



# Evaluación de la incertidumbre en la simulación de caudales en puntos no aforados con un modelo distribuido y mediante un procesador estocástico

Autores:

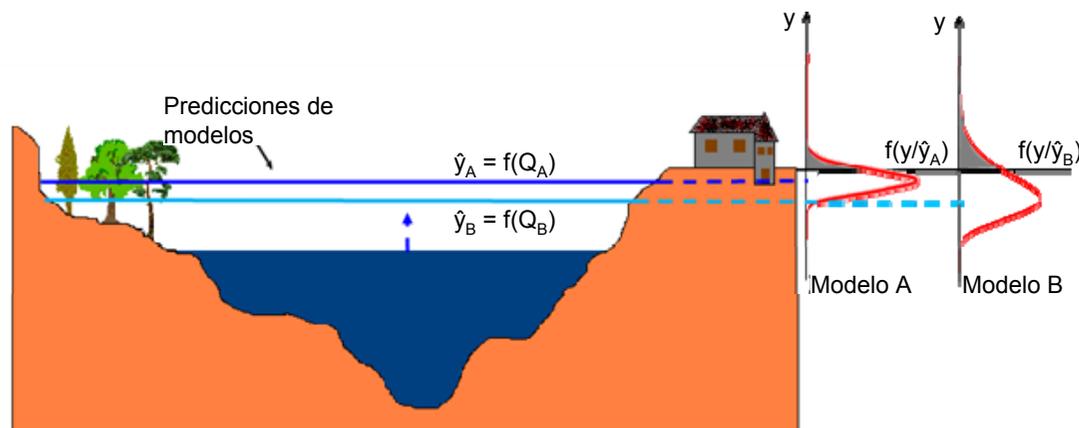
Juan Camilo Múnera<sup>1</sup>, Félix Francés<sup>1</sup>, Ezio Todini<sup>2</sup>, Gabriele Coccia<sup>2</sup>

(1) **Universidad Politécnica de Valencia - España**  
**Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente**  
**Grupo de Investigación de Hidráulica e Hidrología**  
<http://lluvia.dihma.upv.es>

(2) **Universidad de Bolonia**  
**Departamento de Ciencias de La Tierra y Geológico Ambiental**  
<http://www.geomin.unibo.it/>

- Uso extendido de modelos hidrológicos en:
  - Solución de problemas de drenaje, suministro y gestión de RRHH, evaluación de peligrosidad y riesgos de inundación.
  - Estimación orientada a valores extremos, eventos o series continuas.
  - Más recientemente: predicción operacional (rol de la **incertidumbre predictiva**).
  
- Incertidumbre:
  - Simulaciones o predicciones realizadas con modelos **no están exentas de error**.
  - Interés creciente en la comunidad científica en asignar una medida de la incertidumbre a las predicciones/simulaciones.
  
- Procesos de toma de decisión bajo incertidumbre, importantes en:
  - Emisión de alertas por inundación o avenidas torrenciales.
  - Operación de embalses y estructuras de control (escenarios de avenidas).
  - Consecuencias económicas y sociales derivadas del **manejo de emergencias**.

- Definición IP: Probabilidad de ocurrencia de un predictando condicionada a la información que se puede adquirir sobre el mismo en un momento dado.
  - Proceso de aprendizaje inferencial en términos de una fdp.
  - La información deducible está encapsulada en la salida de uno o más modelos.
- Cómo abordar adecuadamente esta incertidumbre?
  - Importante: percepción del tomador de decisiones sobre la evolución real de la variable de interés (predictando) en función del valor simulado.



(Adaptado de Todini y Coccia, 2010)

- Algunos procesadores de incertidumbre de desarrollo reciente:
  - Hydrologic Uncertainty Processor (HUP) (Krzysztofowicz, 1999)
  - Bayesian Model Averaging (BMA) (Raftery et al, 2003, 2005)
  - Model Conditional Processor (MCP) (Todini, 2008). Metodología Bayesiana basada en una aproximación multi-Normal; también permite combinar modelos.
  
- El **MCP** se puede asimilar como una extensión del procesador HUP, así como una generalización del método BMA.
  - Ventajas respecto a otras aproximaciones:
    - Evaluación de IP total combinando la incertidumbre meteorológica e hidrológica.
    - Permite combinar predicciones de modelos de diferente tipología
    - Eficiencia computacional

- Transformación NQT (Krzysztofowicz, 1999):

