



# *La modelación matemática de la peligrosidad de inundación en el siglo XXI*

**Prof. F. Francés**

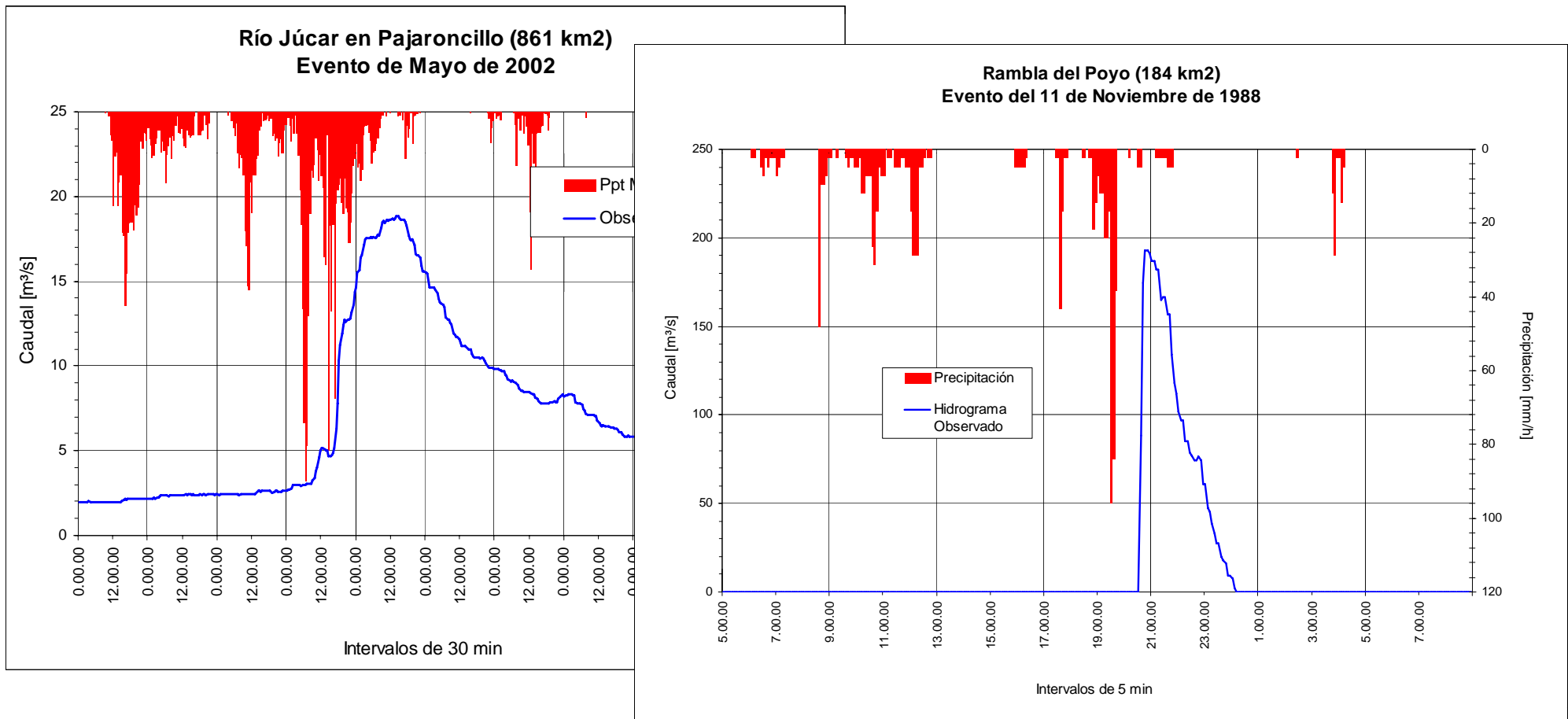
***Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental  
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente  
Universitat Politècnica de València***

- ❑ Introducción
  - Peligrosidad y riesgo
  - El paradigma de la Avenida de Proyecto
- ❑ Análisis de frecuencia de crecidas con información adicional
  - Información no sistemática (histórica y de paleocrecidas)
  - Avenida Máxima Probable (PMF)
- ❑ Modelos estadísticos no-estacionarios
- ❑ Estudio de las comarcas de las Marinas
  - Estimación cuantiles mediante generación de tormentas sintéticas
  - Modelación hidrológica distribuida
- ❑ Inundaciones costeras: modelo mixto estadístico
- ❑ Estimación de la incertidumbre
- ❑ Conclusión



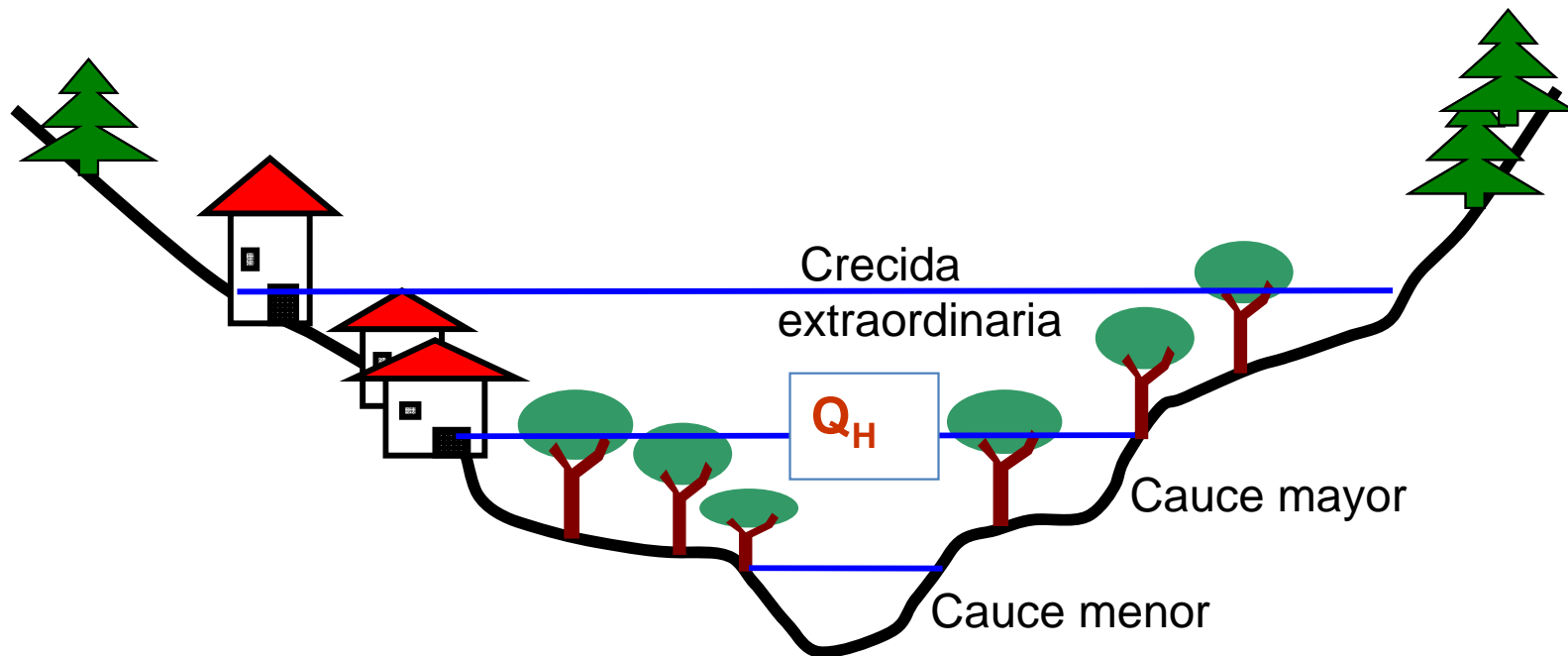
# Introducción

- Son episodios de escorrentía superficial => necesidad de una precipitación mínima



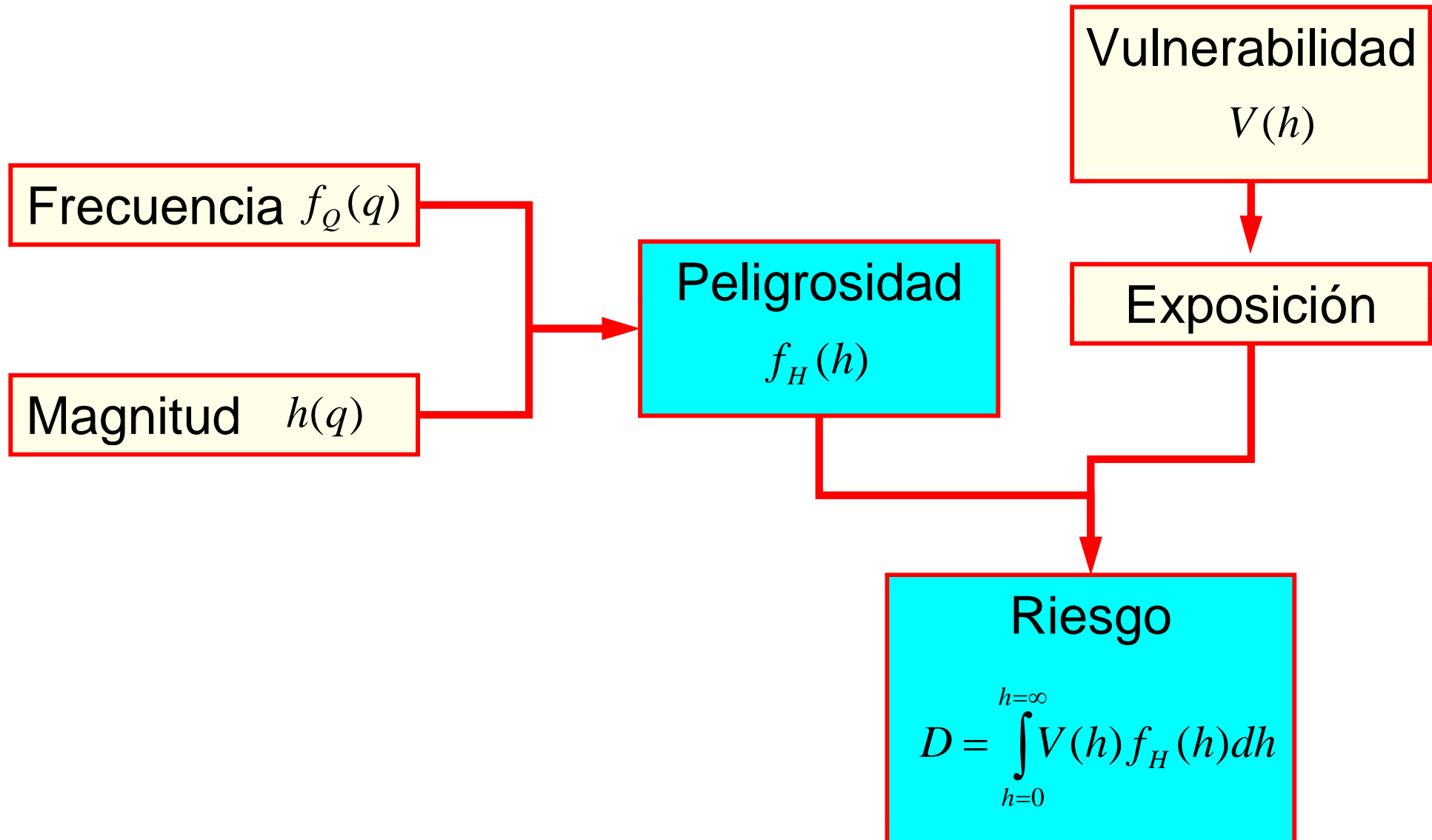
- ❑ No todas las crecidas originan inundaciones => Se necesita definir un umbral de inundación

$Q_H$  ~ máxima capacidad de desagüe Zona de Inundación





# Peligrosidad y riesgo



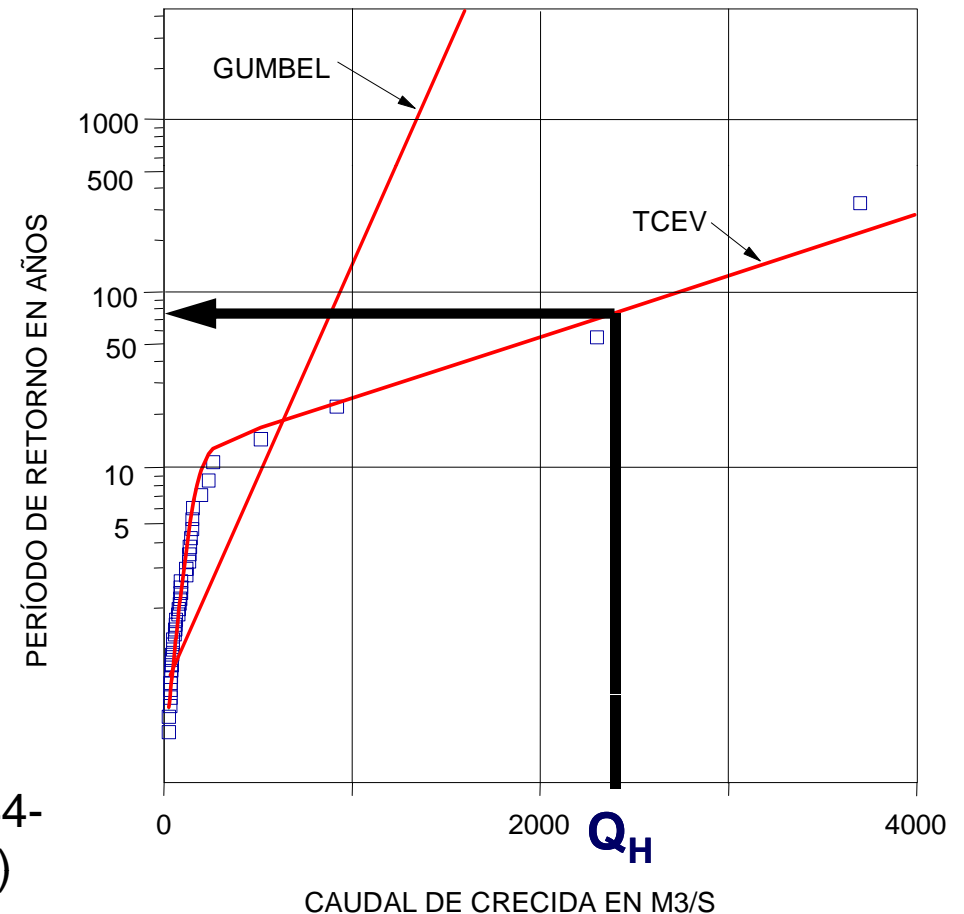
# Frecuencia de las inundaciones

- Inundación si  $q > Q_H \Rightarrow$  Frecuencia de inundaciones:

$$p = P [ Q > Q_H ] = 1 - F_Q(Q_H)$$

- Con estación de aforos:

Río Turia en Manises (1944-45 a 1988-89 con 41 años)



- ❑ El paradigma de la "Avenida de Proyecto" se basa en el concepto de "Tormenta de Diseño"

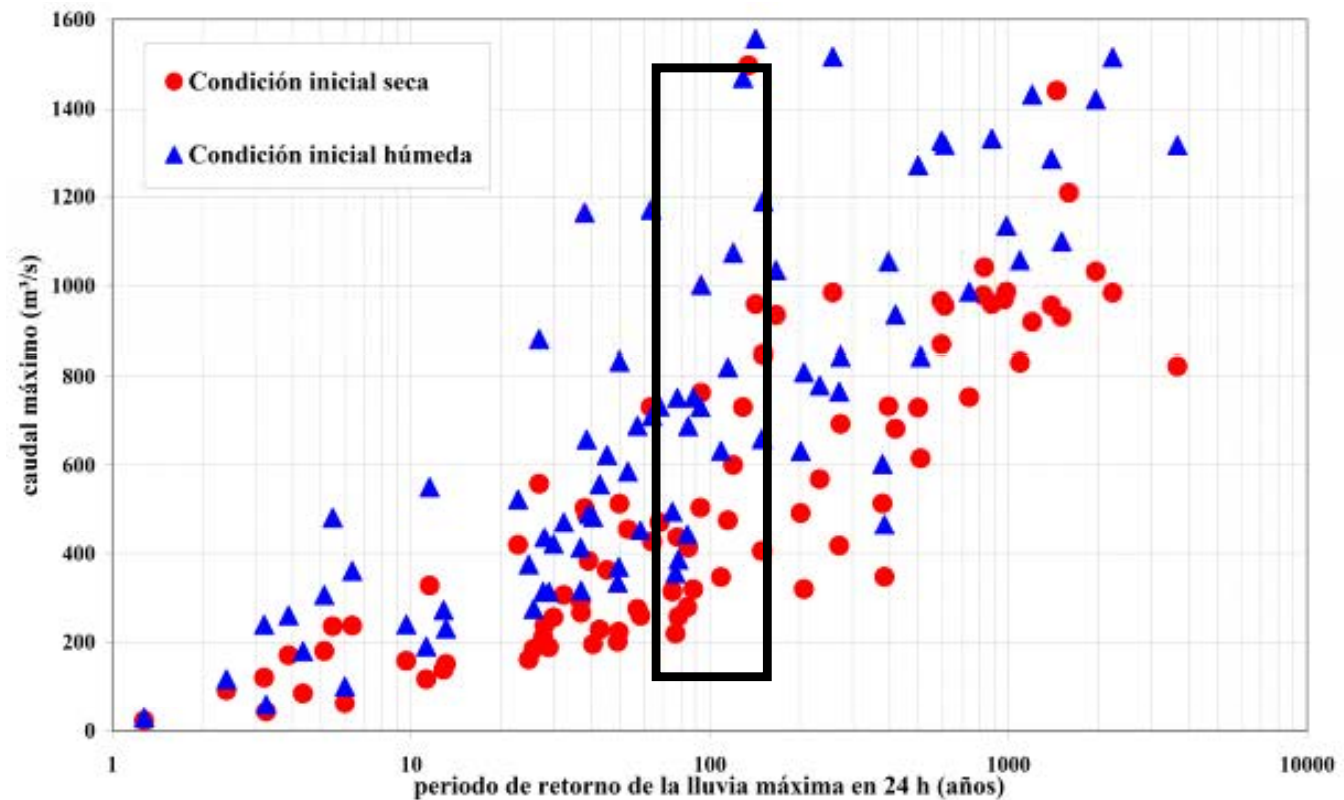
**Análisis estadístico de  $P_d \Rightarrow$  Tormenta de diseño de  $T \Rightarrow$  Simulación**

- ❑ Ventaja "pírrica": Una sola simulación (enfoque clásico)
- ❑ Inconvenientes específicos:
  - Distribución temporal y espacial de la precipitación
  - Estado inicial único
  - **¿ $Q_T$  lo genera  $P_{d_T}$ ?**



- ¿Una única tormenta uniforme en el espacio y simple en el tiempo + un estado inicial dará el resultado correcto?

