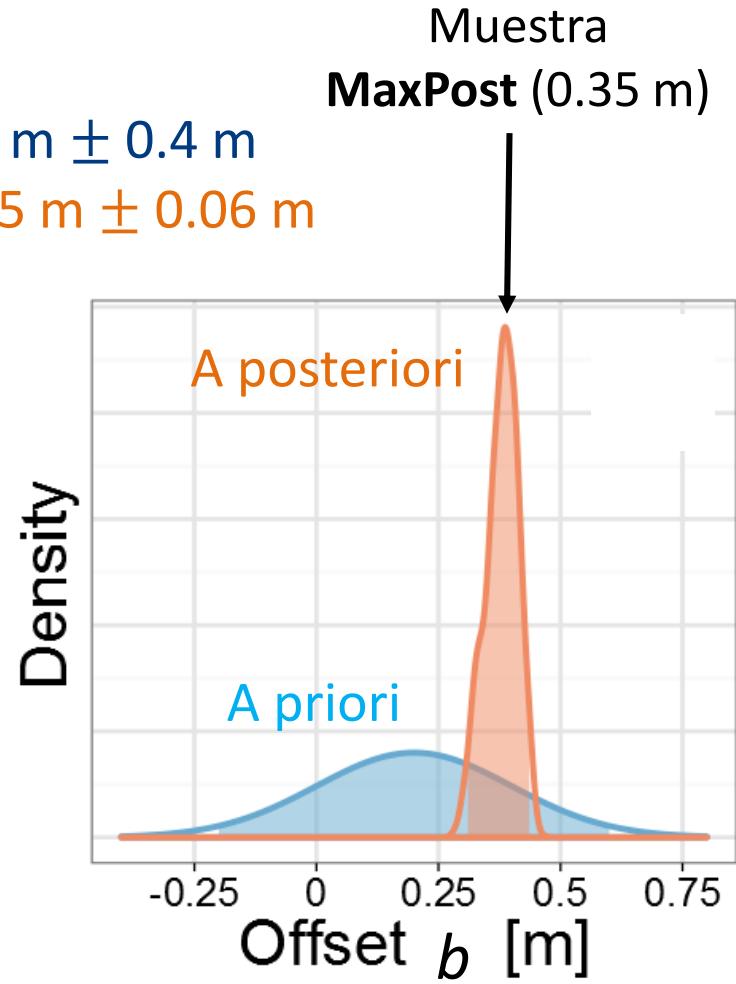


Observaciones (aforos) :



$$b = 0.2 \text{ m} \pm 0.4 \text{ m}$$

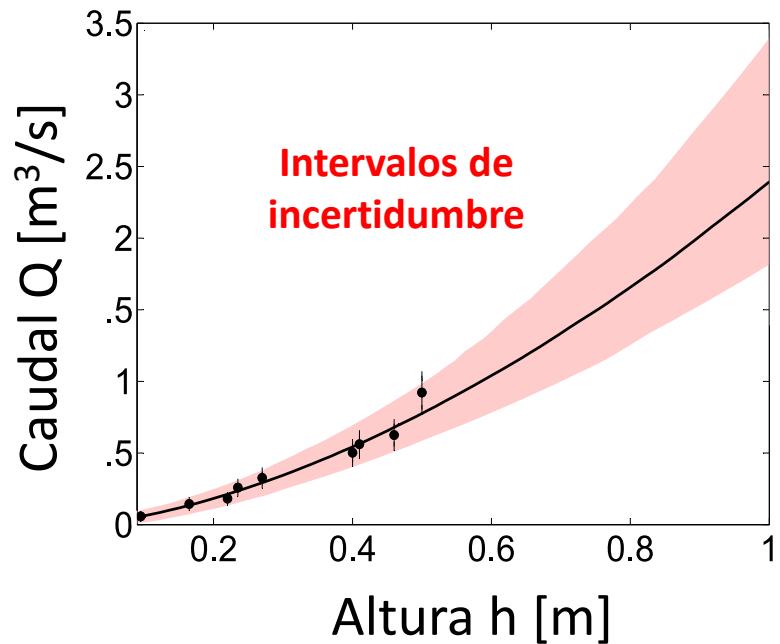
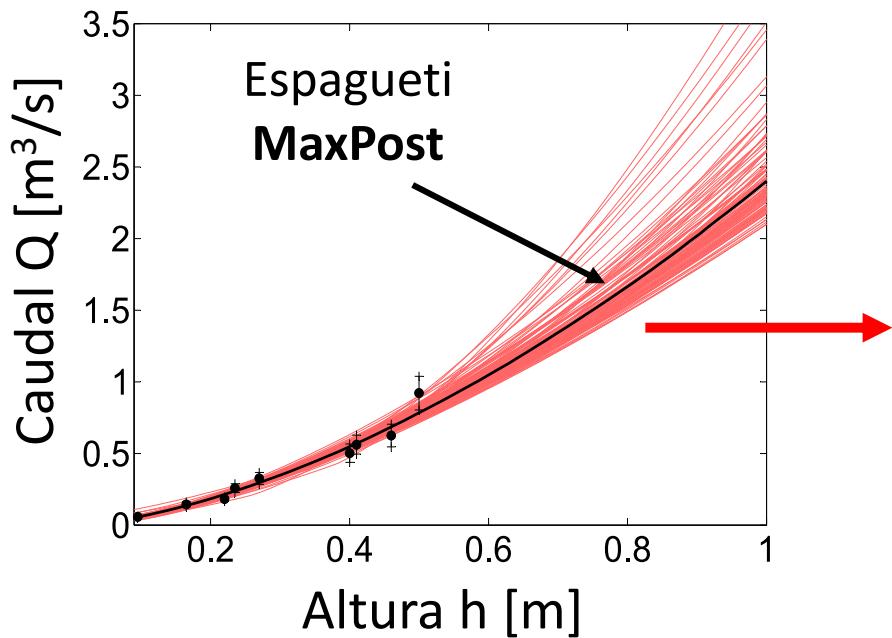
$$b = 0.35 \text{ m} \pm 0.06 \text{ m}$$



Enfoque “espaguetis”

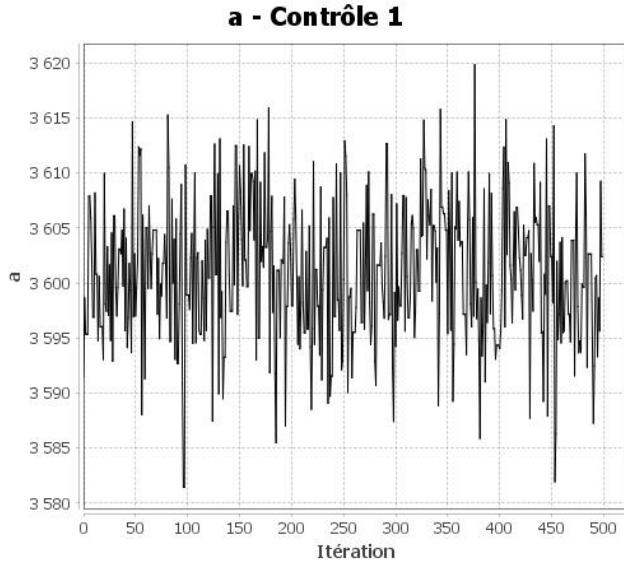


La distribución a posteriori es muestreada por la técnica MCMC.

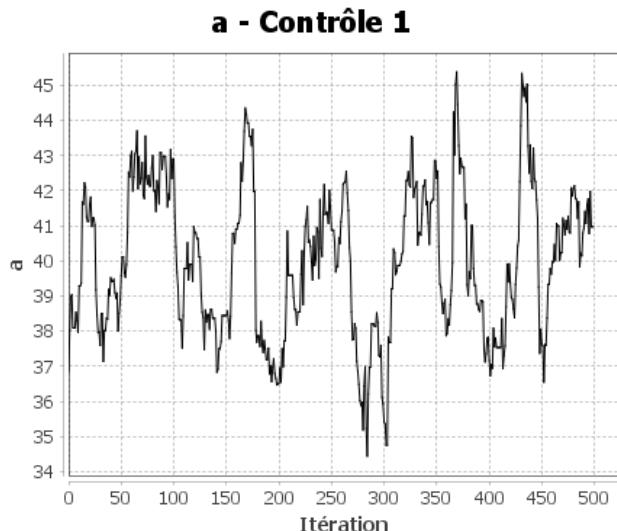


Para mas detalles: cf. ayuda de programa y las policopias
del curso sobre incertidumbres.