- Variable observada:  $y$
  - Predicciones modelo:  $\hat{y}$
- 

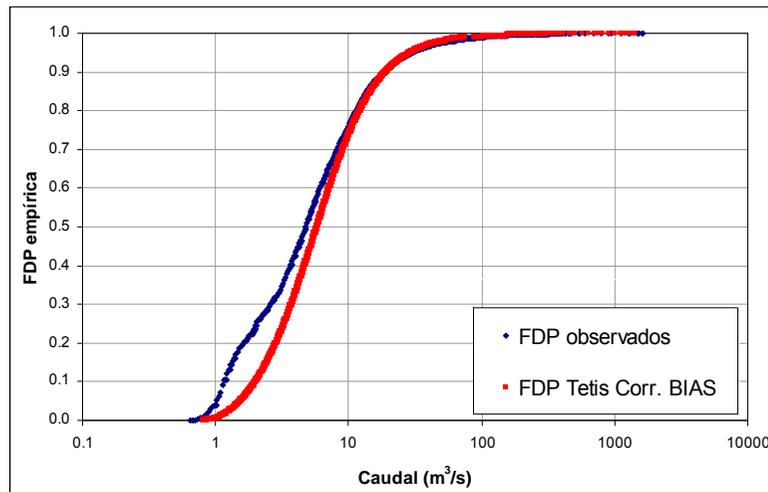
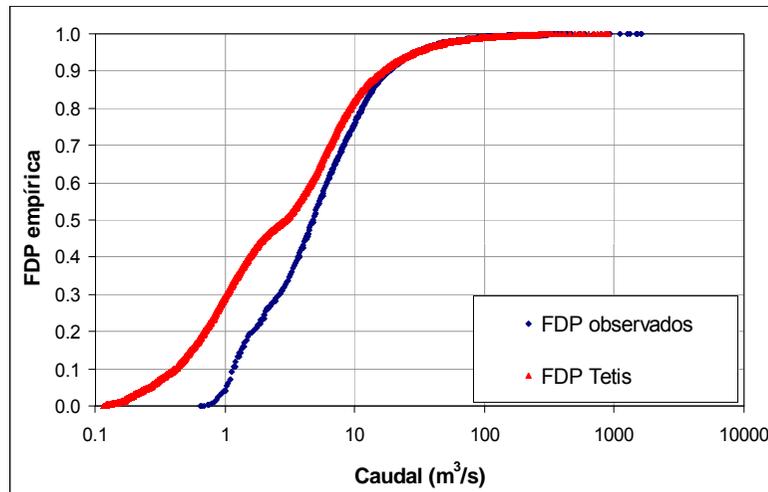
- NQT variable  $y$   $P(y < y_i) = P(\eta < \eta_i) = \frac{i}{m+1}$   $i = 1, 2, \dots, m; y_i < y_{i+1}$

- NQT variable  $\hat{y}$   $P(\hat{y} < \hat{y}_j) = P(\hat{\eta} < \hat{\eta}_j) = \frac{j}{m+1}$   $i = 1, 2, \dots, m; \hat{y}_j < \hat{y}_{j+1}$

- En la transformación NQT:

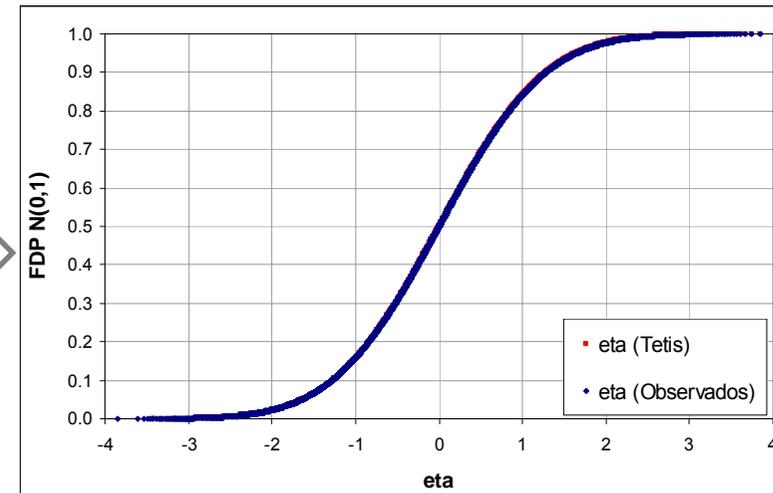
- Las distribuciones marginales de las nuevas variables son  $N(0, 1)$
- Hipótesis: la relación entre las imágenes de las variables originales en el campo transformado es lineal, es decir:
  - Único modelo: fdp conjunta en el campo Normal entre  $(\eta, \hat{\eta})$  es Normal bivariada
  - Varios modelos: fdp conjunta entre  $(\eta, \hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \dots, \hat{\eta}_m)$  se asume multivariada -Normal (o Meta-gaussiana).

# NQT, FDP Weibull P.P. caso bivariado con 1 modelo



## ■ Aplicación en dos fases:

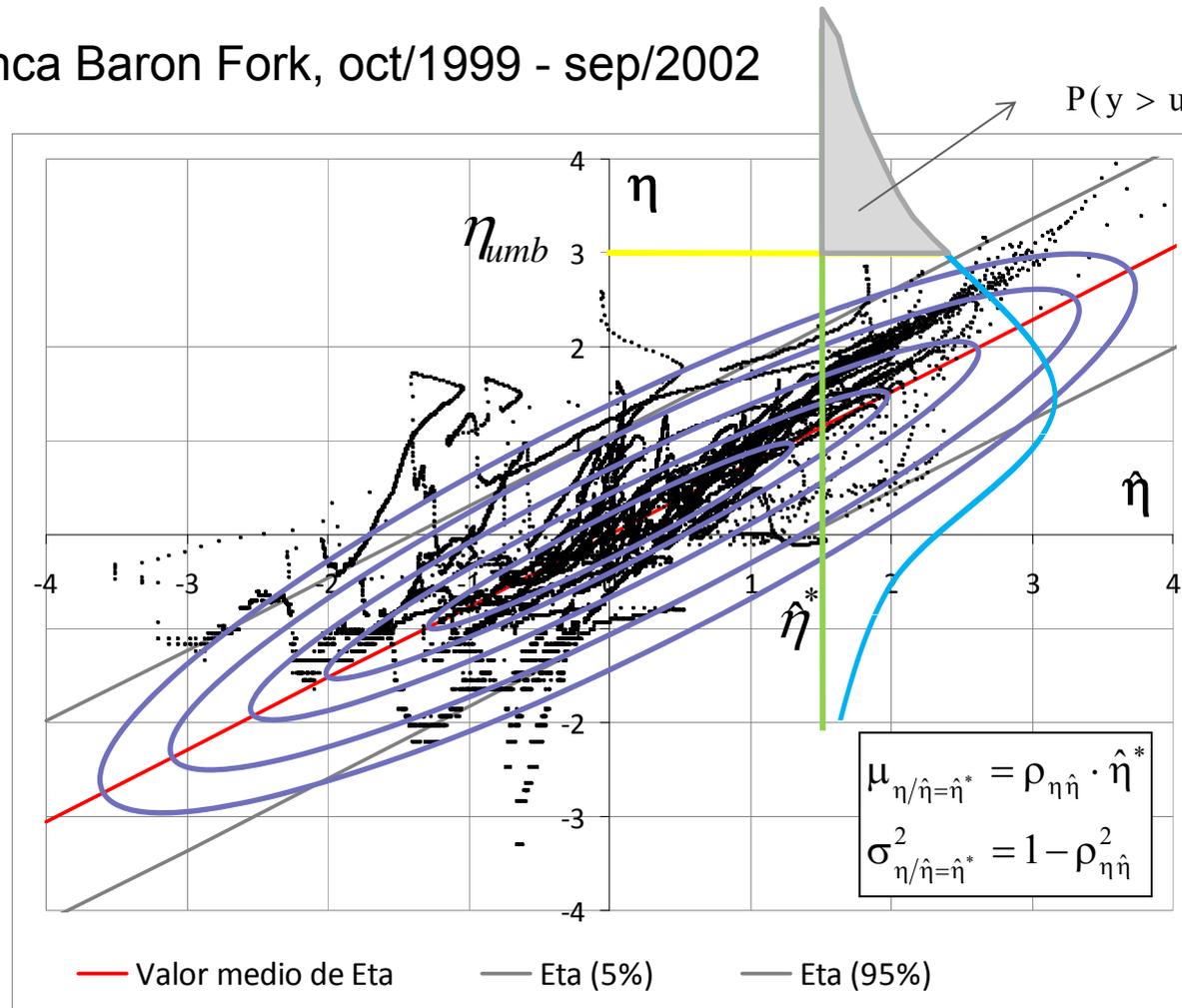
### ➤ Fase 1: Corrección error medio (Bias)