**NO!**



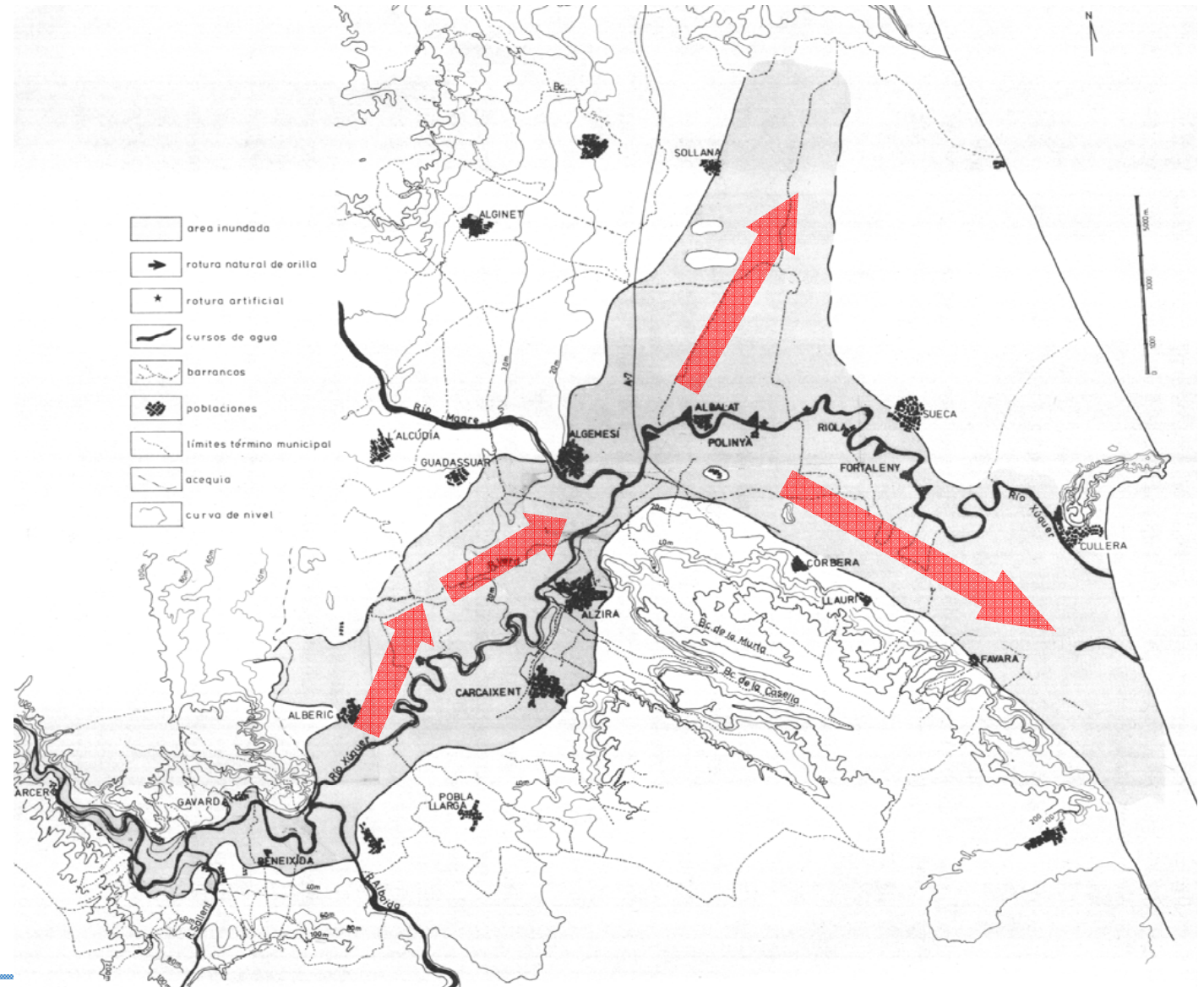
Distribución empírica de  $Q_{max}$  en R.Poyo en A7 situación actual con la probabilidad de la tormenta sintética

- ❑ Magnitud en un punto = conjunto de factores que afectan al daño producido:
  - Calado del agua
  - Duración
  - Velocidad
  - Cantidad de sedimentos



# Llano aluvial convexo

Área inundada por el  
río Xúquer en 1987  
(Carmona y  
Segura, 1989)

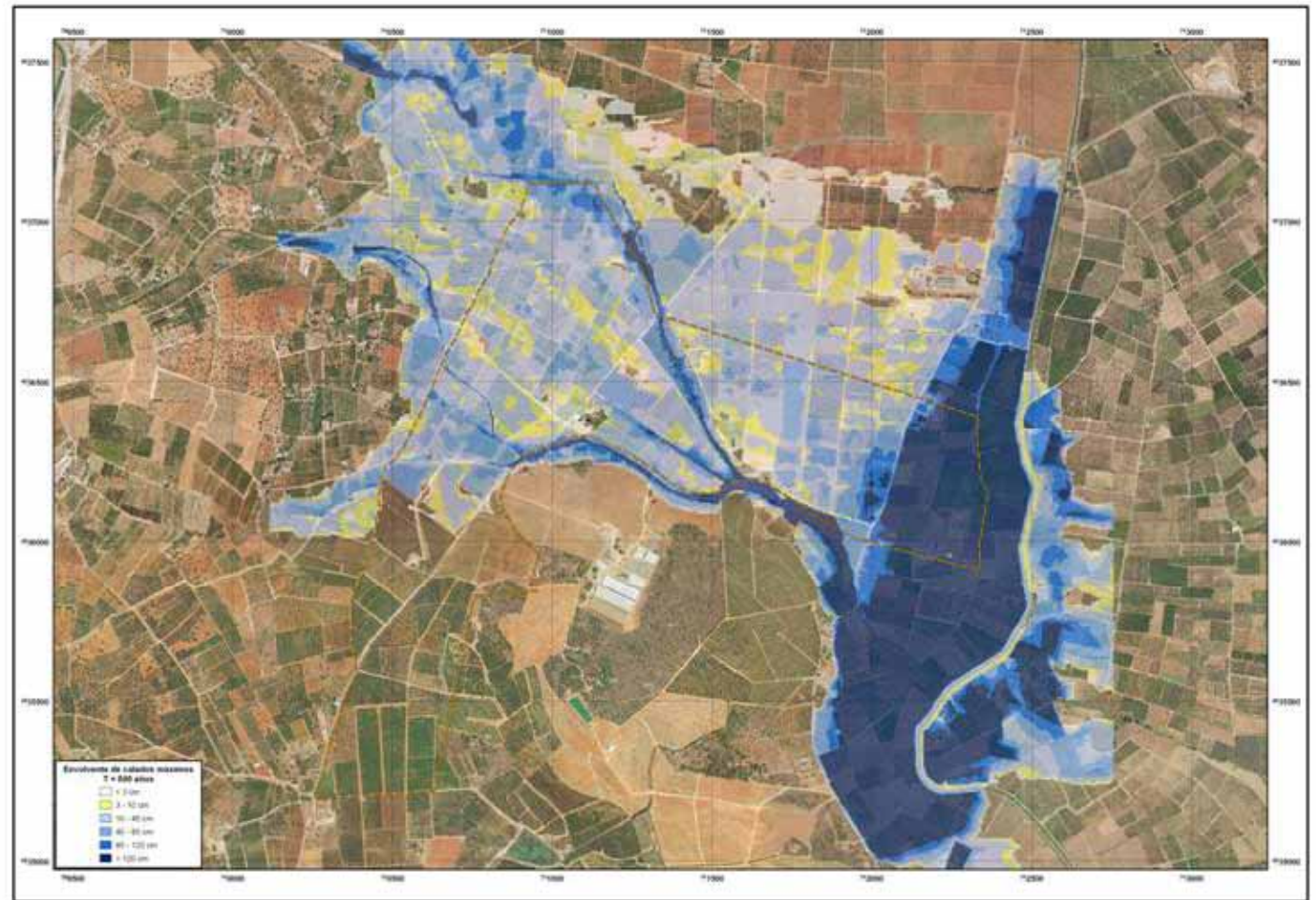


- ❑ Magnitud en un punto = conjunto de factores que afectan al daño producido:
  - Calado del agua
  - Duración
  - Velocidad
  - Cantidad de sedimentos
  
- ❑ Estudio Hidráulico: conversión de caudal en magnitud:
  - Modelos hidráulicos flujo transitorio 2D
  - Topografía de detalle: Lidar



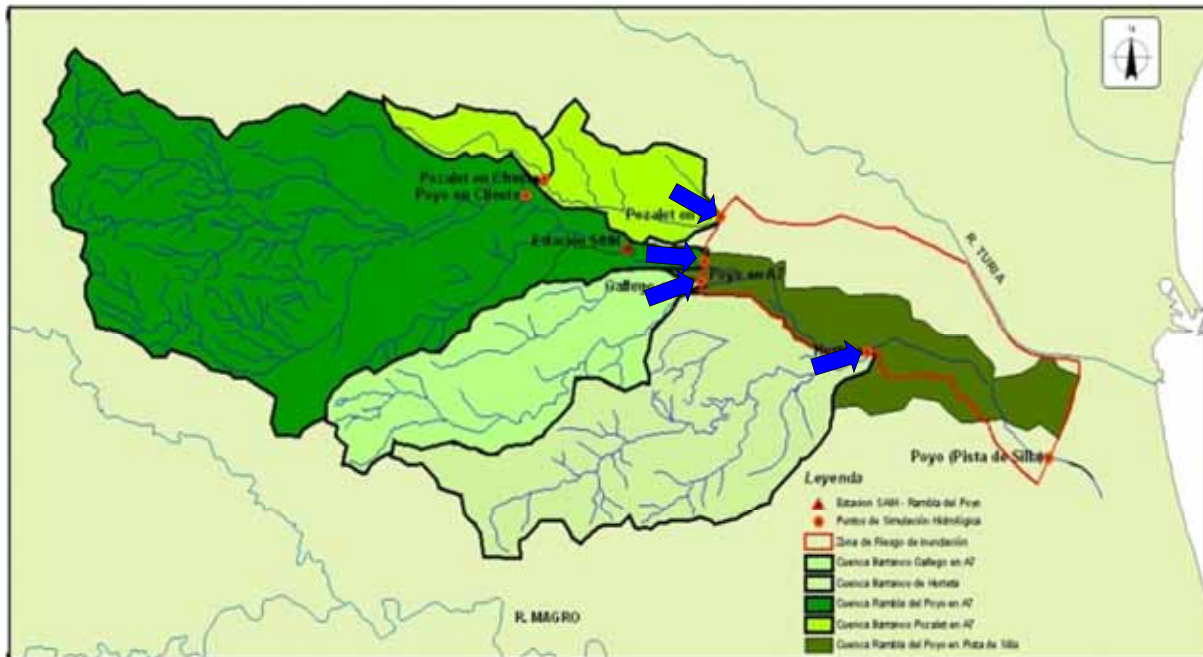
# Mapa de peligrosidad

- Escala zona inundación: Un mapa de magnitudes para cada T



Calados para T=500 años  
en la Garrofera (IIAMA-  
Hidrogaia, 2008)

- Zona de Inundación: Tratamiento puramente hidráulico
  - El modelo hidrológico proporciona el o los hidrogramas de entrada a la zona de inundación

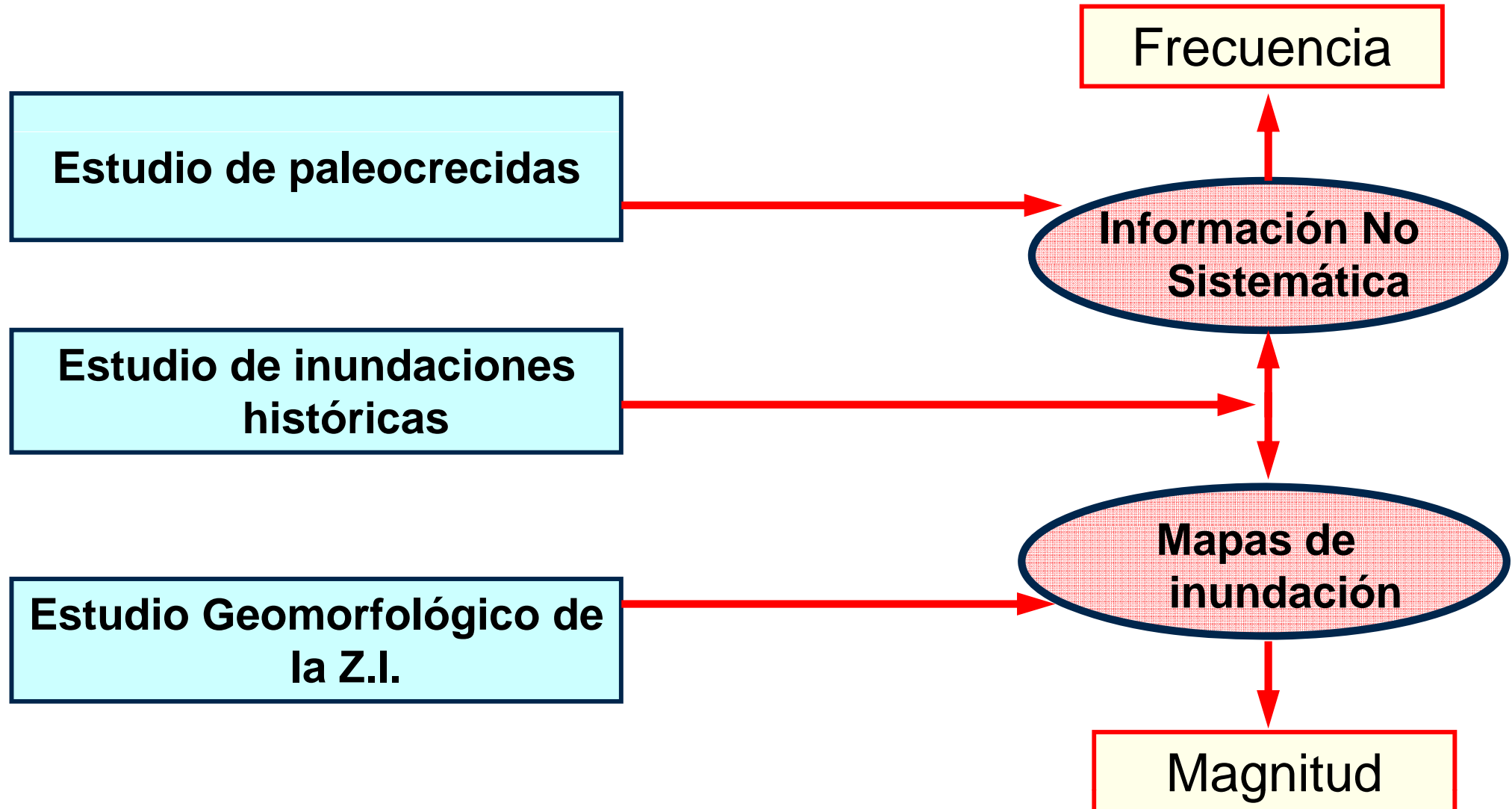


Entradas a la ZI de R. Poyo:

- Bco. del Pozzalet
- Rambla del Poyo
- Bco. Gallego
- Bco. Horteta
- Lluvia neta sobre la ZI



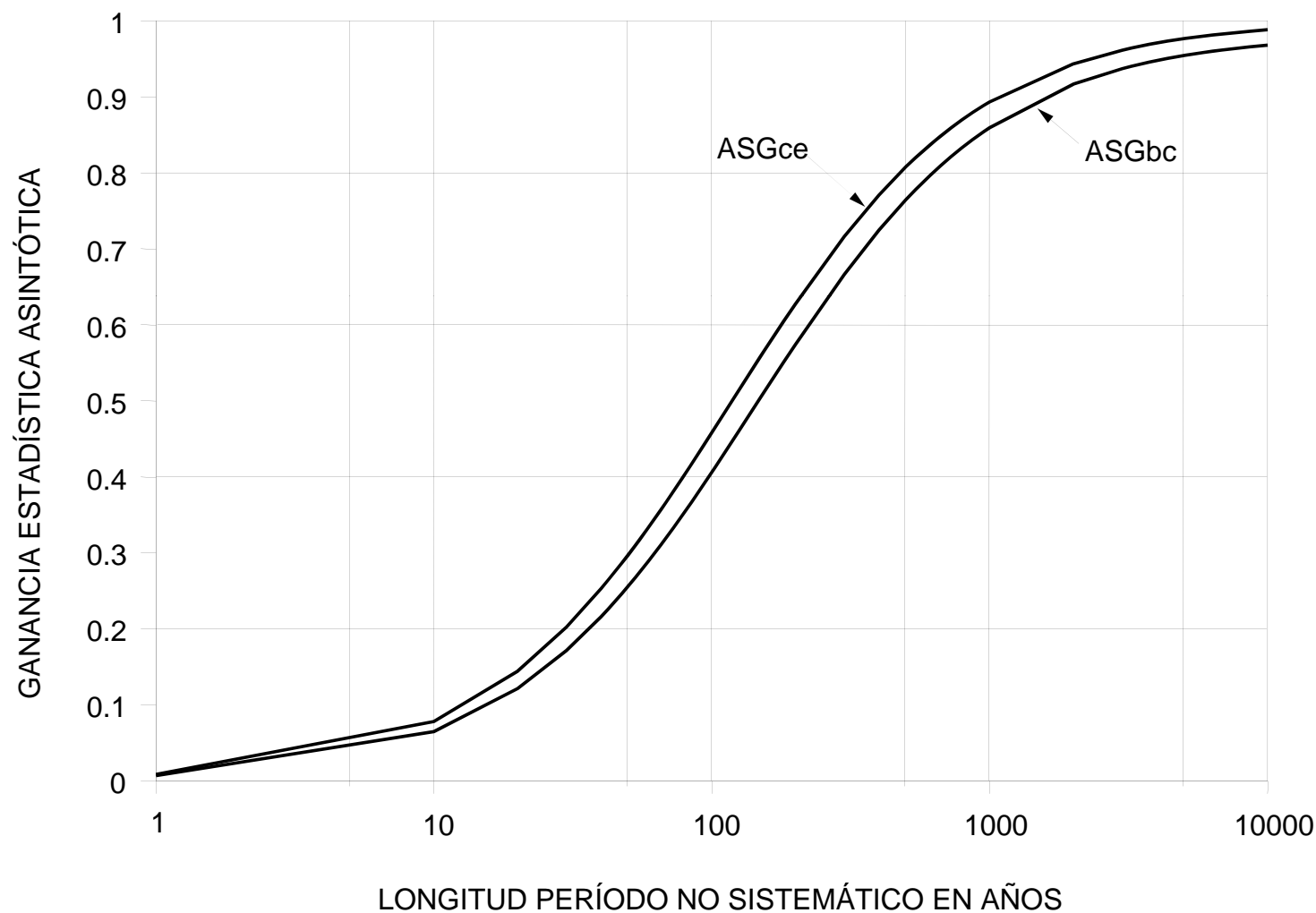
# Reducir la incertidumbre





# Análisis estadístico de crecidas con información adicional





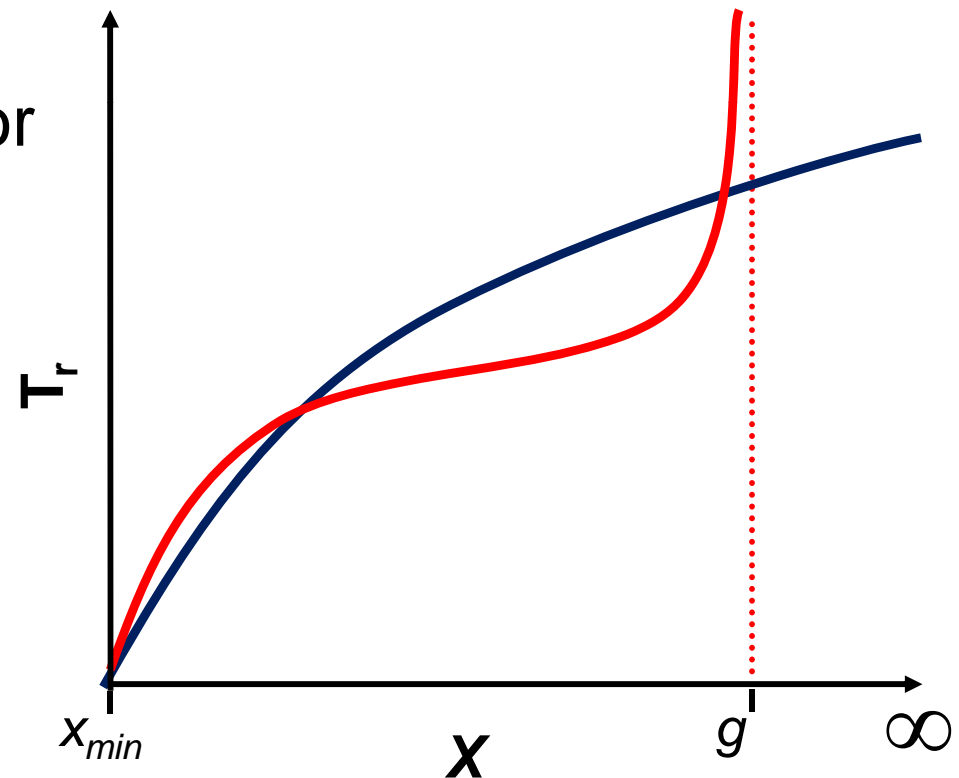
TCEV

N= 100

H= 50

T= 100

- ❑ La PMF es la mayor crecida físicamente posible en una cuenca específica (Smith and Ward, 1998)
  - Tiene un significado físico basado en la PMP, y proporciona un límite superior
  - Su existencia cambia el comportamiento de la cdf para T medios y altos:

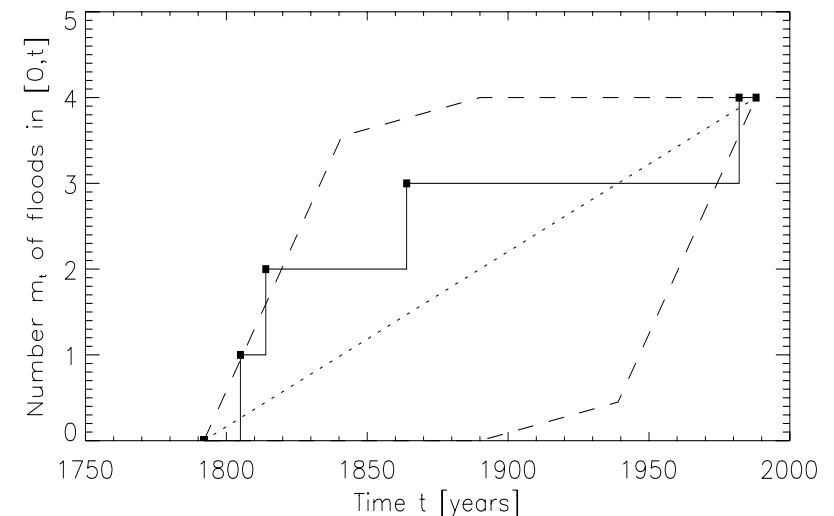




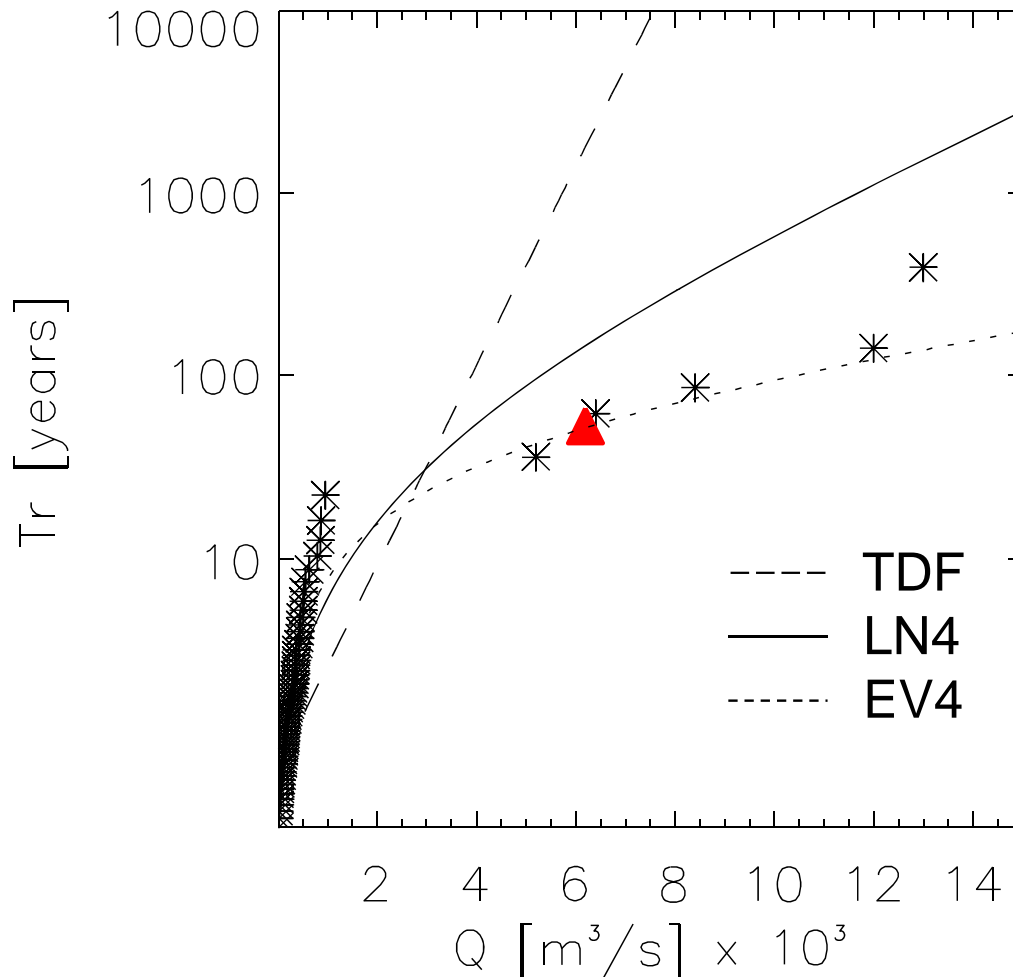
# Río Xúquer en la Ribera

- ❑ Estudio CEDEX (1983) con reconstrucción **inundaciones históricas** en Carcaixent
  - Límite de inundación  $X_H = 6,200 \text{ m}^3/\text{s}$
  - Período histórico: 1792 a 1945
  
- ❑ Comprobación de la estacionaridad mediante el test de Lang (Lang et al., 1999)

Año	Caudal Punta (m <sup>3</sup> /s)
1632	Superior a 6.200
1778	6.200
1805	8.400
1814	6.400
1864	13.000
1923	4.800



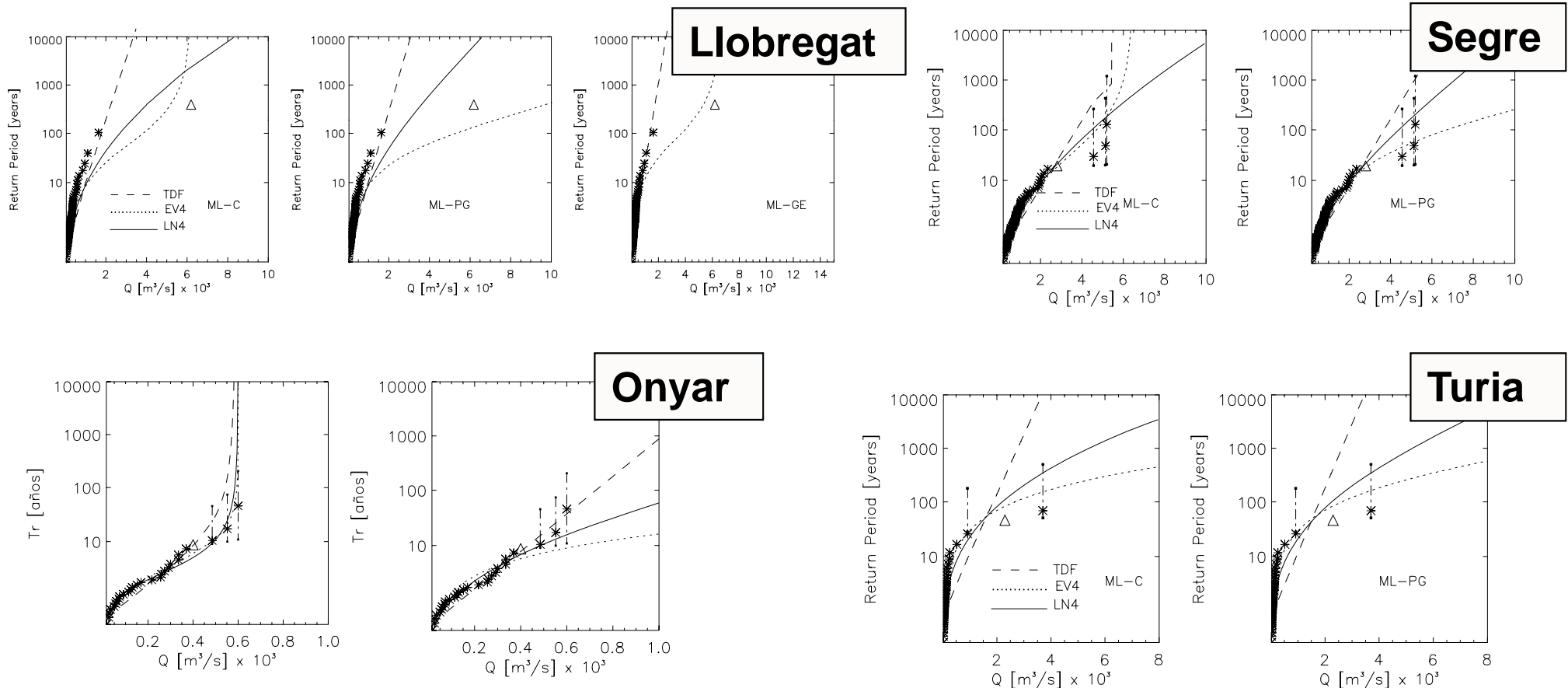
# Estimación prefijando $g$



- ❑ PMF (utilizando caudal específico en Tous)  $\sim 33,900 m^3/s$
- ❑ Efecto “pata de perro” por dos poblaciones
- ❑ Diferente aproximación al límite:
  - Más lenta TDF
  - Más rápida EV4

# Comparación de modelos

- ❑ EV4 funciona mejor en cuenca mediterránea, por existir coeficientes de asimetría elevados (Takara and Tosa, 1999)