Recordar en la práctica: verificar los trazados del método MCMC



Bueno!
(garabato estacionario)



No muy bueno...
(tendencias marcadas)

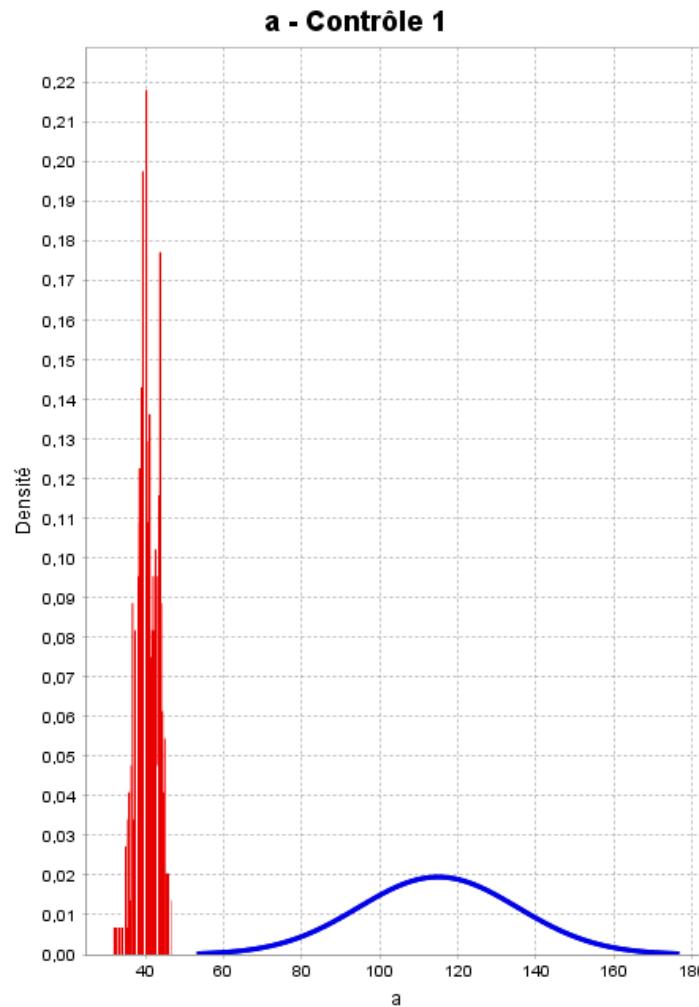
Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el *a priori* y el *a posteriori*



Recordar en la práctica:

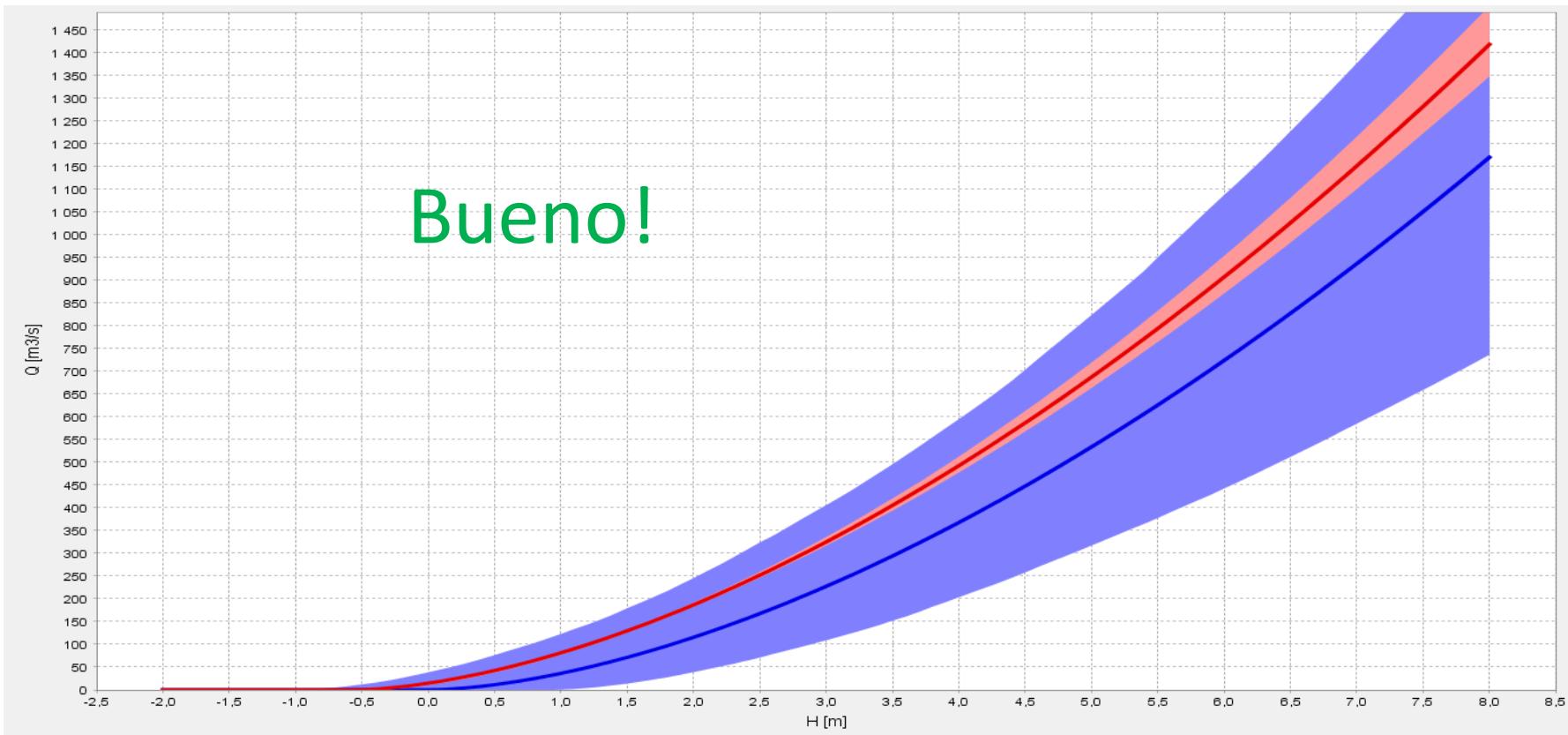
Verificar la ausencia de conflicto entre el *a priori* y el *a posteriori*



No es
bueno!

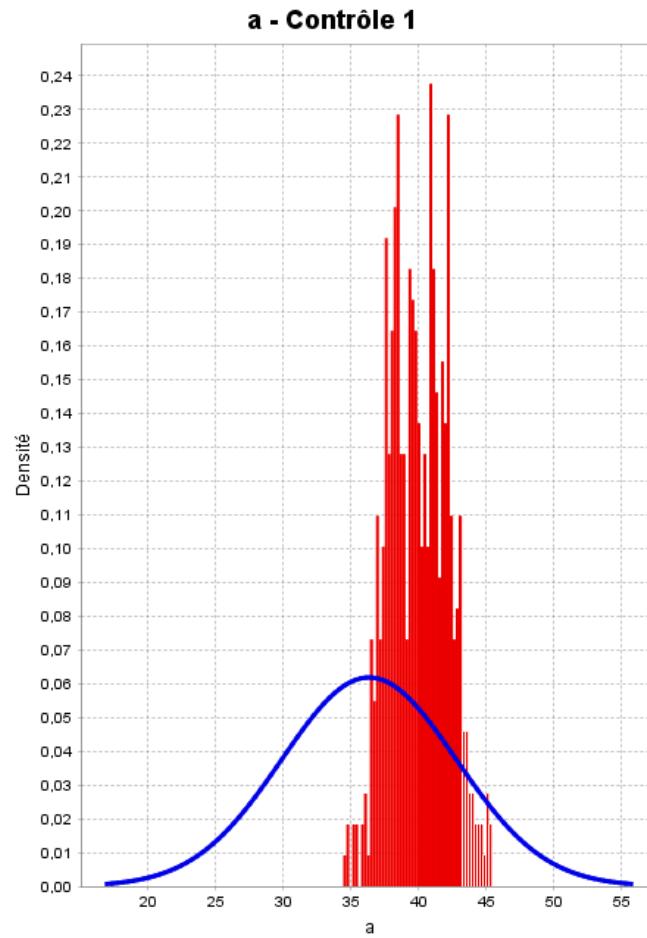
Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el *a priori* y el *a posteriori*



Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el *a priori* y el *a posteriori*



Bueno!