### ➤ Fase 2: Procesamiento del valor esperado obtenido para cada modelo

NQT

- Cuenca Baron Fork, oct/1999 - sep/2002



$$P(y > umb) = \int_{y_{umb}}^{\infty} f(y | \hat{y} = \hat{y}^*) dy$$

$$= \int_{\eta_{umb}}^{\infty} f(\eta | \hat{\eta} = \hat{\eta}^*) d\eta$$

$$\mu_{\eta/\hat{\eta}=\hat{\eta}^*} = \rho_{\eta\hat{\eta}} \cdot \hat{\eta}^*$$

$$\sigma_{\eta/\hat{\eta}=\hat{\eta}^*}^2 = 1 - \rho_{\eta\hat{\eta}}^2$$

- La distribución predictiva del evento futuro condicionada a la predicción de un modelo en el campo Normal (T. de Bayes):

$$f(\eta/\hat{\eta}) = f(\eta, \hat{\eta}) / f(\hat{\eta})$$

- La distribución conjunta en el campo Normal tiene momentos:

➤ Media: 
$$\mu_{\eta, \hat{\eta}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

➤ Varianza: 
$$\Sigma_{\eta, \hat{\eta}} = \begin{bmatrix} 1 & \sigma_{\eta, \hat{\eta}} \\ \sigma_{\eta, \hat{\eta}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{\eta, \hat{\eta}} \\ \rho_{\eta, \hat{\eta}} & 1 \end{bmatrix} \text{ (marginales } \eta \text{ y } \hat{\eta} \sim N(0,1))$$

- La fdp predictiva resultante también es Normal con momentos:

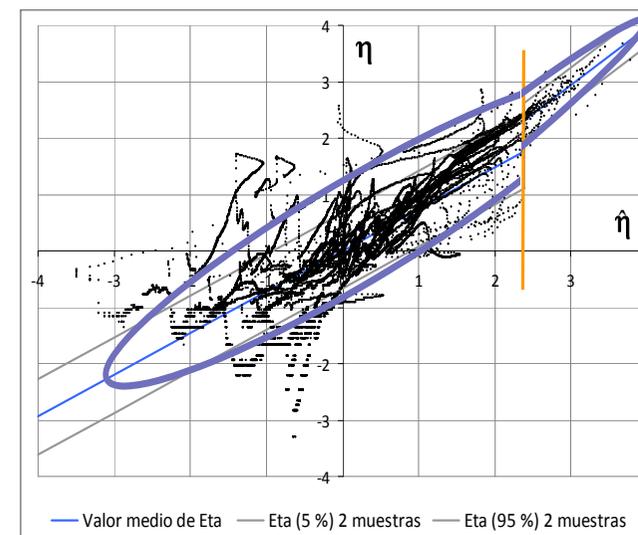
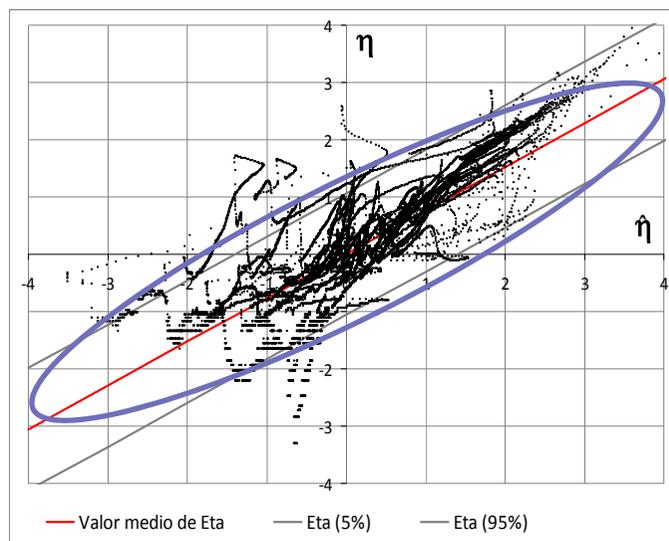
$$\mu_{\eta/\hat{\eta}} = \rho_{\eta\hat{\eta}} \cdot \hat{\eta}$$