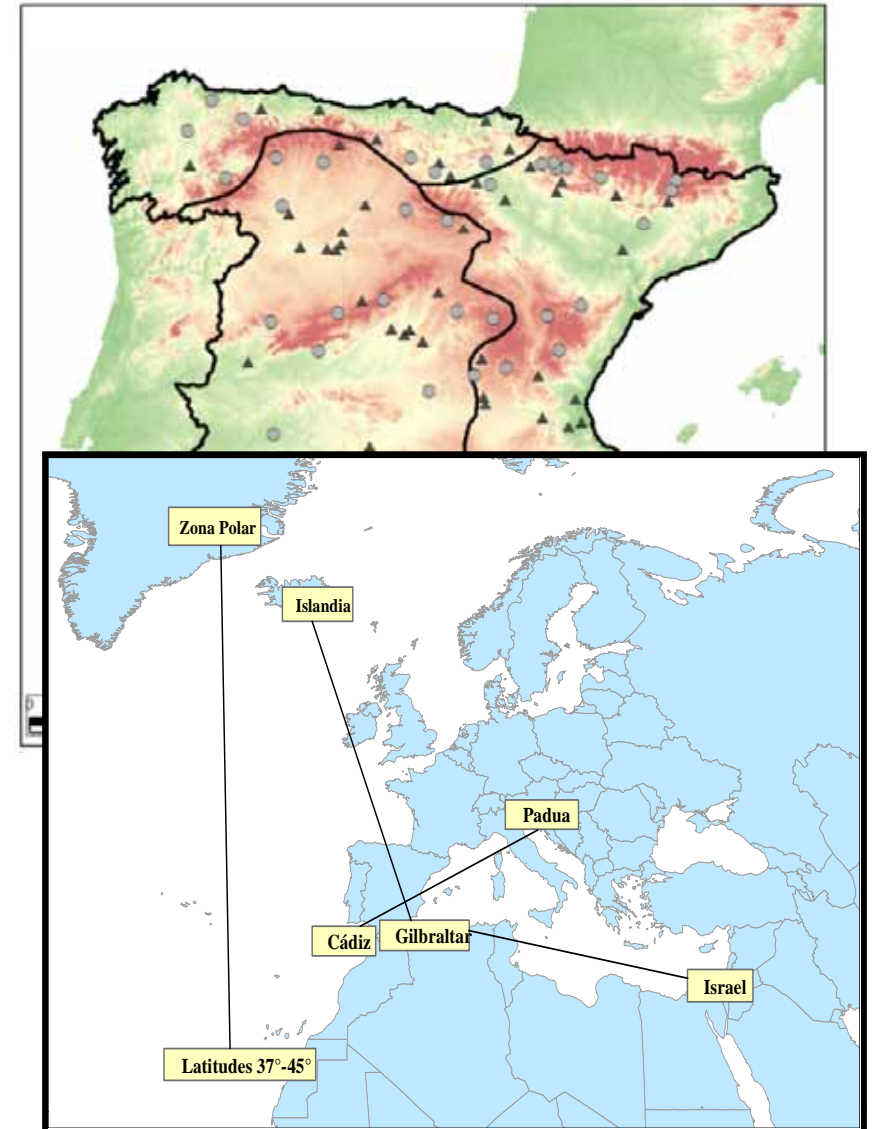




# Modelos no estacionarios

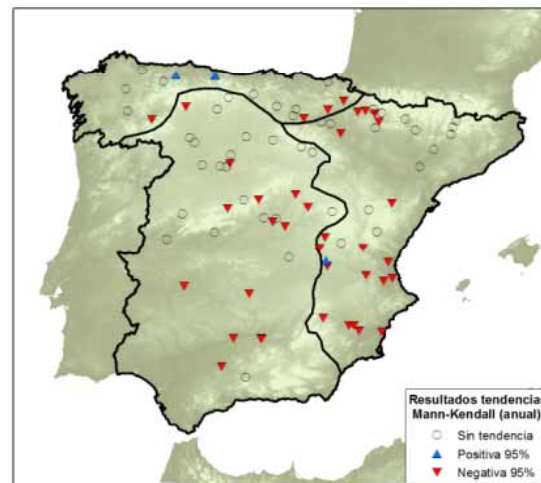
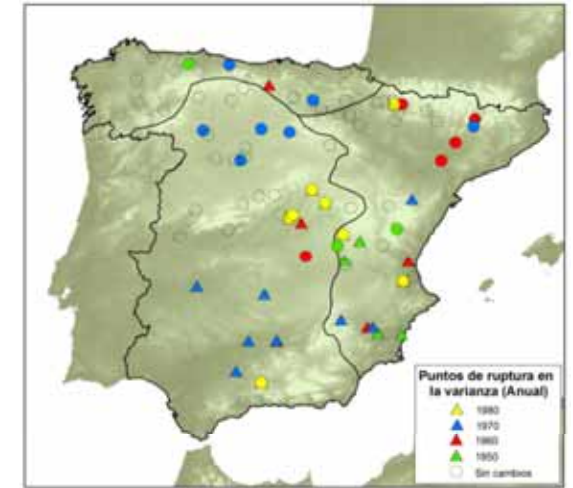
# Caso de estudio

- ❑ 80 estaciones de caudales
- ❑ 4 índices macroclimáticos
  - Oscilación del Atlántico Norte (**NAO**)
  - Oscilación del Ártico (**AO**)
  - Oscilación del Mediterráneo Occidental (**WeMO**)
  - Oscilación del Mediterráneo (**MO**)
- + Fenómeno del Niño como placebo



# Evidencia de no estacionaridad

- Puntos de ruptura  
(Test de Pettitt)
- Tendencias temporales  
(Tests de Mann-Kendall,  
Pearson y Spearman)

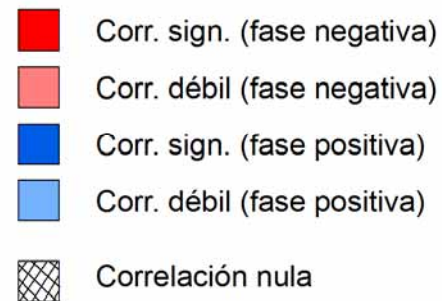
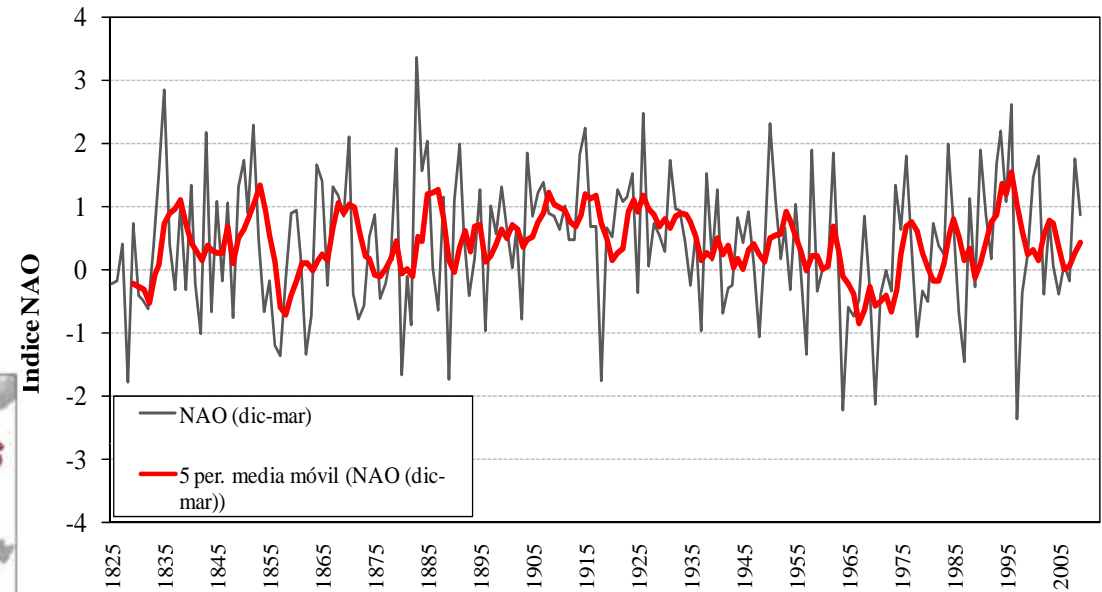
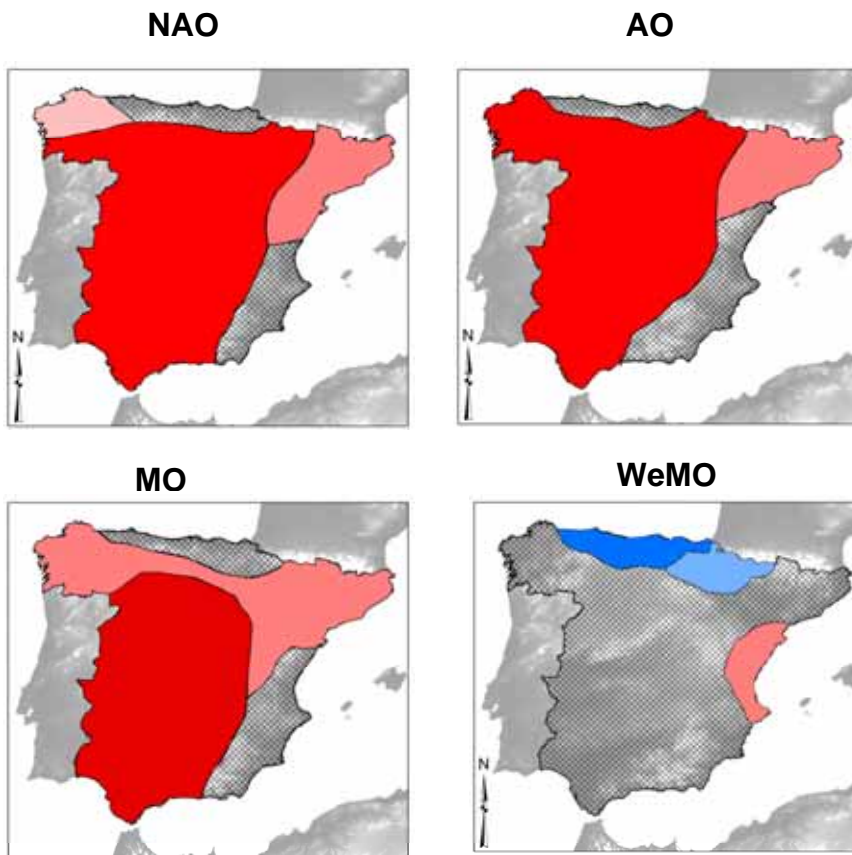


En la media

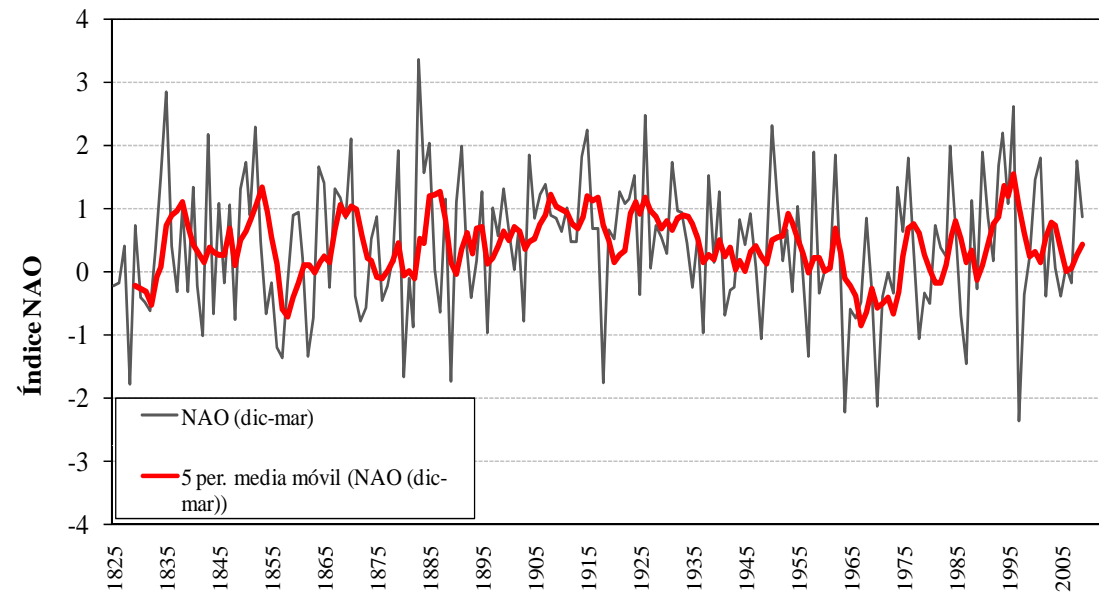
En la varianza



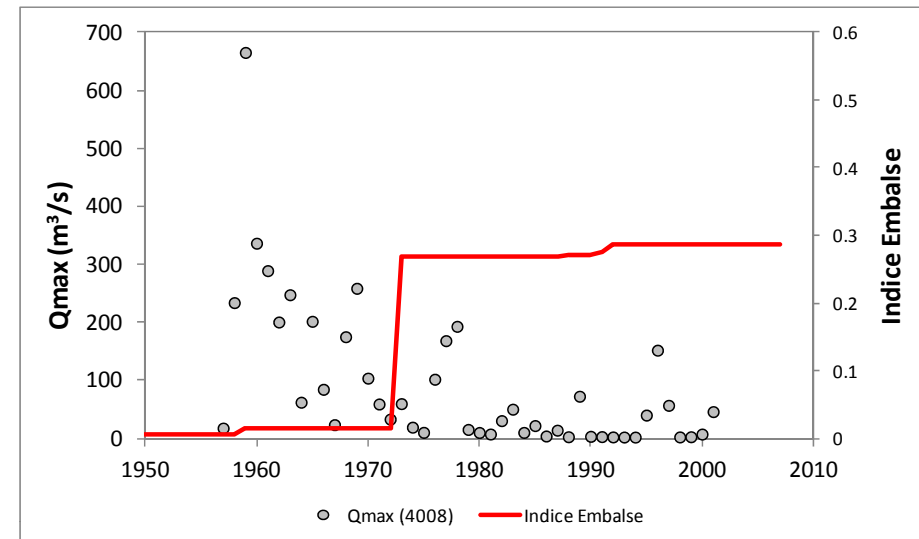
## □ Cambios en el clima



## ❑ Cambios en el clima

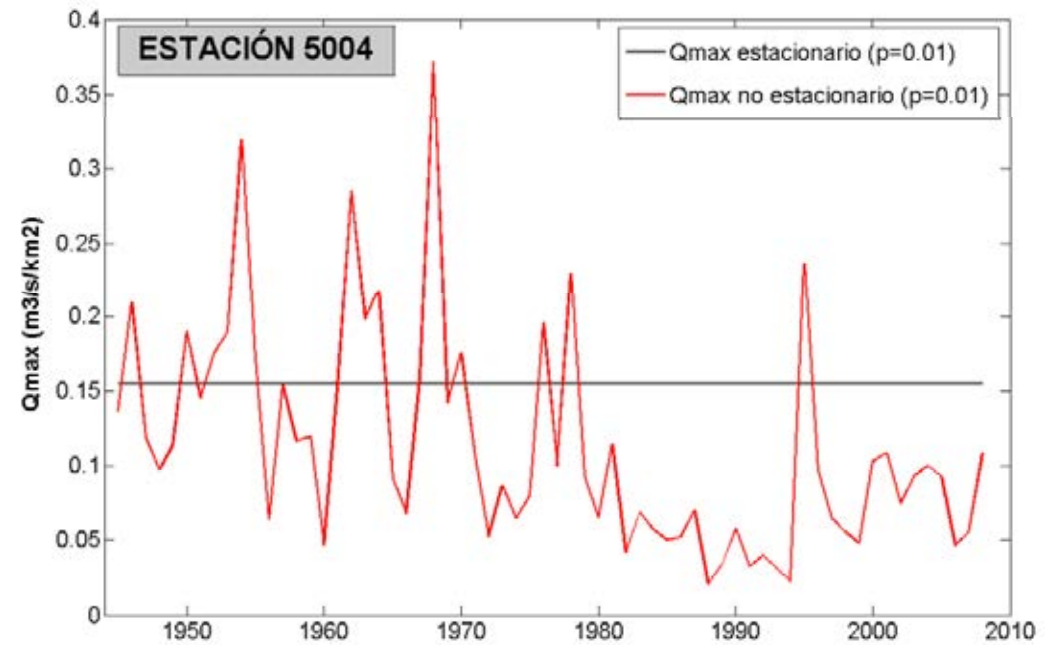
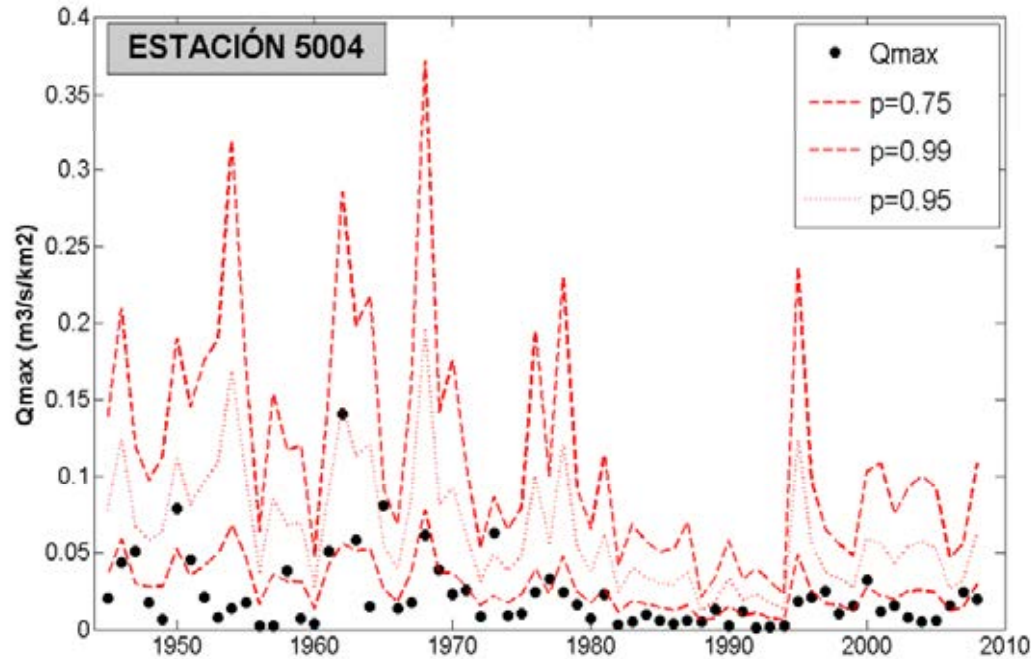