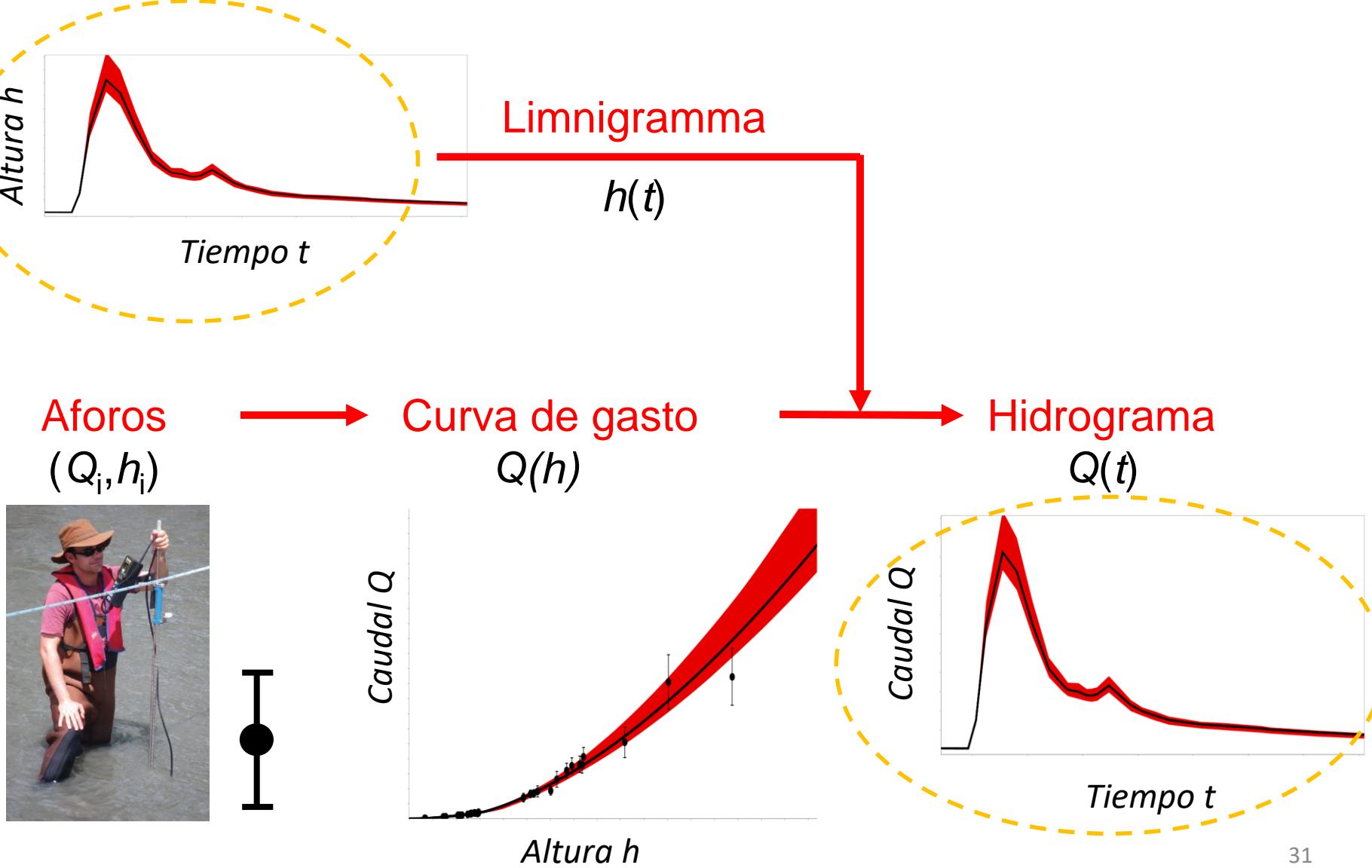
Recordar en la práctica:

Verificar la ausencia de conflicto entre el a priori y el a posteriori

En caso de conflicto:

- ✓ Verificar que los cálculos sean correctos (convergencia de las iteraciones MCMC)
- ✓ Verificar los valores de los a priori (no calibrarlos por medio de los resultados o las mediciones utilizadas!)
- ✓ Volver a ver las hipótesis de los controles hidráulicos, poner a prueba otras configuraciones hidráulicas.
- ✓ Verificar los aforos y sus incertidumbres (atención: se suponen que los errores de los diferentes aforos son independientes)

Producir series hidrométricas probabilísticas



Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.

✓ Reducir la incertidumbre del limnímetro

✓ Mas aforos, con menos incertidumbre

✓ Aprioris mas precisos de los parámetros

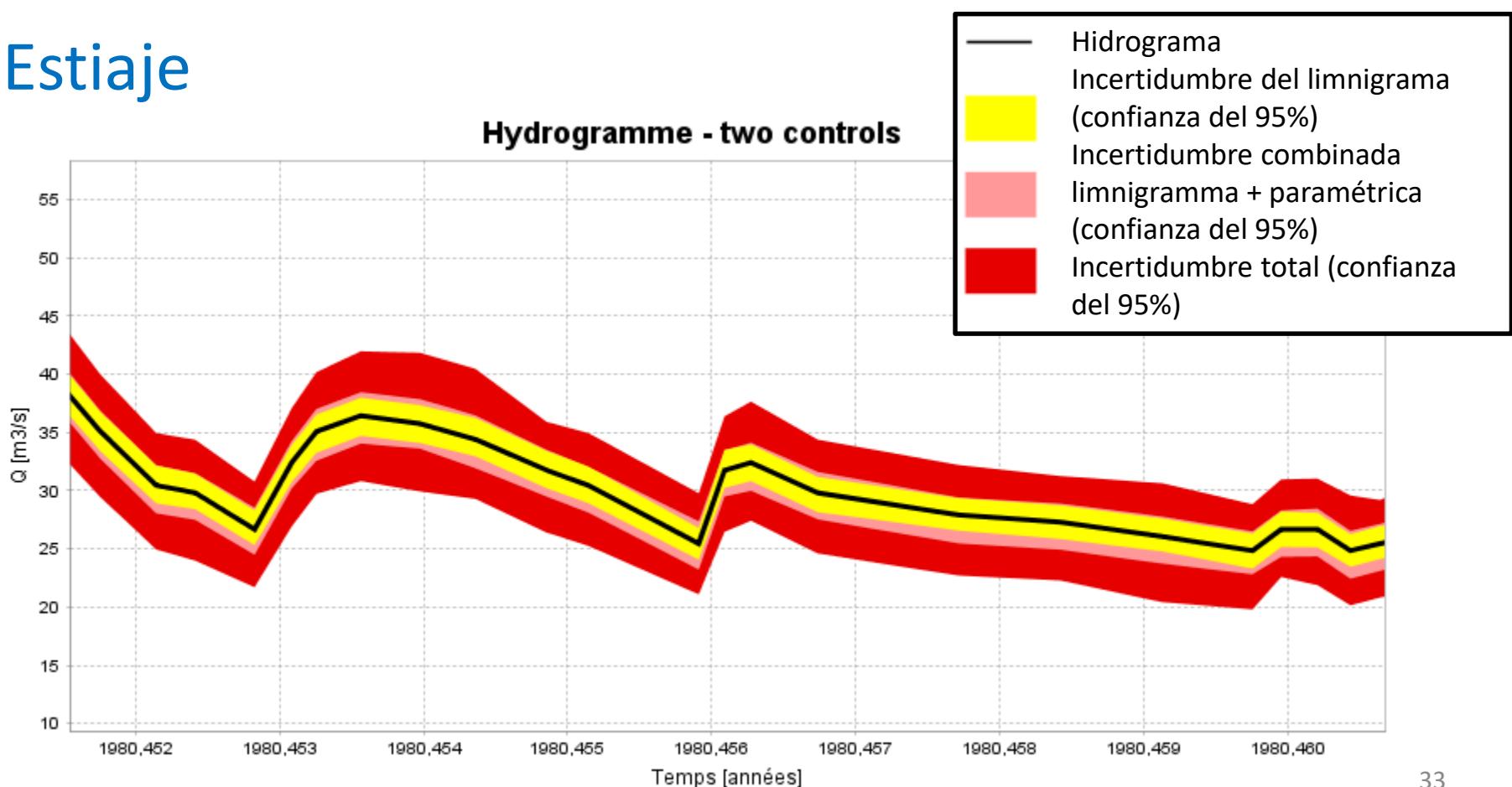
✓ Utilizar un modelo de curva de gasto más adecuado (controles, cambios en el lecho, histéresis, influencia agua abajo...)