$$\sigma_{\eta/\hat{\eta}}^2 = 1 - \rho_{\eta\hat{\eta}}^2$$

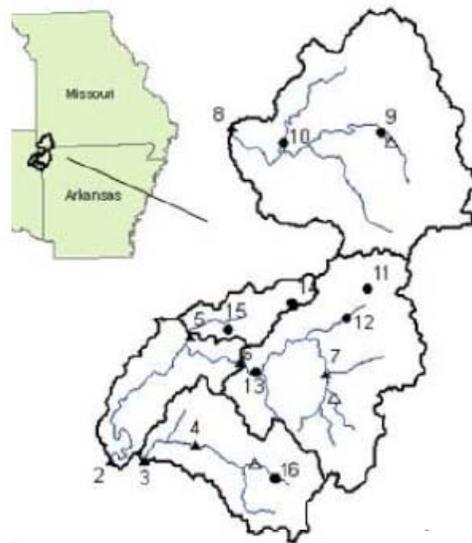
- Para obtener la fdp predictiva en el campo original: NQT<sup>-1</sup>

# Mejora propuesta al MCP: separación en dos distribuciones conjuntas Normales truncadas

- En avenidas interesa representar muy bien los valores máximos. No obstante, los modelos tienden a describir en forma diferenciada éstos últimos de los caudales medios y bajos (más frecuentes!).
- Solución propuesta (Todini y Coccia, 2010): dividir los datos en dos muestras en el espacio Normal, asumiendo que cada una hace parte de una distribución Normal truncada.

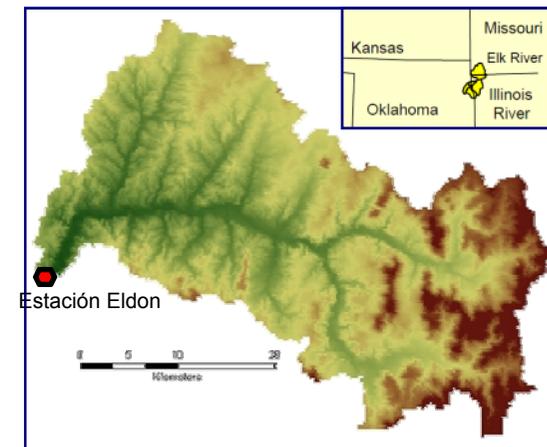
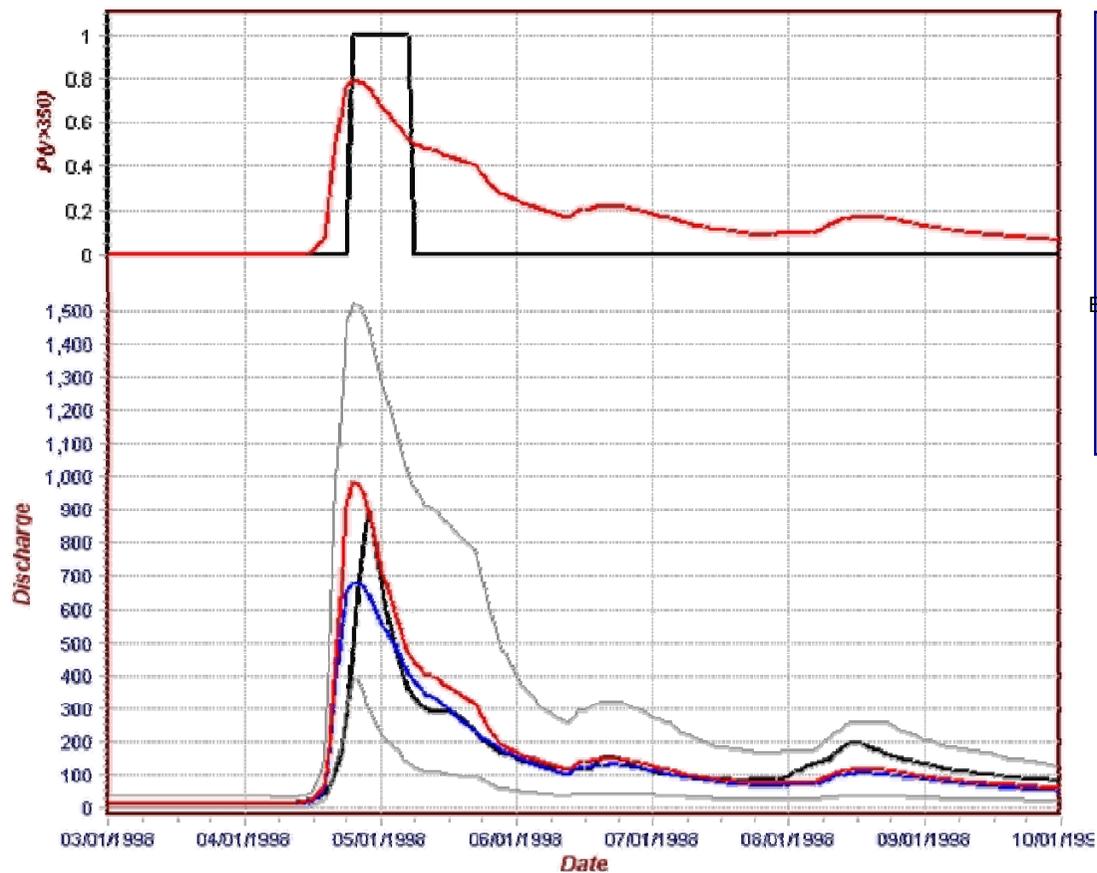


- Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2), NOAA/NWS. Surge del interés en evaluar modelos distribuidos para predicción de avenidas.
  - Región con clima semiárido. Descripción completa (Smith et al, 2004).
  - Información cartográfica de parámetros físicos y ambientales.
  - Series horarias de caudal, precipitación de Radar (NEXRAD), temperatura y ETP del Reanalysis (NCEP-NCAR).