## ❑ Construcción de embalses





# Modelo GAMLSS



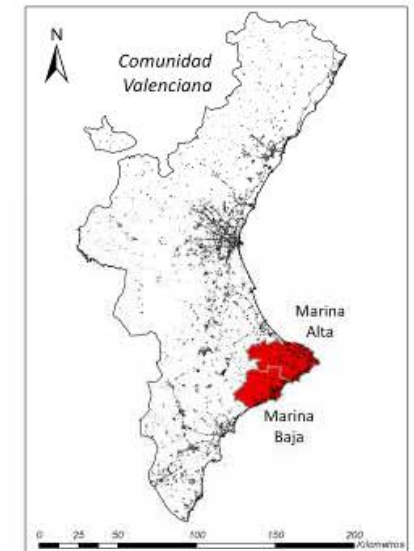
Lognormal:  $\theta_1 \sim \text{NAOw} + \text{AOw} + \text{cs}(\text{IE})$ ;  
 $\theta_2 \sim \text{NAOi}-1$



# Estudio de las comarcas de las Marinas



- ❑ Dentro del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación de las comarcas de la Marina Alta y de la Marina Baja:
  - Estimación frecuencia de las Pd máximas anuales
  - Construcción de un modelo estocástico de tormentas y generación sintética de un número elevado de eventos
  - Implementación de un modelo hidrológico distribuido
  - Análisis del estado de humedad inicial del suelo a escala diaria
  - Asignación de probabilidad final mediante un modelo estadístico multivariado **en más de 200 puntos**

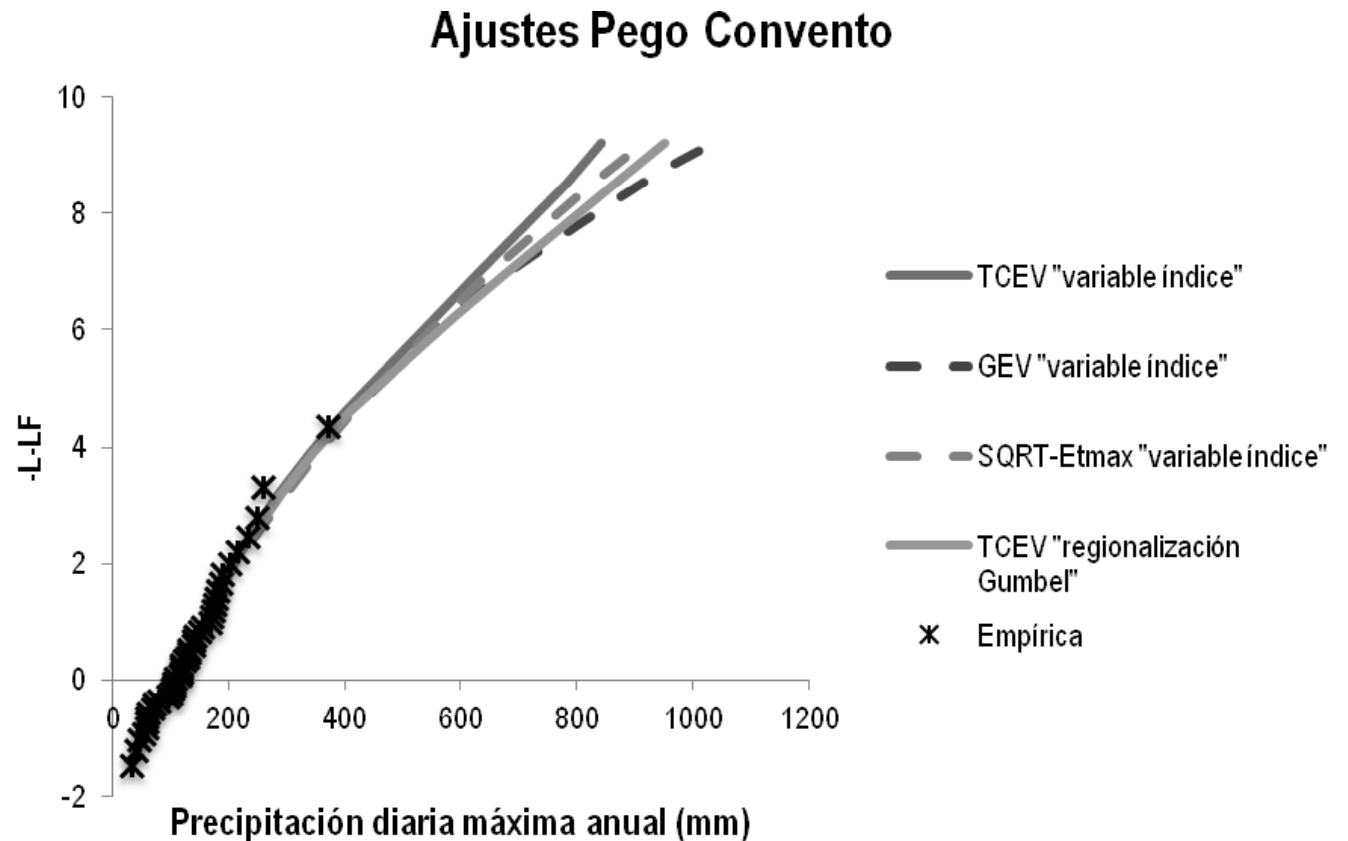
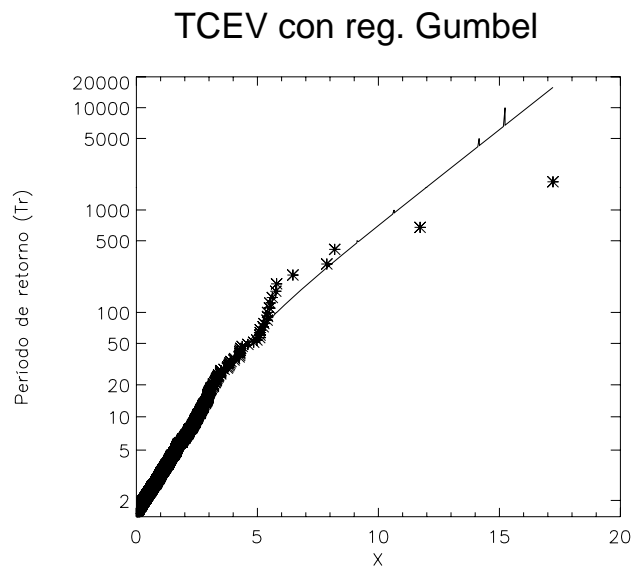


- ❑ Análisis regional con 45 estaciones AEMET y SAIH => 1054 años equivalentes
- ❑ Comprobación homogeneidad mediante test de Fisher sobre el coeficiente de variación
- ❑ Modelos:
  - Regionalización por variable índice + diversas cdfs (incluyendo con límite superior)
  - Regionalización Gumbel y ajuste TCEV



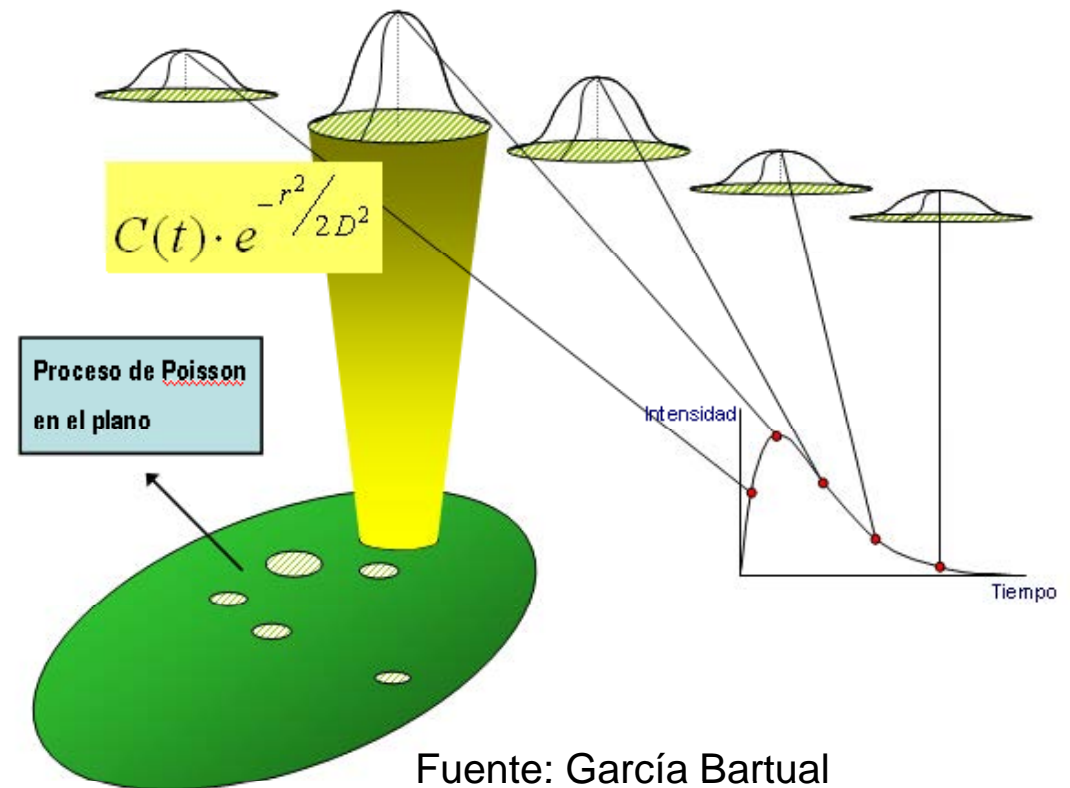
# Estudio de la Pd máxima anual

## □ Resultados:



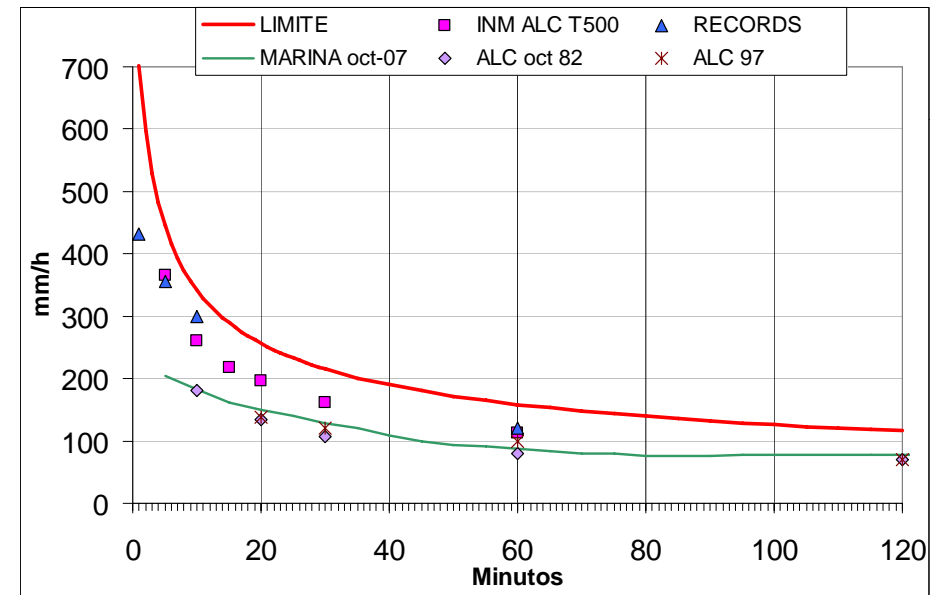
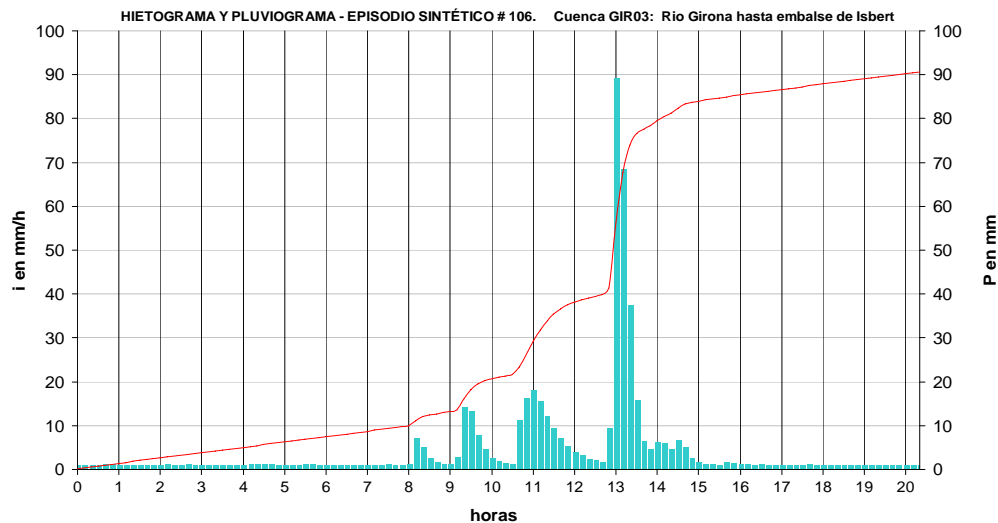
# Modelo de tormenta: RAINGEN

- ❑ Las tormentas son una superposición de “celdas”, cuya intensidad se determina según procesos estocásticos en el espacio y en el tiempo
- ❑ Modelo de Rodriguez-Iturbe e Eagleson (1987) pero mejorado por Salsón y García Bartual (2003)



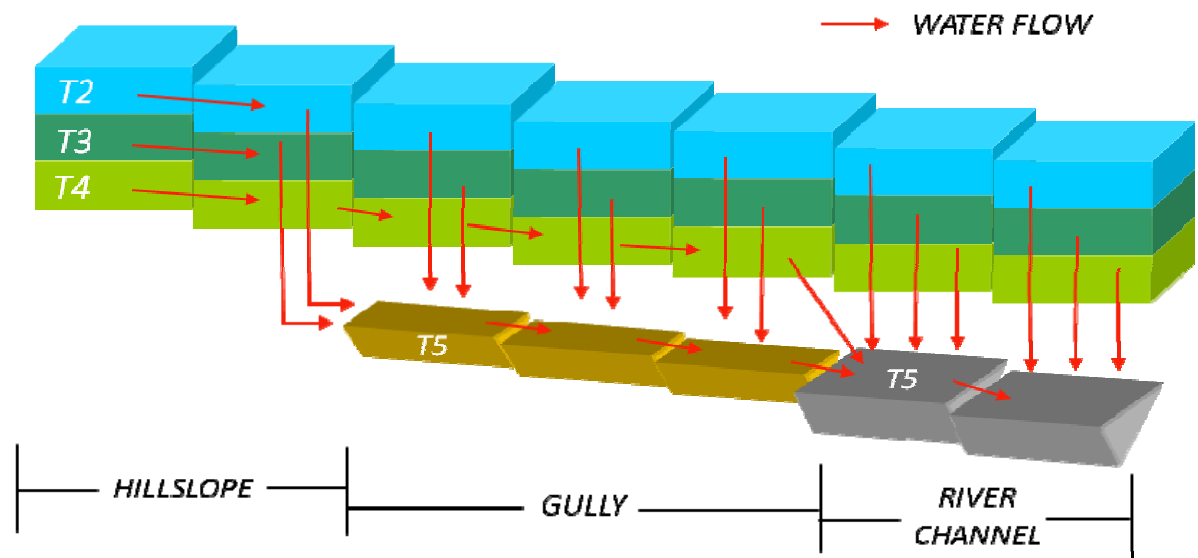


- ❑ Se generaron unas 500 tormentas sintéticas en una cuadrícula de 60x65 km con discretización de 1km y 10 min