—	Hidrograma
	Incertidumbre del limnograma (confianza del 95%)
	Incertidumbre combinada limnogramma + paramétrica (confianza del 95%)
	Incertidumbre total (confianza del 95%)

Evaluación de las incertidumbres

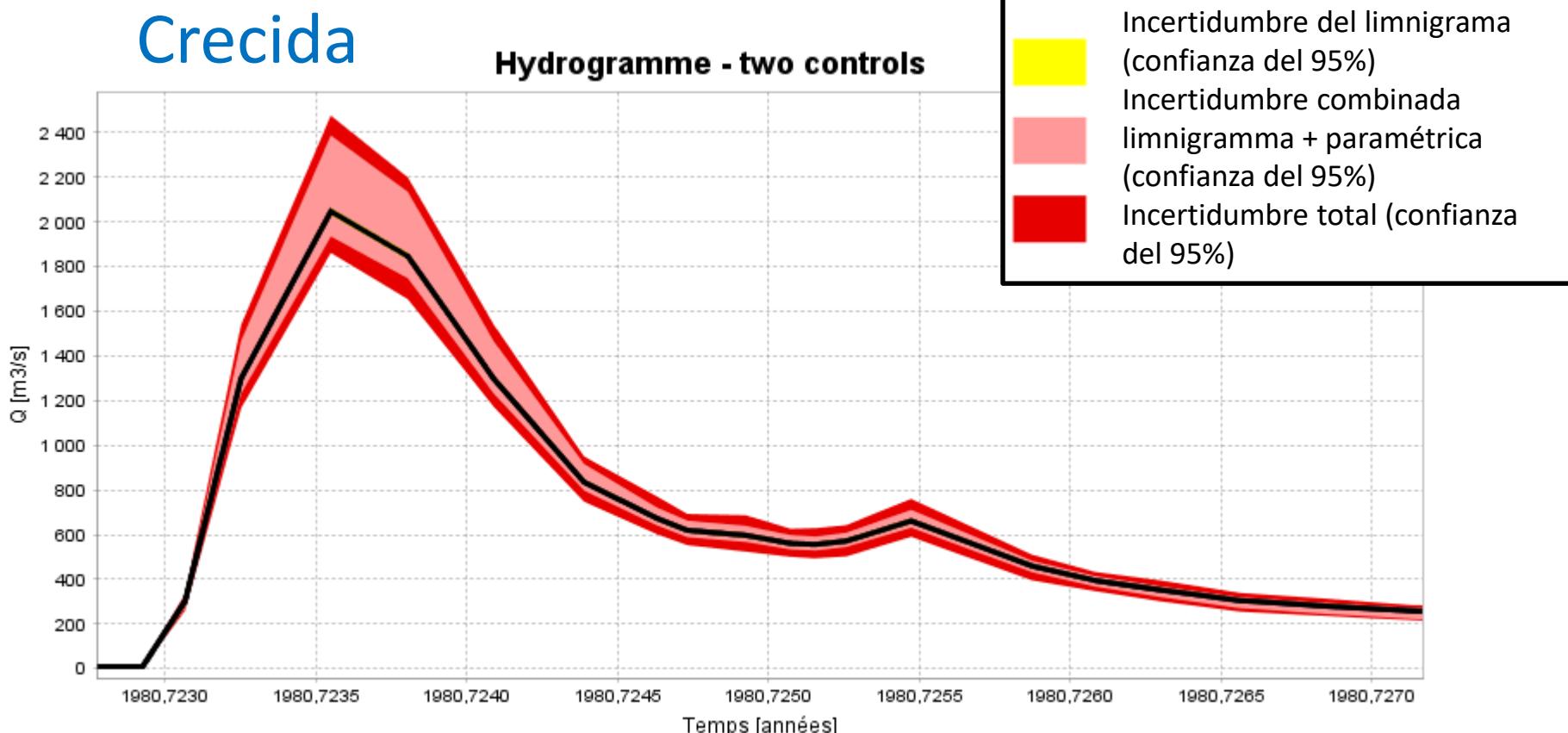
La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.

Estiaje



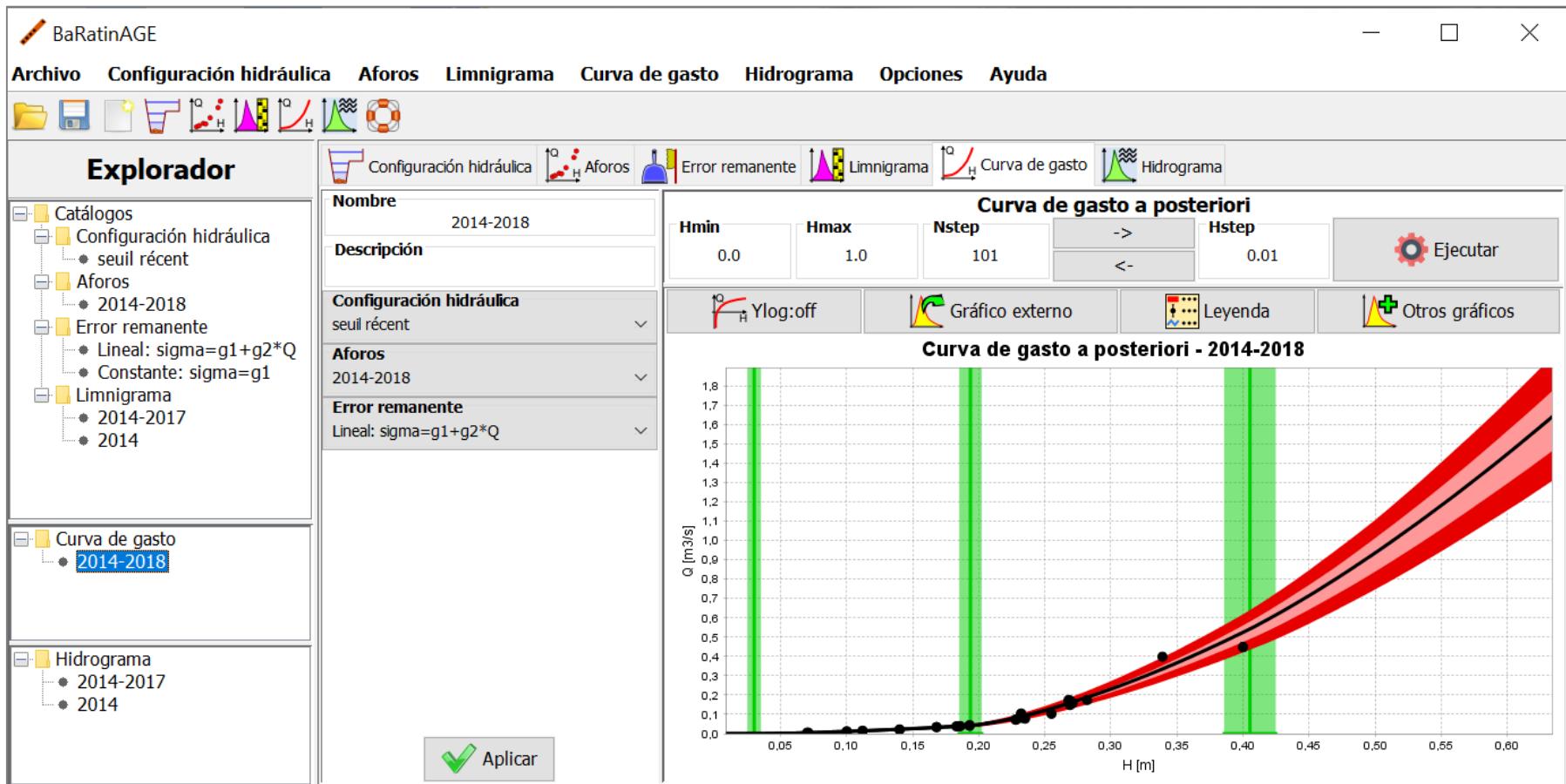
Evaluación de las incertidumbres

La evaluación de las incertidumbres permiten jerarquizar las fuentes de error y mejorar el procedimiento de medición.