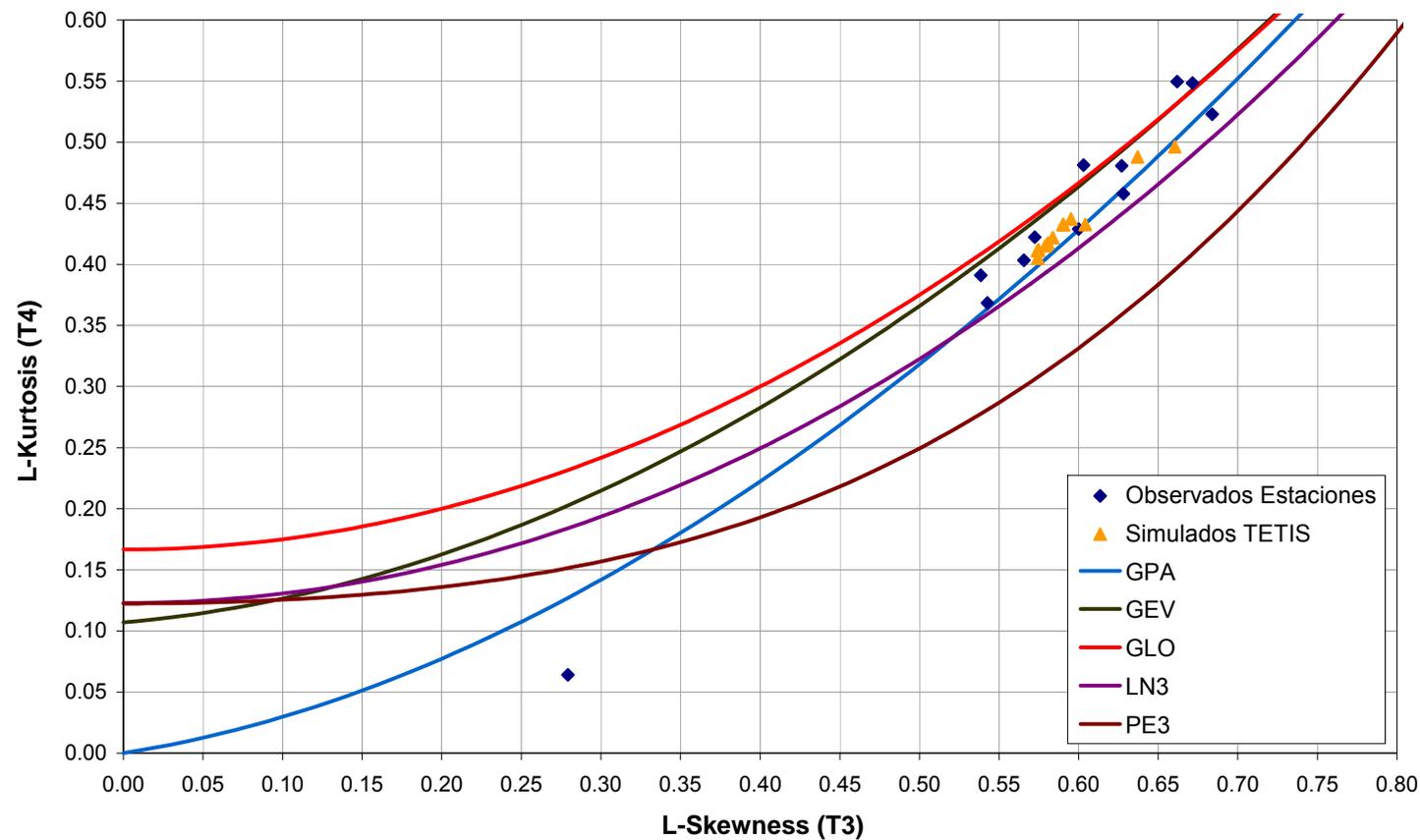


No	USGS No	Name	Area(km2)
1	7332500	Blue R. nr Blue, OK	1233
2	7196500	Illinois River near Tahlequah OK	2484
3	7197000	Baron Fork at Eldon OK	795
4	7196973	Peacheater Creek at Christie OK	65
5	7196000	Flint Creek near Kansas OK	285
6	7195500	Illinois River near Watts OK	1645
7	7194800	Illinois River at Savoy AR	433
8	7189000	Elk River near Tiff City Mo	2258
9	7188653	Big Sugar Creek near Powell MO	365
10	7188885	Indian Creek near Lanagan MO	619
11	7194880	Osage Creek near Cave Springs AR	90
12	7195000	Osage Creek near Elm Springs AR	337
13	7195430	Illinois River South of Siloam Springs AR	1489
14	7195800	Flint Creek at Springtown AR	37
15	7195865	Sager Creek near West Siloam Springs OK	49
16	7196900	Baron Fork at Dutch Mills AR	105

- Resultados cuenca Baron Fork, Eldon, afluente Río Illinois
  - Evento del período de validación



- Elección de una FDP paramétrica apropiada: uso de Lmoment ratio diagram (Hosking and Wallis, 1997)