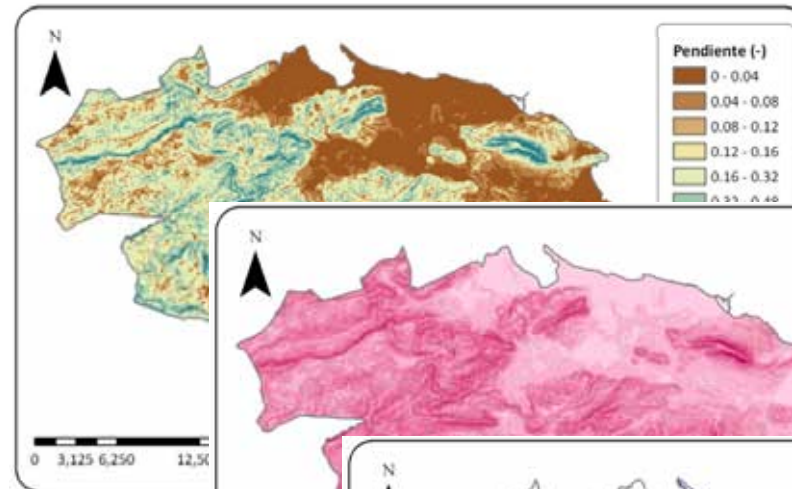
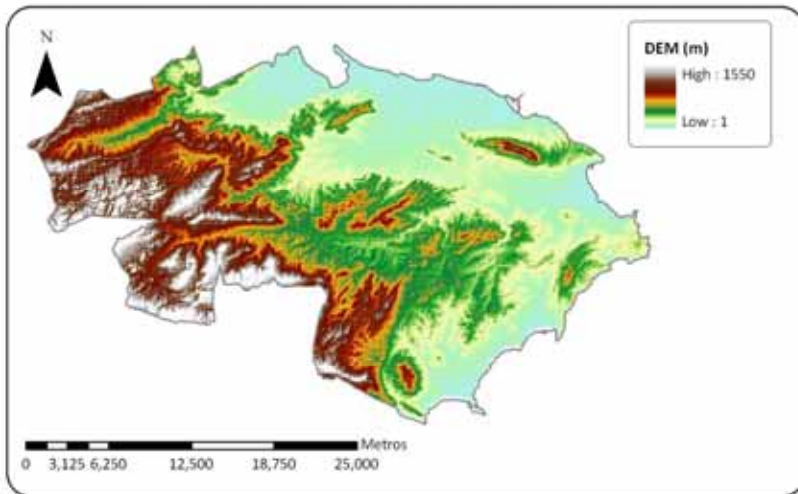
... y se seleccionaron 368

- ❑ Desarrollado por la UPV desde 1994 (v 7.3 en la web)
- ❑ Distribuido en el espacio:
  - => Reproducción variab. espacial del Ciclo Hidrológico
  - => Reducción del efecto de escala espacial
  - => Explotación de toda la información existente



# Modelo hidrológico: TETIS v8.1

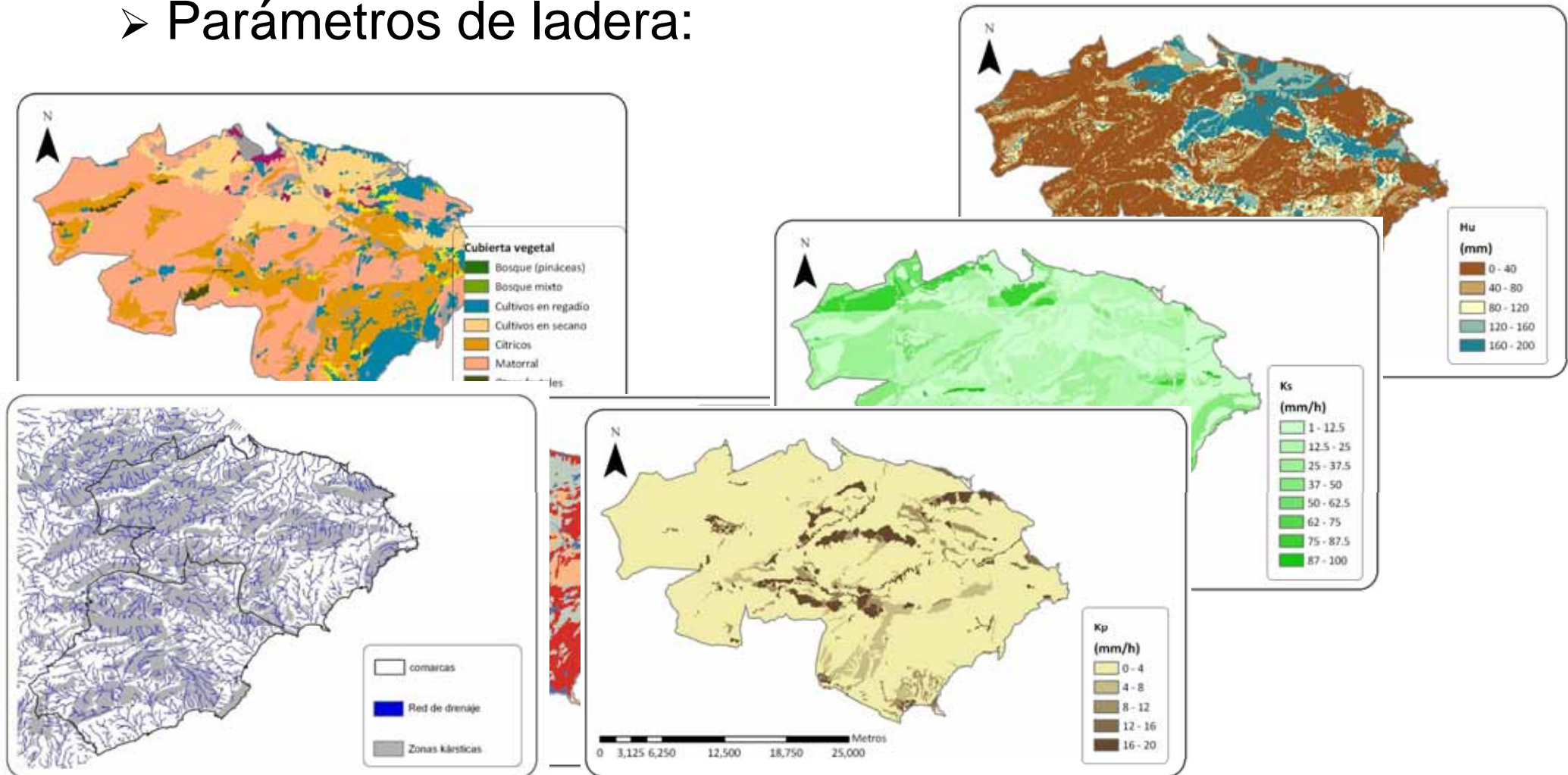
- Estimación de parámetros espaciales
  - Derivados del MED:



# Modelo hidrológico: TETIS v8.1

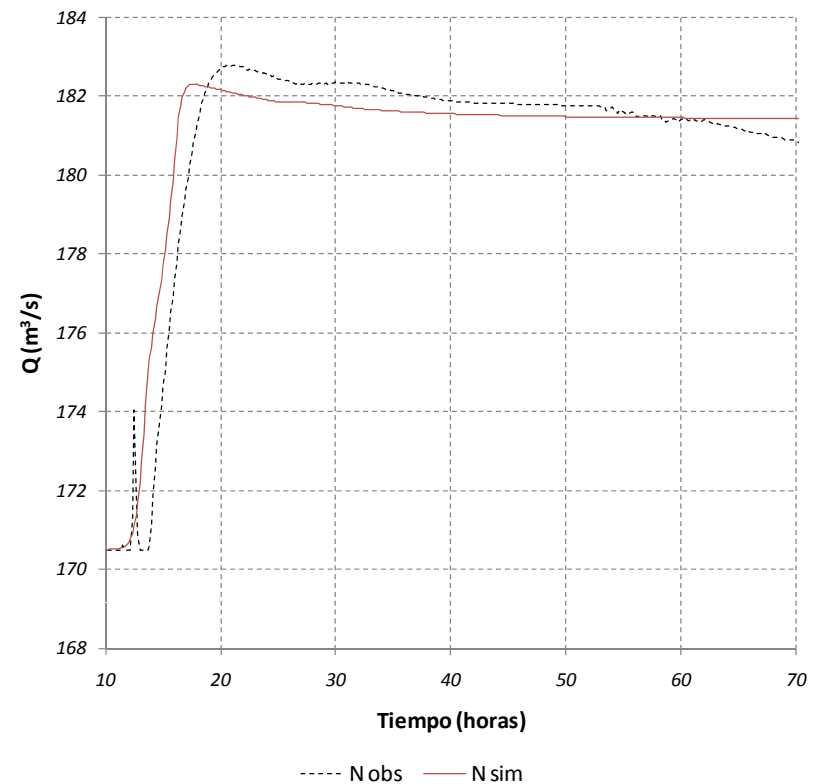
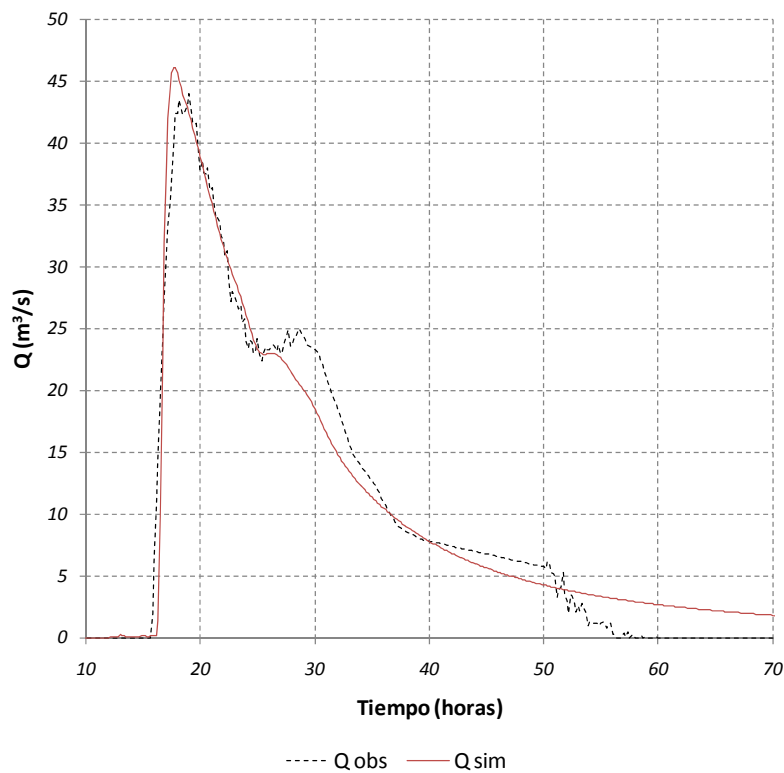
## □ Estimación de parámetros espaciales

### ➤ Parámetros de ladera:



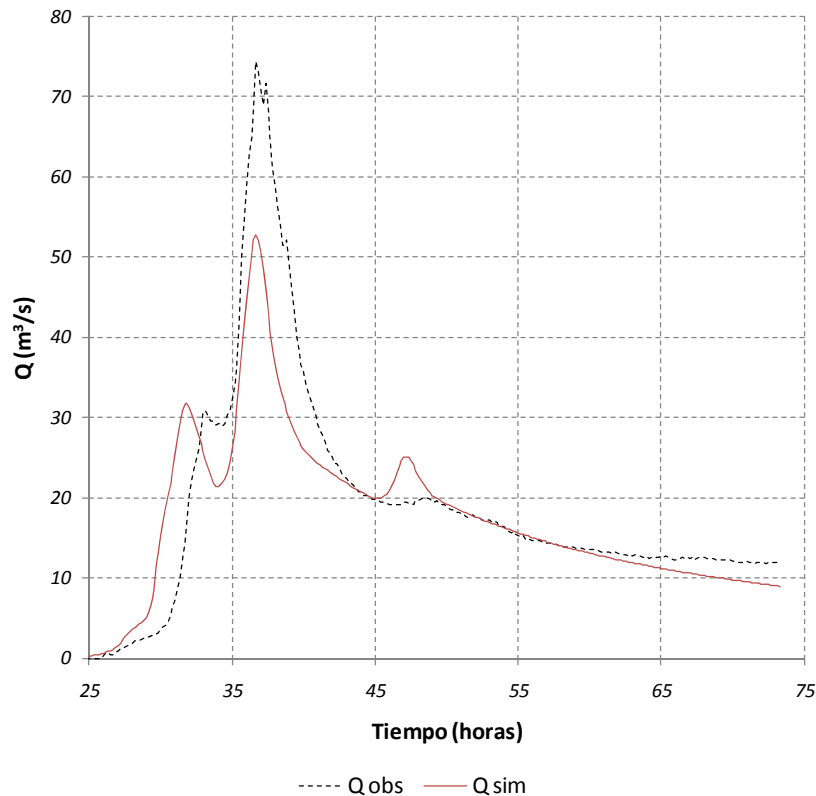
# Modelo hidrológico: TETIS v8.1

- Calibración: Caudal salida y nivel en embalse simulado y observado del evento de Abril 2003 en la estación SAIH "Isbert"