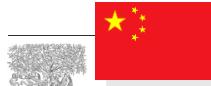
Software BaRatinAGE

- Interface gráfica (java) y manual de usuario
- Version en francés, inglés, español y otros idiomas



Software BaRatinAGE

- Licencia individual gratuita, escribir a baratin.dev@lists.irstea.fr
- Lista de usuarios (~190 suscriptores con licencia)
- Uso operativo (servicios hidro en Francia, CNR, NEON-USA, INA Argentina)
- Uso por parte de investigadores :



Journal of Hydrology 597 (2021) 126168
Contents lists available at ScienceDirect
Journal of Hydrology
journal homepage: www.elsevier.com/locate/jhydrol

Research papers
Combining a segmentation procedure and the BaRatin stationary estimate nonstationary rating curves and the associated uncertainty





Aforos de ríos y arroyos en la Cuenca Matanza-Riachuelo
Informe 05
Elaboración de relaciones altura - caudal (curvas HQ)





Water Resources Research
RESEARCH ARTICLE
10.1002/WR020473
Key Points:
• Distributed streamflow and lidar-based SWE observations are used to close alpine basins' water balance



Earth Syst. Sci. Data, 10, 1063-
<https://doi.org/10.5194/essd-10-1063-2018>. © Author(s) 2018. This work is licensed under the Creative Commons Attribution License.

Water and sediment fluxes in Mediterranean mountainous regions: comprehensive analysis
World Environmental and Water Resources Congress 2016
A Bayesian Approach for the Evaluation of Rating Curve Uncertainties in Flood Frequency Analyses
A. L. N. A. Osorio¹ and D. S. Reis Jr., PhD²
¹M.Sc. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Campus Darcy Ribeiro, Brasília 70.910-900. E-mail: osorio.analuisa@gmail.com
²Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Brasilia, Campus Darcy Ribeiro, Brasília 70.910-900. E-mail: diretorcse@unb.br



Bayesian Rating Curve Modeling: Alternative Error Model to Improve Low-Flow Uncertainty Estimation
Rodrigo Garcia¹; Veber Costa, Ph.D.²; and Francisco Silva, Ph.D.³



hydrogen. In this regard, the use considered a promising option. However, most of them remain bottom. For addressing uncertainty for both upper and lower bounds and intervals encompassed most of the proposed modeling

0001903. © 2020 American Meteorological Society



The role of rating curve uncertainty in real-time flood forecasting
David Ocio¹, Natalya Le Vine¹, Ida Westerberg², Florian Pappenberger^{3,4}, and Bente Buytaert¹

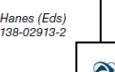
¹Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK; ²SLU Swedish Environmental Research Institute, Stockholm, Sweden; ³European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK; ⁴School of Geosciences, Royal Holloway, University of London, UK

Water Resour Manage (2016) 30:3191–3205
DOI 10.1007/s11269-016-1340-8

Artificial Neural Network Rainfall-Discharge Model Assessment Under Rating Curve Uncertainty and Monthly Discharge Volume Predictions
Ayoub Zeroual^{1,2} • Mohamed Meddi¹ • Ali A. Assani²



Rating curve uncertainty: A comparison of estimation methods
R.R. Mason, Jr., J.E. Kiang & T.A. Cohn
U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA



ABSTRACT: The USGS is engaged in both internal development and collaborative efforts to evaluate existing methods for characterizing the uncertainty of streamflow measurements (gaugings), stage-discharge relations (ratings), and, ultimately, the streamflow records derived from them. This paper provides a brief overview of two candidate methods that may be used to characterize the uncertainty of ratings, and illustrates the results of their application to the ratings of two USGS streamgages.

Key Points:
• Hourly discharge and water temperature for 2002–2015 in 6 subbasins, Tuolumne River, CA
• Daily inflow of the Tuolumne River to the Hetch Hetchy Reservoir for 2002–2013
• Meteorological and snow data sets

Yosemite Hydroclimate Network: Distributed stream and atmospheric data for the Tuolumne River watershed and surroundings
Jessica D. Lundquist¹, James W. Rocca², Harrison Forrester², Courtney Moore³, Eric Keenan⁴, Gwyneth Perry⁵, Nicoleta Cristea⁶, Brian Henn¹, Karl Lapo¹, Bruce McGurk⁴, Daniel R. Cayan^{3,4}, and Michael D. Dettinger⁶

¹Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, USA; ²National Park Service, Yosemite, California, USA; ³Northwest Hydraulic Consultants, Seattle, Washington, USA; ⁴McGurk Hydrologic, Inc., San Francisco, California, USA; ⁵University of Washington, Seattle, Washington, USA; ⁶McGurk Hydrologic, Inc., San Francisco, California, USA

Conclusiones sobre el método BaRatin



- ✓ *BaRatin / BaRatinAGE* para las curvas de gasto simples
 - La evaluacion de incertidumbres ayuda a mejorar el procedimiento de medición.
 - Registra el máximo de informacion, de fotos y de explicaciones sobre sus *baratinages*
 - Consultar la documentación y las fichas prácticas
 - Cualquier pregunta o duda, escribir a: baratin.dev@lists.irstea.fr

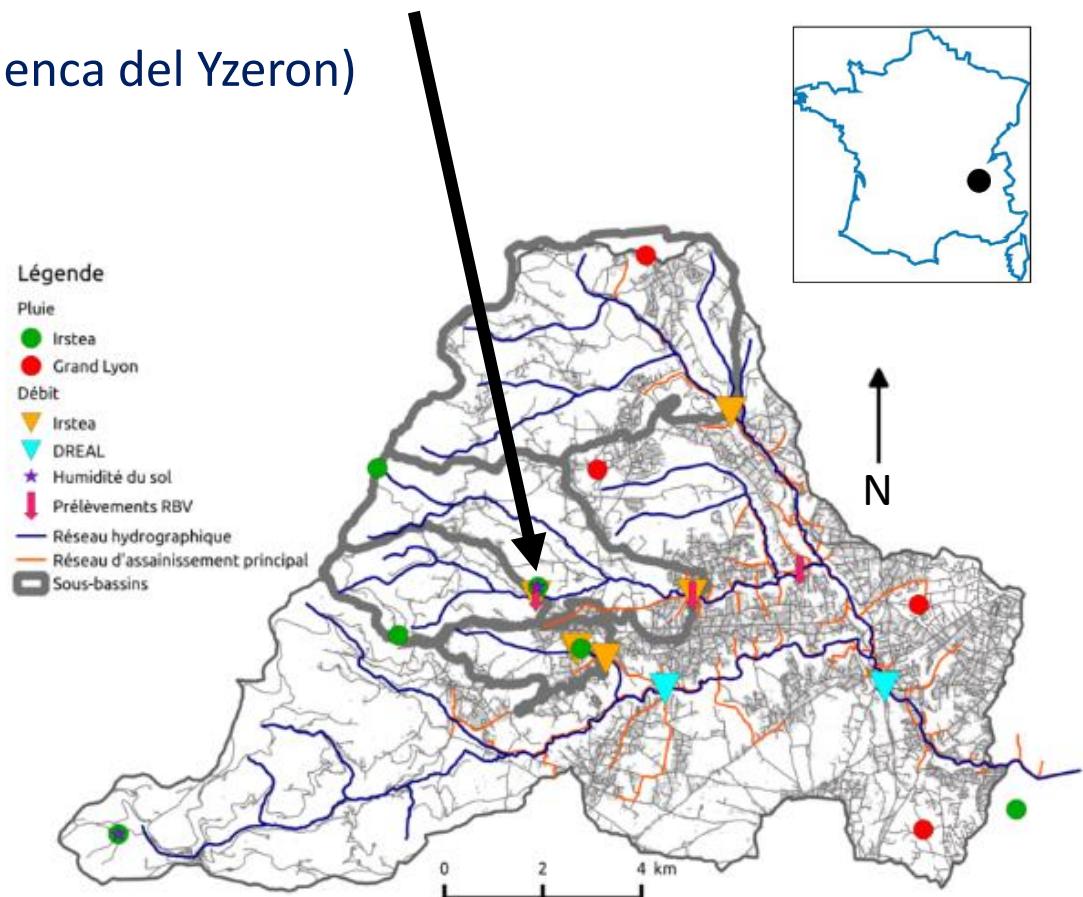
✓ *BaM!* para las curvas de gastos simples y complejas

- Desarrollo de una interface gráfica
- Cambios en el lecho, histéresis (bucles cuando hay crecidas), vegetación acuática, doble escala, influencia de la marea...
- Aplicación en tiempo real: detección de cambios en el lecho



TP6 – El Mercier

- Estación « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Seguimiento hidrométrico de la cuenca hidrográfica del Yzeron (oeste de Lyon, Francia) desde 1997
- Estación INRAE
(Observatorio OTHU – sitio cuenca del Yzeron)
<https://bdoh.irstea.fr/YZERON/>