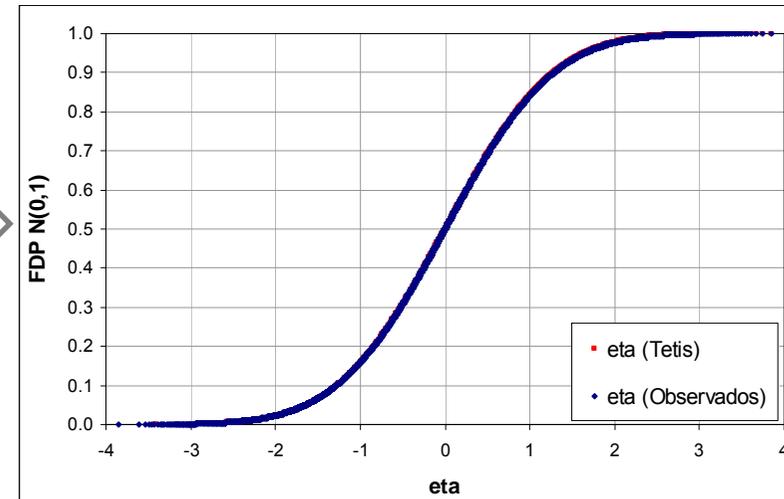
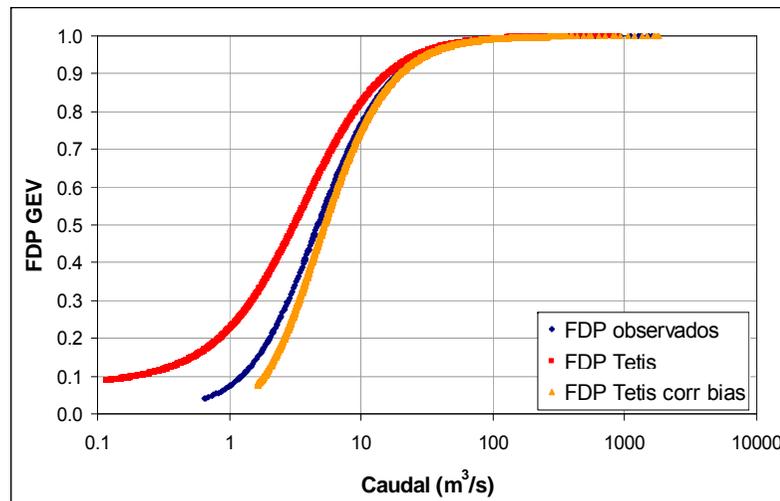
# Aplicación puntos no aforados: NQT con FDP paramétrica GEV

Función General Extreme Value (GEV):

$$F = \exp\left[-\left\{1 - k(x - \xi)/\alpha\right\}^{1/k}\right]$$

$$x = \xi + \frac{\alpha\left\{1 - (-\log F)^k\right\}}{k}$$

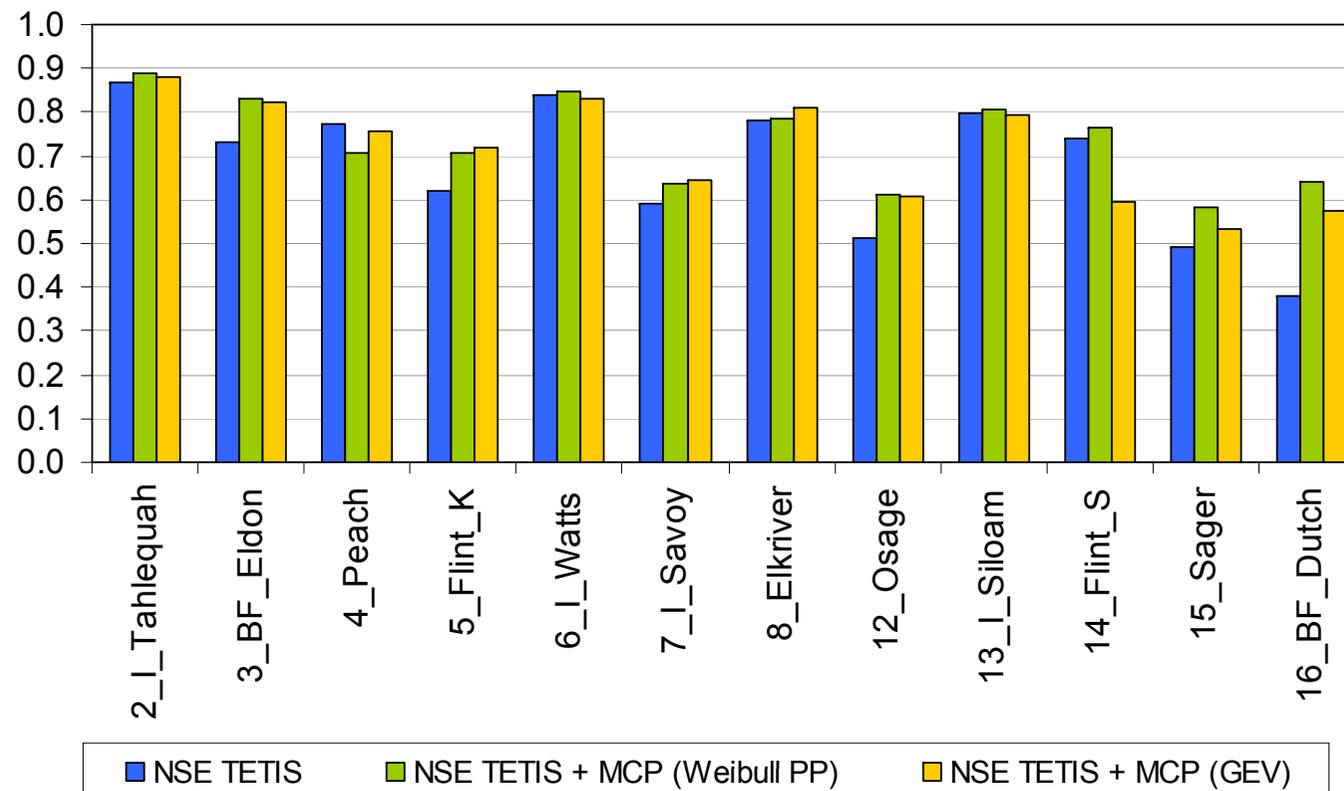
Estimación de parámetros: Método Lmomentos (Hosking, 1990; Hosking and Wallis, 1995)