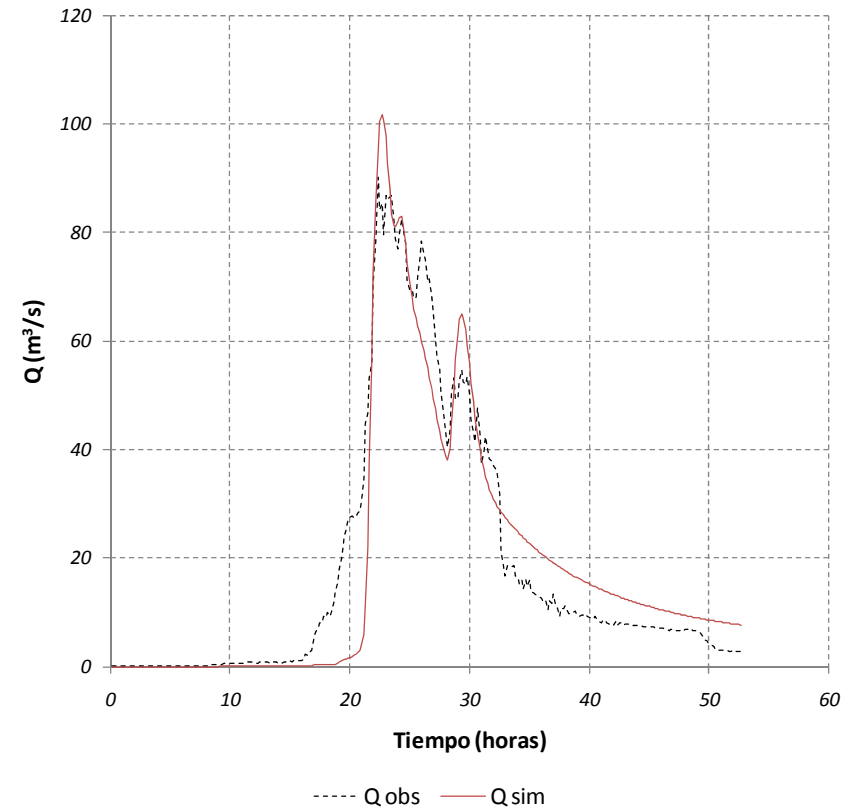




## □ Validación espacio-temporal



Estación de aforo de Marina Baixa, evento de Mayo 2002

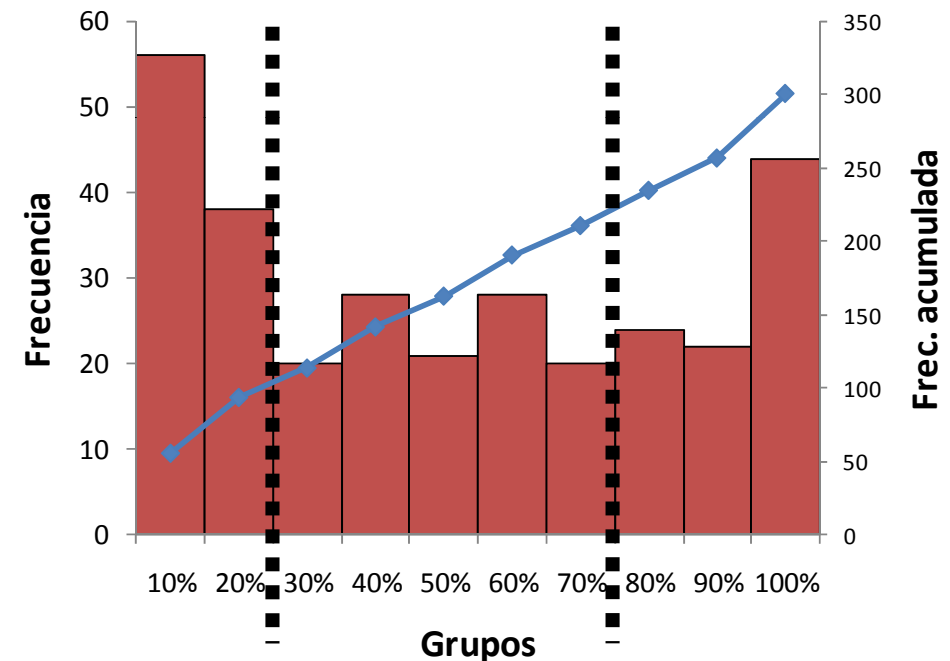


Estación de aforo de Guadalest, evento de Octubre 2007



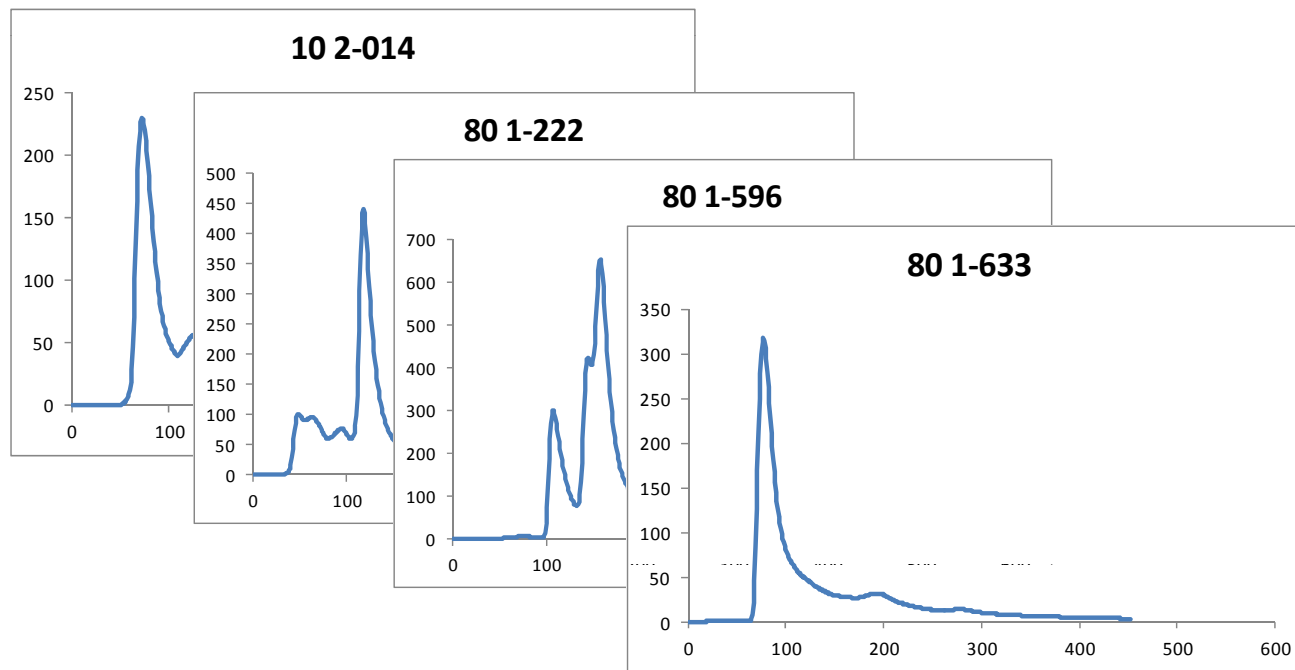
# Análisis estado humedad inicial

- ❑ Ajuste modelo diario en Rambla Gallinera
- ❑ Simulación continua 1943-2010
- ❑ Análisis frecuencia estados para  $P_d > 30\text{mm}$
- ❑ 3 estados de humedad:
  - Seco (10%)  $P = 0,3$
  - Medio (40%)  $P = 0,4$
  - Húmedo (80%)  $P = 0,3$



Histograma y distribución acumulada de humedad antecedente en el suelo obtenidos por simulación continua en la Rambla Gallinera

- ❑ 368 tormentas x 3 estados de humedad = 1104 eventos
- ❑ En algunas cuencas además x escenarios futuros que afecten la hidrología

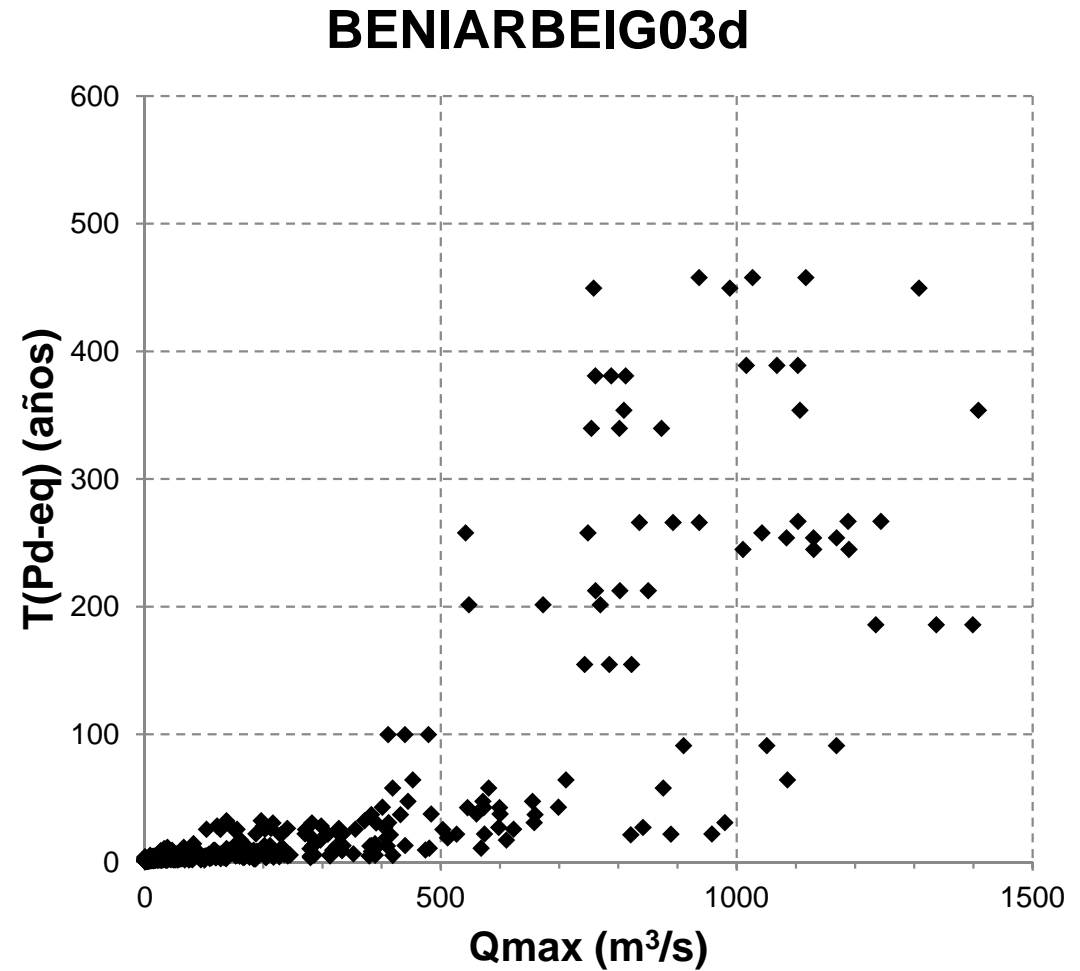
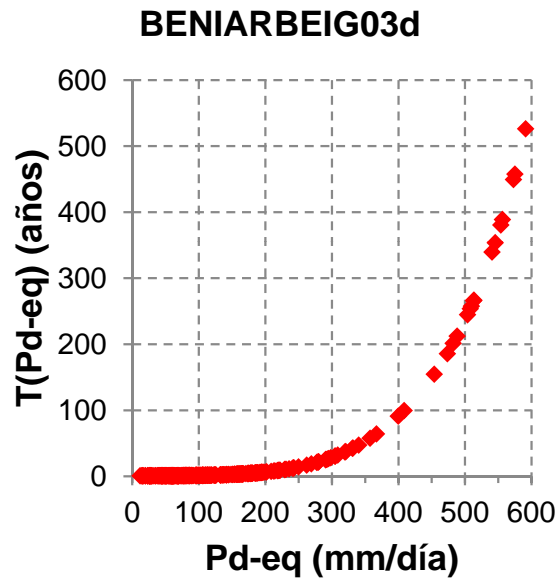


Hidrogramas generados en la desembocadura del Girona (Benairbeig03d)





# Caudales pico en función de T(Pd)



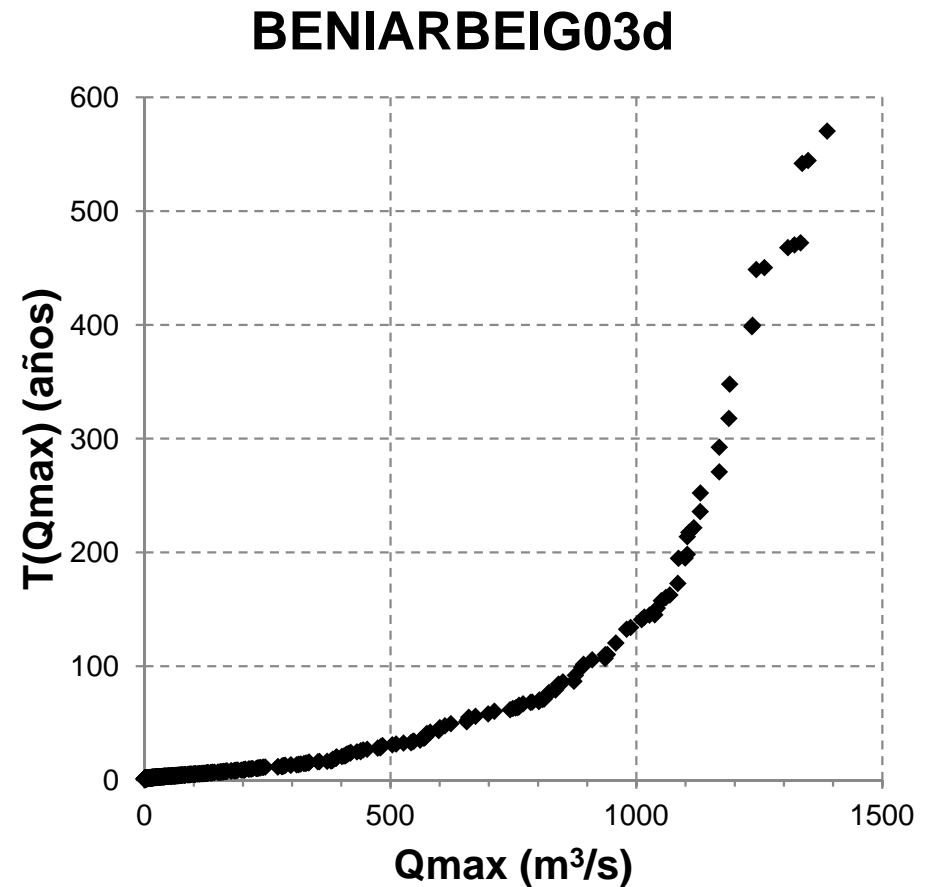
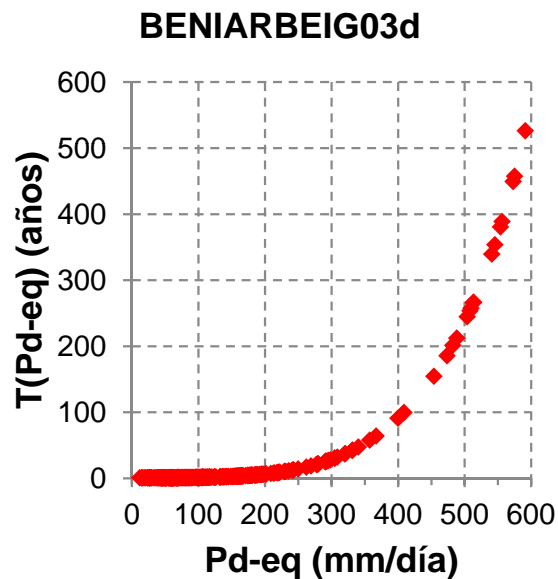
- Modelo multivariado de:
  - R = precipitación areal máxima de 24 horas
  - X = caudal pico (o variable de interés)
  - M = Estado de humedad inicial del suelo
    - Variable discreta (tres estados en este estudio)
- Finalmente la distribución marginal empírica de X:
  - Se conocen las marginales de R y M
  - Si M es independiente de R

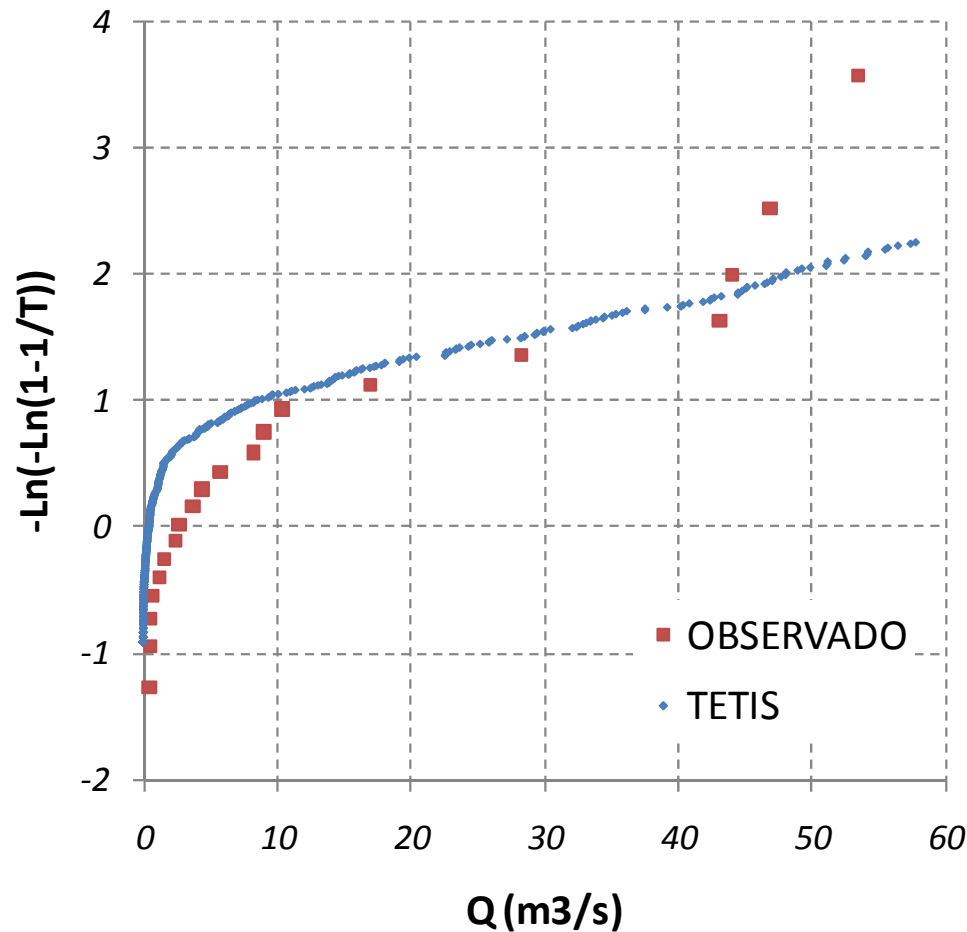
$$F_X(a) \approx \sum_{j=1}^3 \left\{ P_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_{ij}(a)}{N_{ij}} [F(R_{i+1}) - F(R_i)] \right\}$$