TP6 – El Mercier

- Estación « Mercier au pont D610 » (V3015810)
- Seguimiento hidrométrico de la cuenca hidrográfica del Yzeron (oeste de Lyon, Francia) desde 1997, estación INRAE, (Observatorio OTHU – sitio cuenca del Yzeron)



Identifiquen y describan los controles hidráulicos

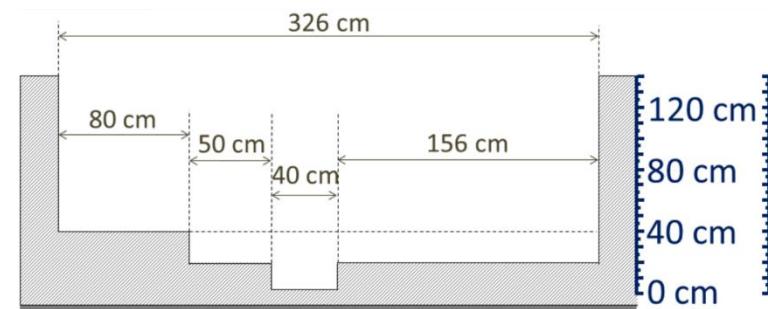
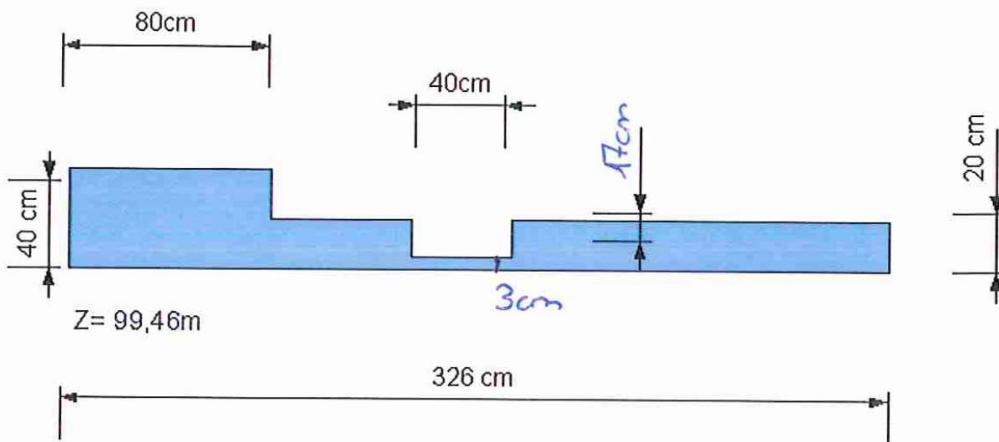
Resuma el modelo de curva de gasto que se desea estimar

TP6 – El Mercier

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos:

- Determinar los anchos et las cotas de los vertederos

Diseño de la estructura (2014)



El cero de la escala limnimétrica está calibrada en la parte inferior del macizo de la sección en concreto.

TP6 – El Mercier

- Establecer la configuración hidráulica
- Cuáles son las incertidumbre de los aforos?
- Calcular la curva de gasto 2014-2018
- Verificar que las simulaciones MCMC estén bien, así como el acuerdo entre el a priori y el a posteriori
- Cuál es la incertidumbre supuesta para el limnograma?
- Calcular el hidrograma 2014
- Cuál es la componente de incertidumbre dominante en la crecida? y en el estiaje?

Controles	Alturas de activación (k) <u>en m</u>	Ancho de los vertederos (B) <u>en m</u>	Exponentes (c)
Vertedero rectangular (Control 1)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Vertedero rectangular (Control 2)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??
Vertedero rectangular (Control 3)	?? ± ??	?? ± ??	?? ± ??

TP6 – El Mercier

- Establecer la configuración hidráulica
- Cuáles son las incertidumbre de los aforos?
- Calcular la curva de gasto 2014-2018
- Verificar que las simulaciones MCMC estén bien, así como el acuerdo entre el a priori y el a posteriori
- Cuál es la incertidumbre supuesta para el limnograma?
- Calcular el hidrograma 2014
- Cuál es la componente de incertidumbre dominante en la crecida? y en el estiaje?

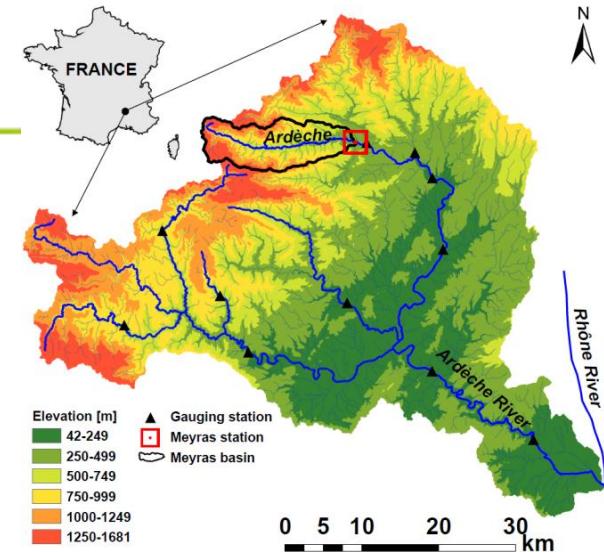
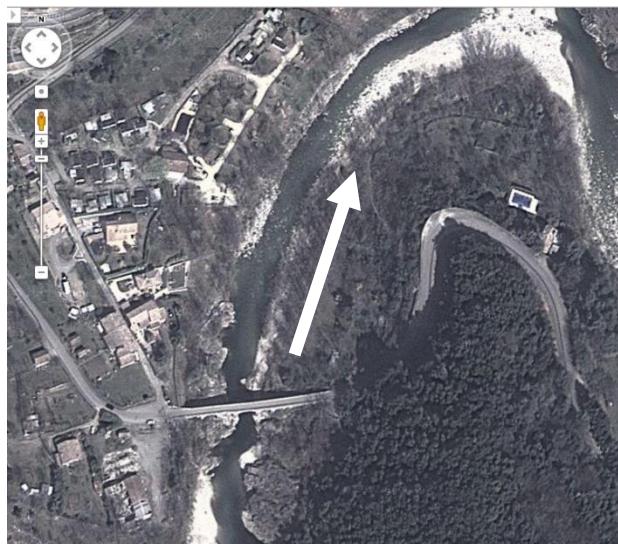
Controles	Alturas de activación (k) <u>en m</u>	Ancho de los vertederos (B) <u>en m</u>	Exponentes (c)
Vertedero rectangular (Control 1)	0.03 ± 0.02	0.40 ± 0.02	1.5 ± 0.05
Vertedero rectangular (Control 2)	0.20 ± 0.02	2.06 ± 0.10	1.5 ± 0.05
Vertedero rectangular (Control 3)	0.40 ± 0.02	0.8 ± 0.05	1.5 ± 0.05

TP2 – Ardèche en Meyras

Estación de la red hidrométrica francesa (V5004030, SPC Grand-Delta)

Cuenca hidrográfica:
98 km²

Caudal medio: 3.69 m³/s



PÉRIODE DE RETOUR DE CRUE (en m³/s)

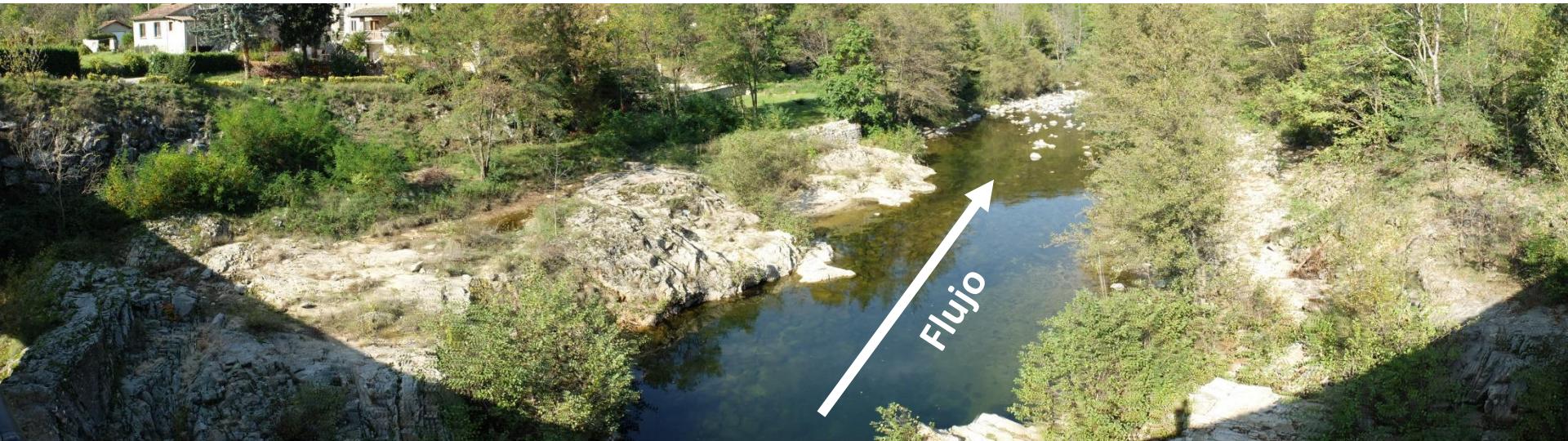
Période de retour de crue	Periodo de retorno de la crecida	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Débit instantané calculé	Caudal instantáneo calculado	150	240	290	350	420