# Comparación índice NSE en estaciones de aforo, FDP empírica vs FDP GEV

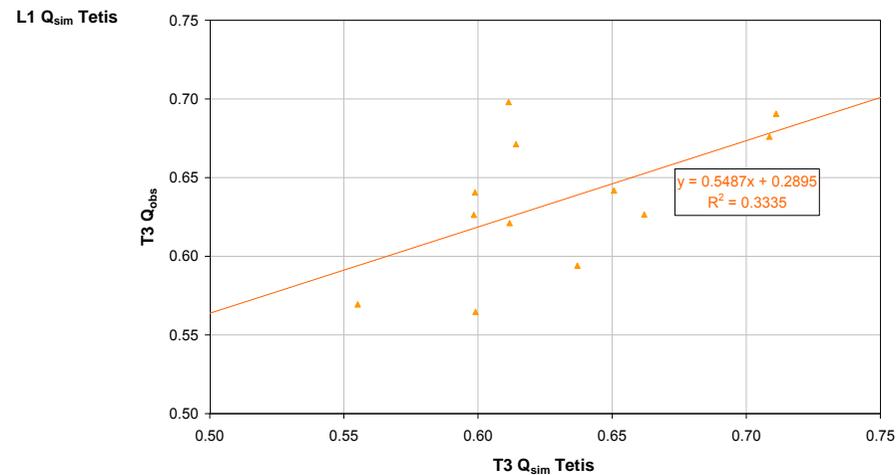
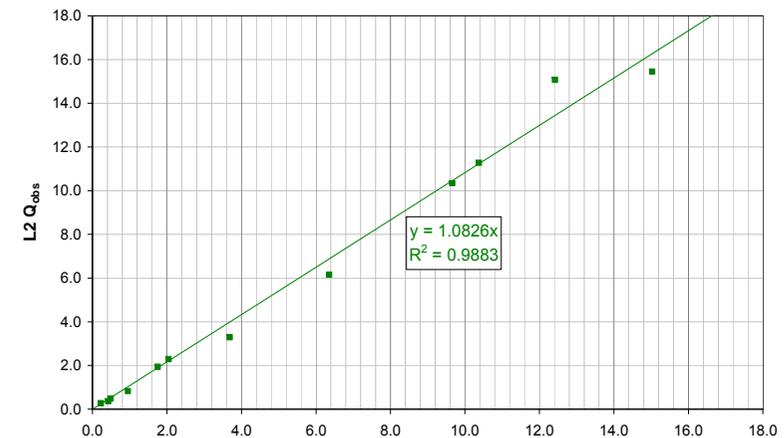
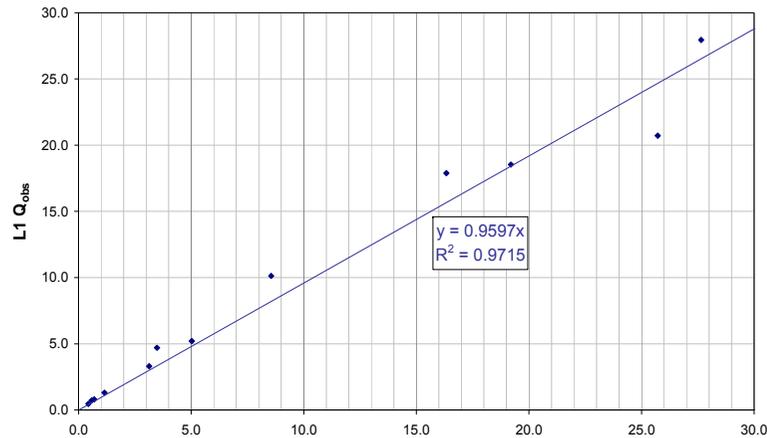
- Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

FDP: WEIBULL P.P. vs GEV



# DMIP2, aplicación puntos no aforados: Regionalización Lmomentos

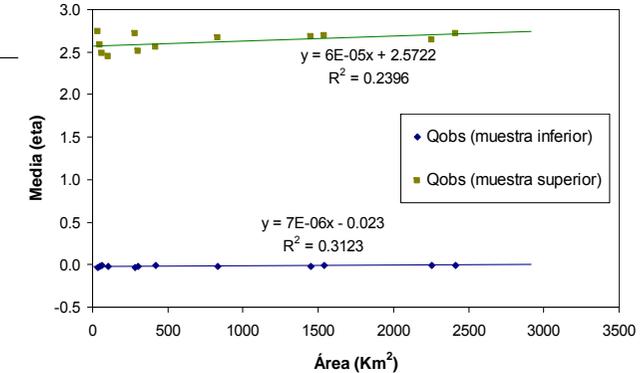
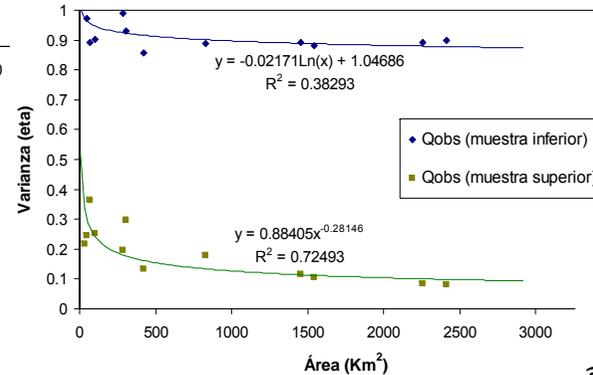
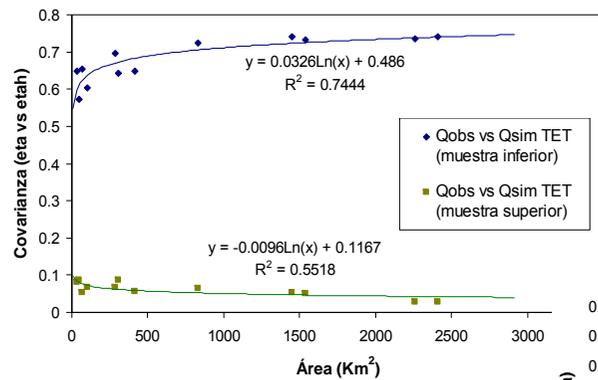
- Estimación de Lmom. de Q observados a partir de Lmom. de Q Tetis



# DMIP2, aplicación puntos no aforados

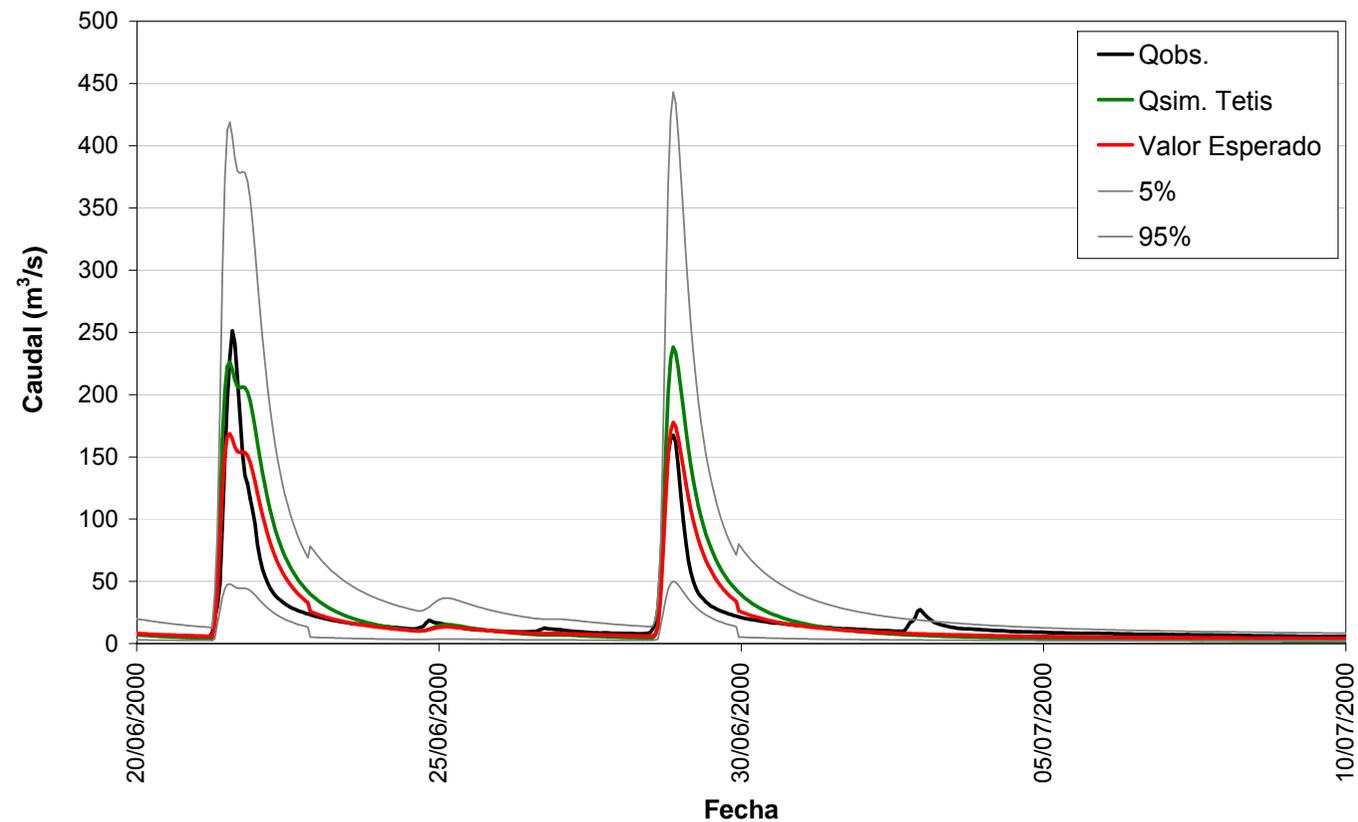
## Regionalización parámetros fdp conjuntas

- Estimación de parámetros de las fdp conjuntas Normales truncadas. Variable de regresión: Área de la cuenca



# Resultados, aplicación MCP + regionalización puntos no aforados

- Cuenca Osage Creek, afluente del Río Illinois



# Conclusiones

- Se presenta una metodología basada en el pos-procesador de incertidumbre MCP para estimar la incertidumbre predictiva asociada a las simulaciones o predicciones realizadas con un modelo hidrológico.
- Se muestra como la separación de los datos históricos en dos muestras permite una mejor adaptación del modelo estadístico tanto a los valores altos, como a los valores medios y de estiaje.
- Se propone el uso de FDP paramétricas en lugar de la Weibull P.P. al hacer la transformación NQT. Se han evaluado varias funciones entre las cuales se ha seleccionado la GEV.
- El uso de FDP paramétricas posibilita la extensión de la metodología a puntos no aforados, mediante la estimación de los Lmomentos de la FDP de los valores observados y de los parámetros de la fdp conjunta con una técnica de regionalización.
- Los resultados son muy satisfactorios y actualmente se está evaluando la combinación de varios modelos en una tentativa de reducir la incertidumbre.

**Agradecimientos:** el presente trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio español de Ciencia e Innovación a través de los proyectos “FloodMed” (CGL2008-06474-C02-02/BTE) y Consolider-Ingenio “SCARCE” (2010-CSD2009-00065)

# Gracias por la atención!

**Contacto:**

**Juan Camilo Múnera**

E-mail: [juamues1@doctor.upv.es](mailto:juamues1@doctor.upv.es)

[juancmunera@yahoo.es](mailto:juancmunera@yahoo.es)

Tel: 96 387 76152

Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA)

Universidad Politécnica de Valencia

<http://lluvia.dihma.upv.es/>