TP2 – Ardèche en Meyras

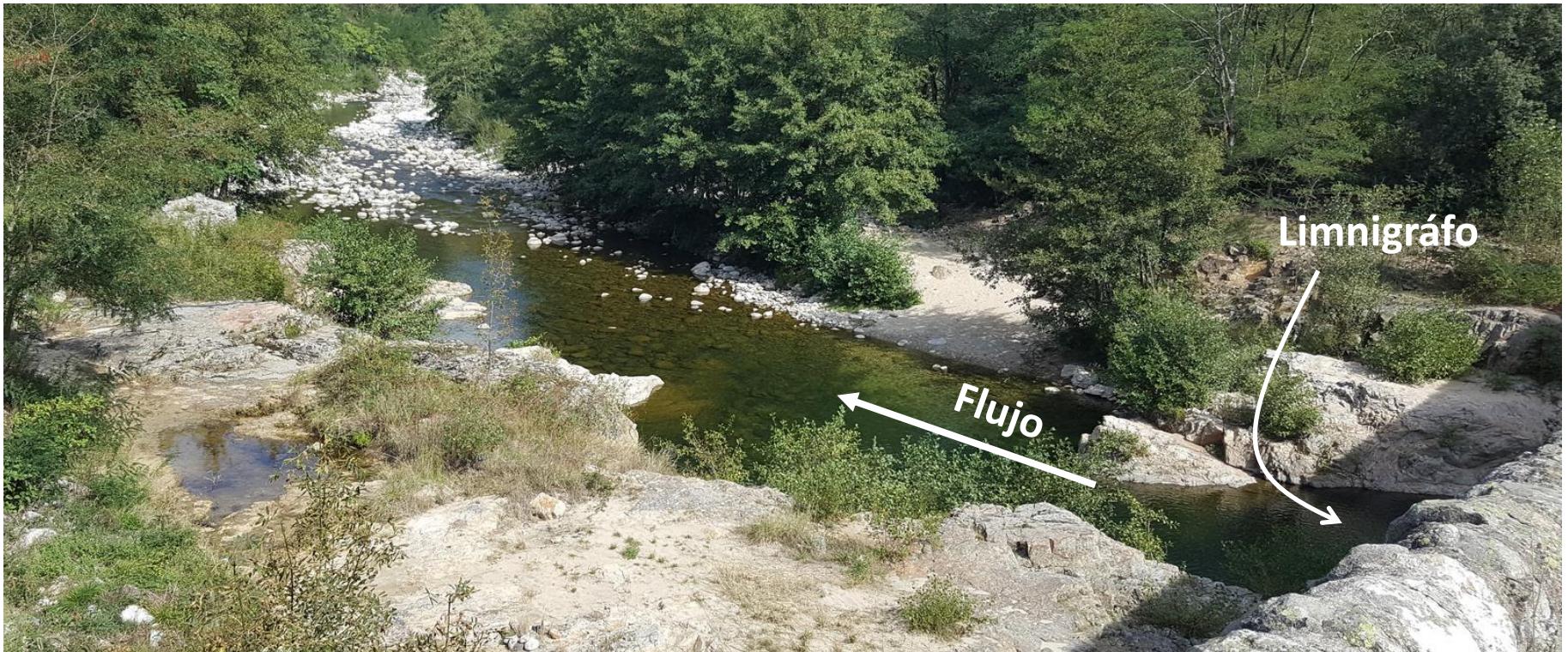
Identificación de los controles (tipo sección/
tipo canal):

- En estiaje o bajos caudales?
- Caudales medios?
- Crecidas o altas aguas/ altos caudales?



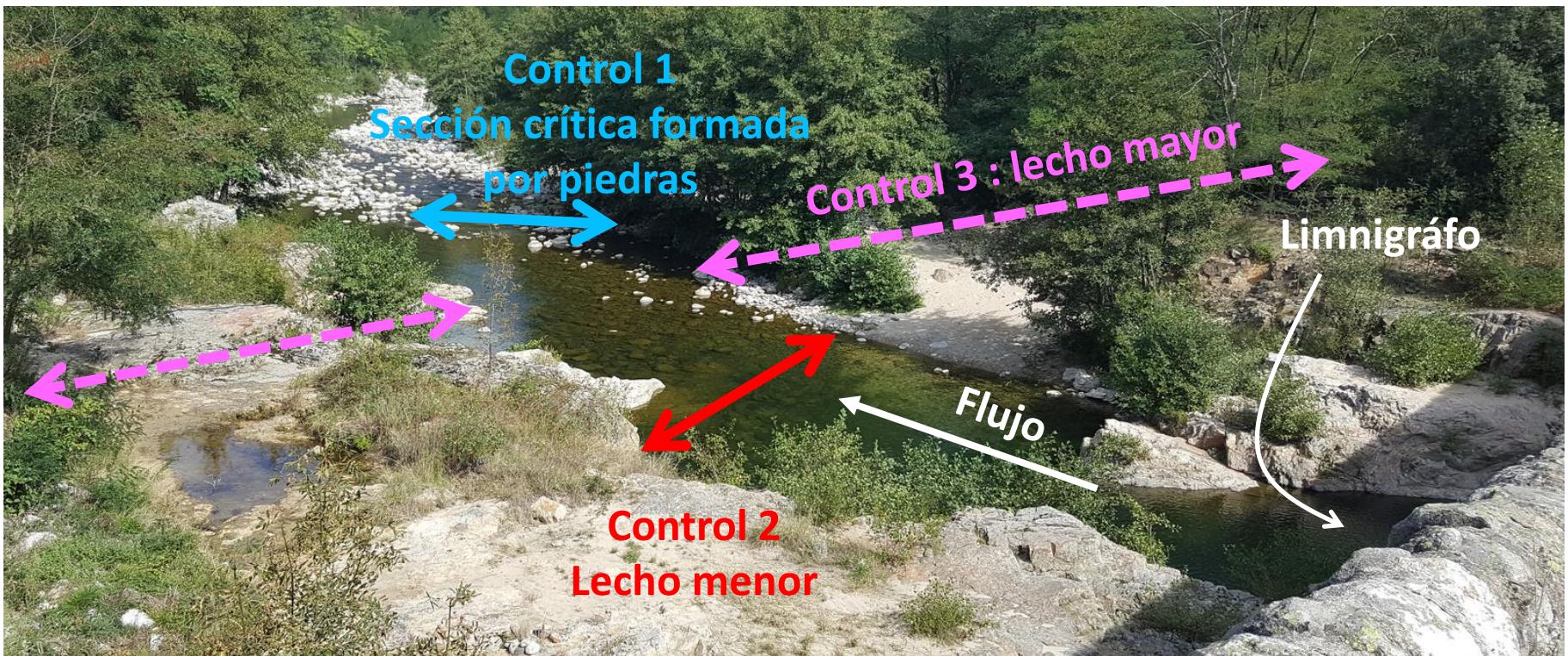
TP2 – Ardèche en Meyras

Identificación de los controles (tipo sección/tipo canal):



TP2 – Ardèche en Meyras

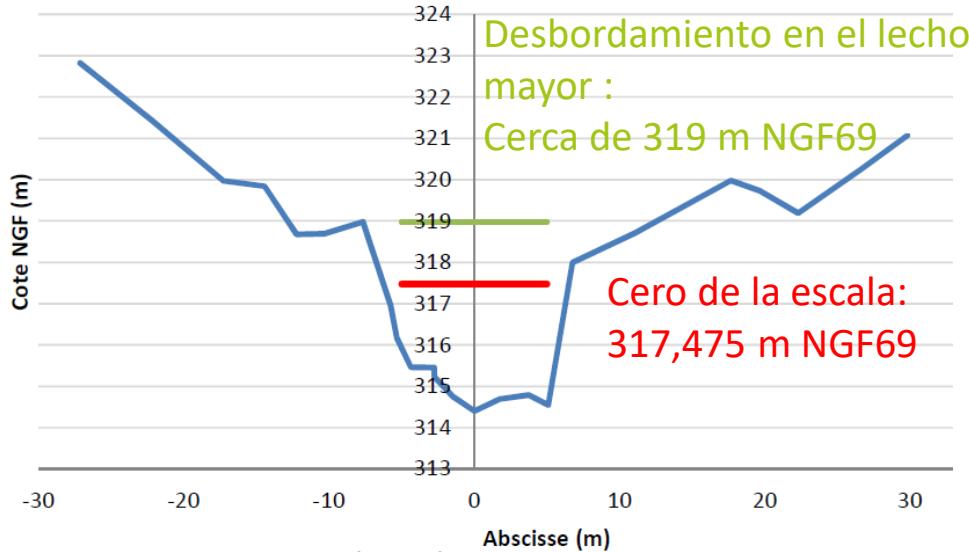
Identificación de los controles (tipo sección/tipo canal):



TP2 – Ardèche en Meyras

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos

Perfil transversal alrededor de 14 m aguas abajo de la estación



La pendiente de la línea es aproximadamente estimada a 5 m/km

Lecho menor medianamente rugoso, lecho mayor con vegetación

Ancho y cota del la sección crítica de bajos caudales:

B1 = ?

k1 = ?

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **menor**:

B2 = ?

S2 = ?

K2 = ?

k2 = ?

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **mayor**:

B3 = ?

S3 = ?

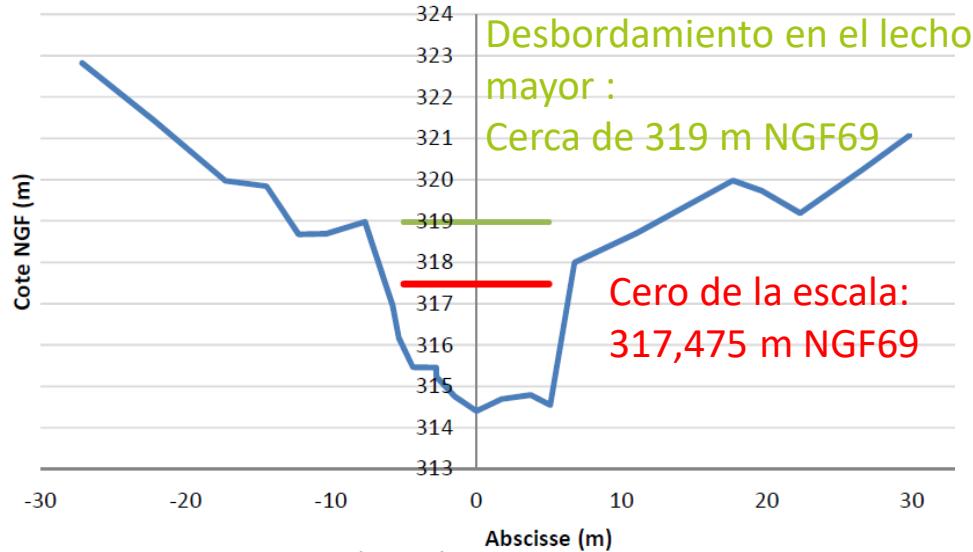
K3 = ?

k3 = ?

TP2 – Ardèche en Meyras

Información útil para definir los a priori de los controles hidráulicos

Perfil transversal alrededor de 14 m aguas abajo de la estación



La pendiente de la línea es aproximadamente estimada a 5 m/km

Lecho menor medianamente rugoso, lecho mayor con vegetación

Ancho y cota del la sección crítica de bajos caudales:

$$B_1 = 8 \pm 4 \text{ m}$$

$$k_1 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **menor**:

$$B_2 = 15 \pm 5 \text{ m}$$

$$S_2 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K_2 = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k_2 = 0 \pm 1 \text{ m}$$

Ancho, pendiente, rugosidad y cota de activación del lecho **mayor**:

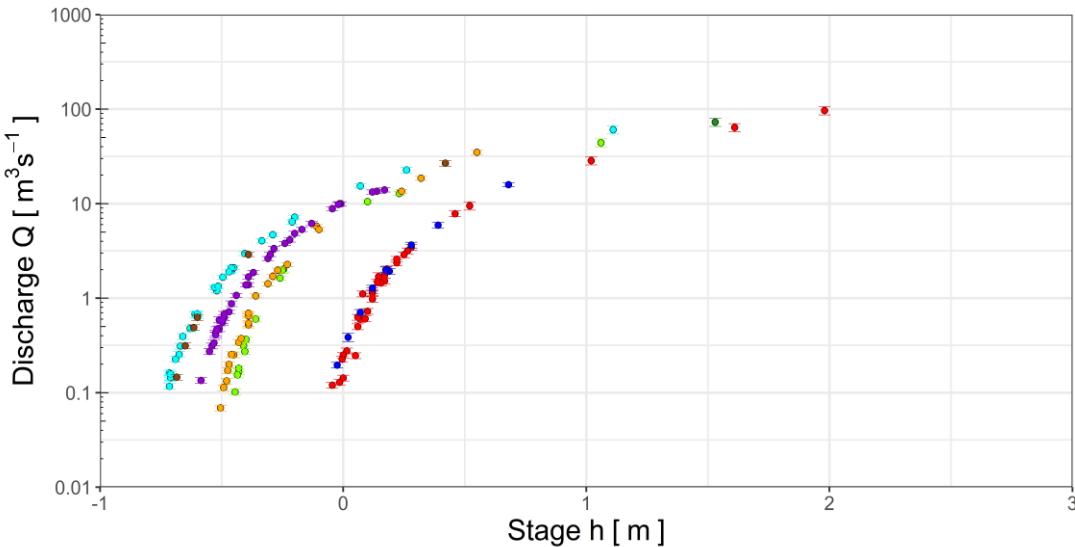
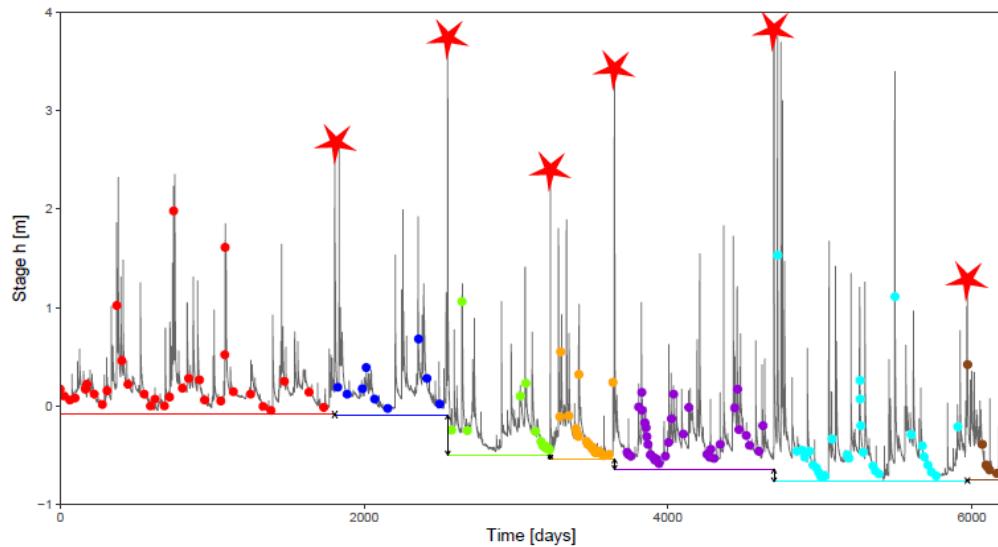
$$B_3 = 30 \pm 10 \text{ m}$$

$$S_3 = 5 \pm 5 \text{ m/km}$$

$$K_3 = 15 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$k_3 = 1.2 \pm 0.5 \text{ m}$$

TP2 – Ardèche en Meyras



Cambios netos provocados por el hundimientos del lecho menor durante las crecidas:

- Visible en el limnograma (altura-tiempo)
- Visible en los aforos (altura-caudal)

Cuál(es) parámetro(s) de la curva de gasto es(son) afectado(s)?

Qué se hace para poder manejar esto?

Ardèche en Meyras (Francia), periodo 2001-2018

Datos SPC Grand Delta