# Asignación de probabilidad

- ❑ Función de distribución de probabilidad en la desembocadura del Girona

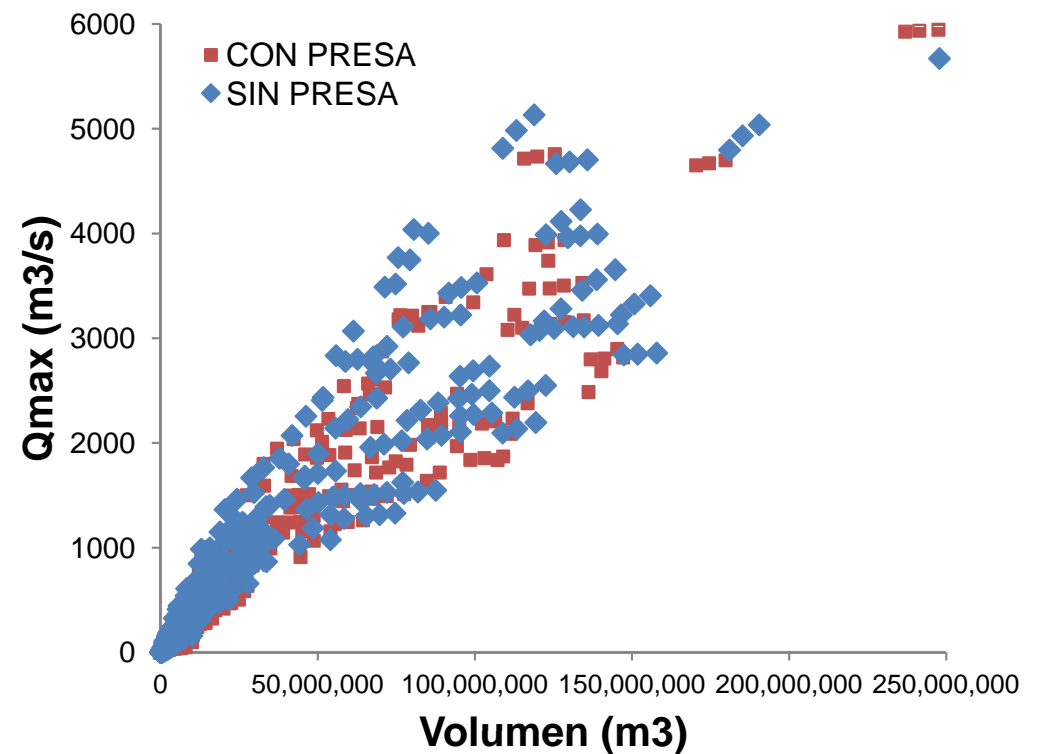
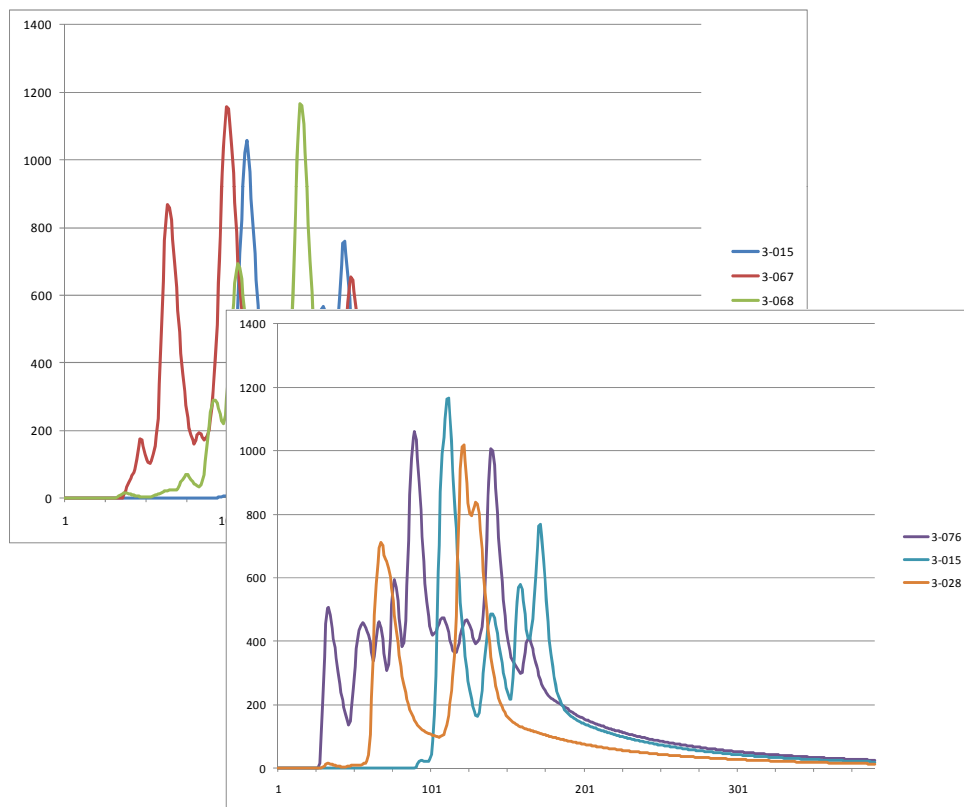




Estación de aforo de Gallinera.  
Funciones de distribución empíricas de  
los caudales máximos.

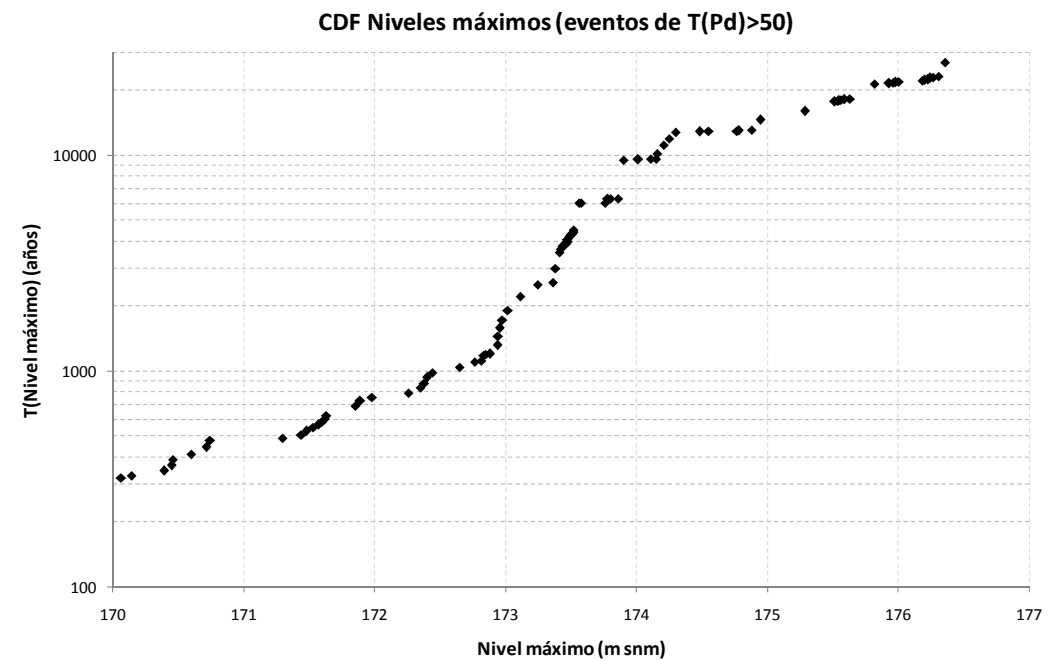
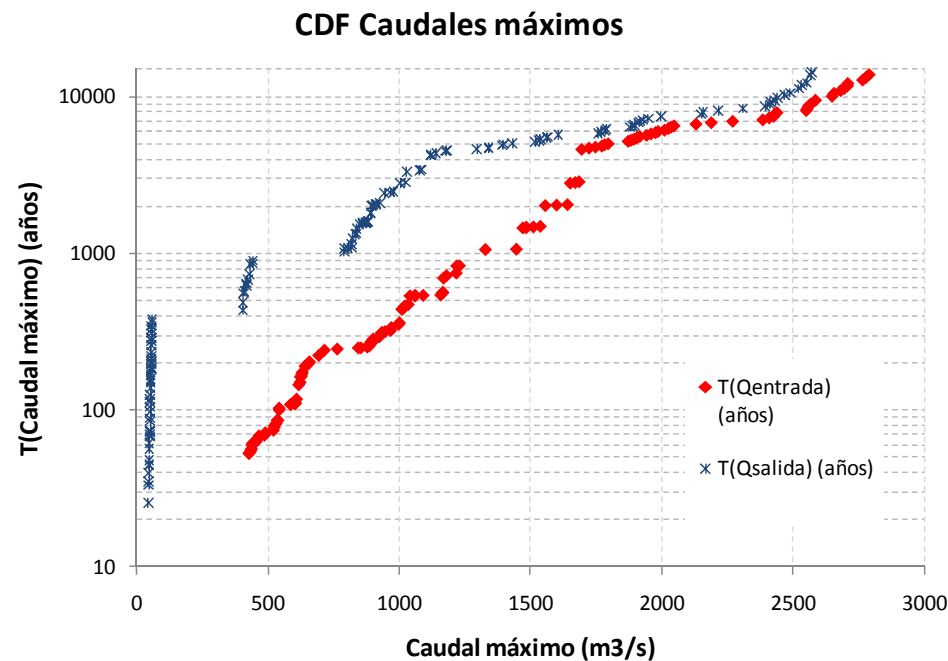


- ❑ Futuro embalse de Isbert: análisis múltiples hidrogramas similar magnitud



Selección eventos con  $Q_p$  entre 400 y 500 años

- ❑ Futuro embalse de Isbert: análisis estadístico variable de interés





# Inundaciones costeras

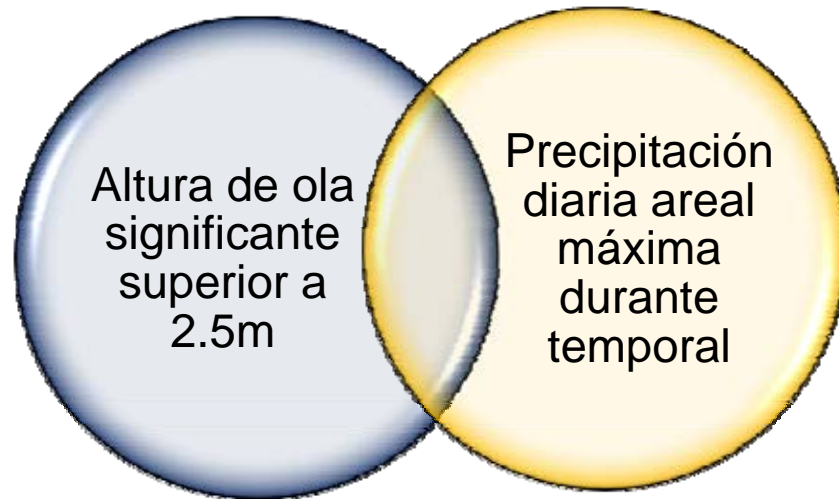
- ❑ Tratamiento independiente => **infravaloración**
- ❑ Nivel constante del nivel del mar => aproximación **grosera**
- ❑ Dependencia total: tormenta y temporal se producen simultáneamente y con el mismo T => **sobrevaloración**
- ❑ Modelación conjunta: pocos trabajos

*Defra/Environment Agency (2003, 2005)*

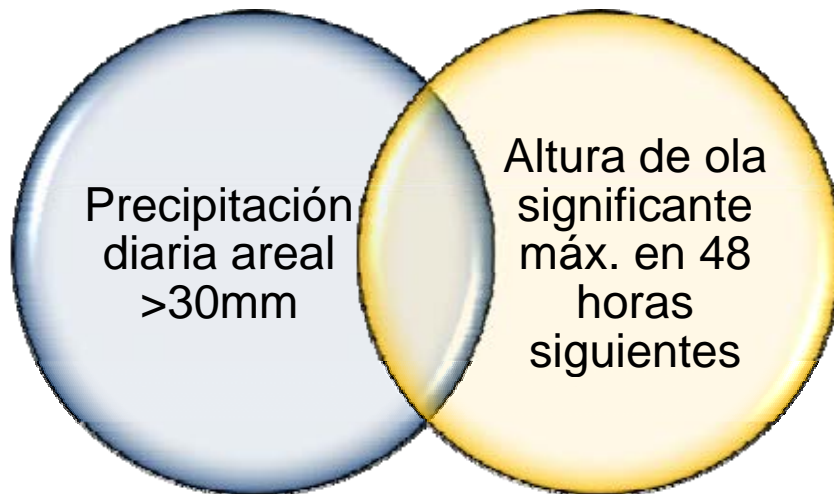
Proyecto Integrado *FLOODsite* (2008)



# Desembocadura del Girona



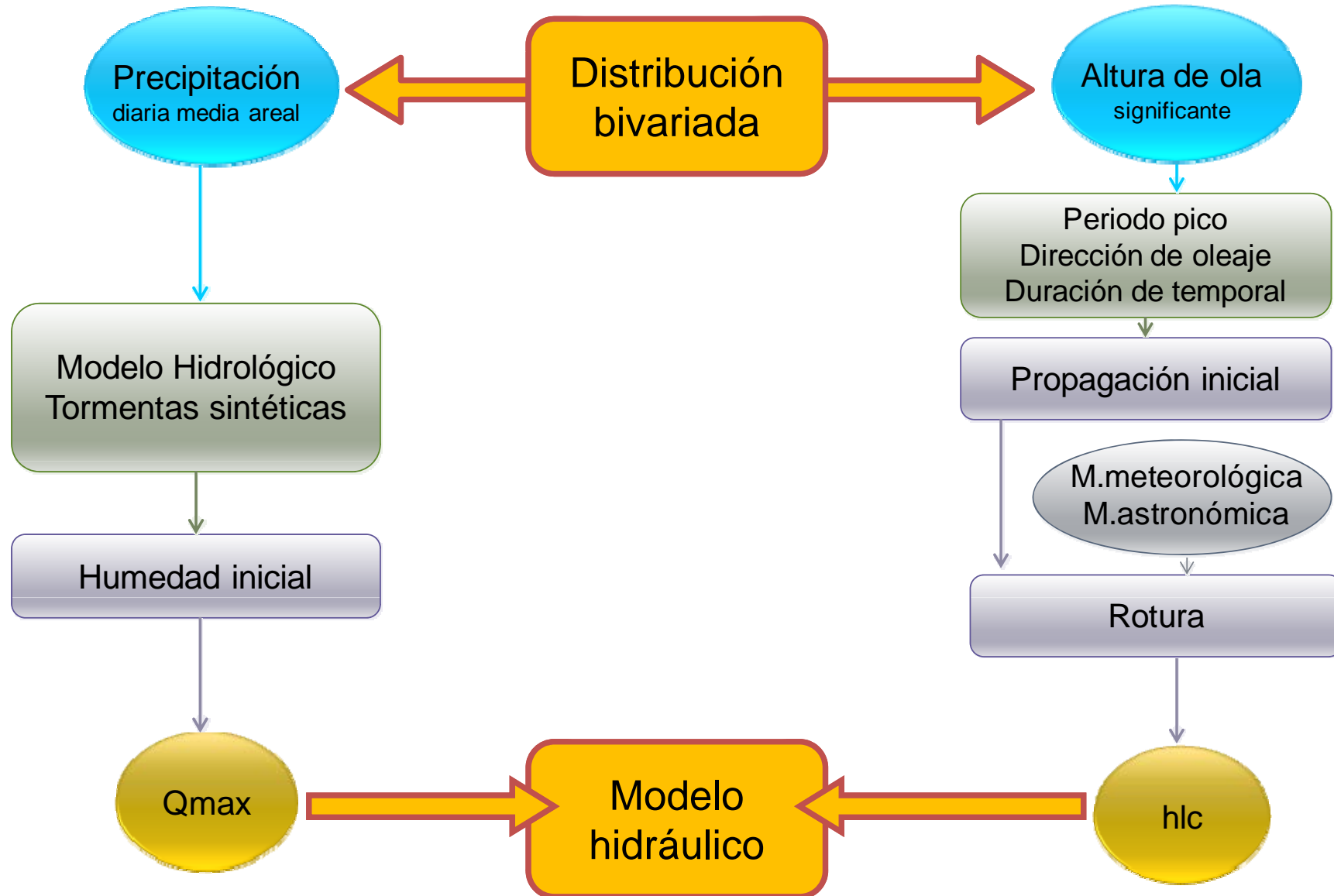
=> Correlación 0,12 y significativa



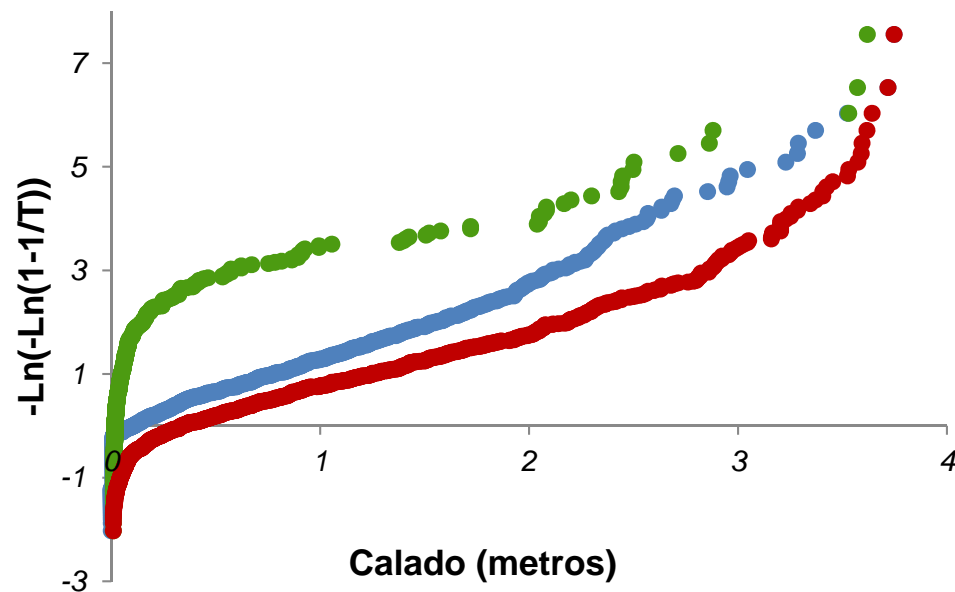
=> Correlación 0,18 y significativa



# Propuesta de modelación conjunta

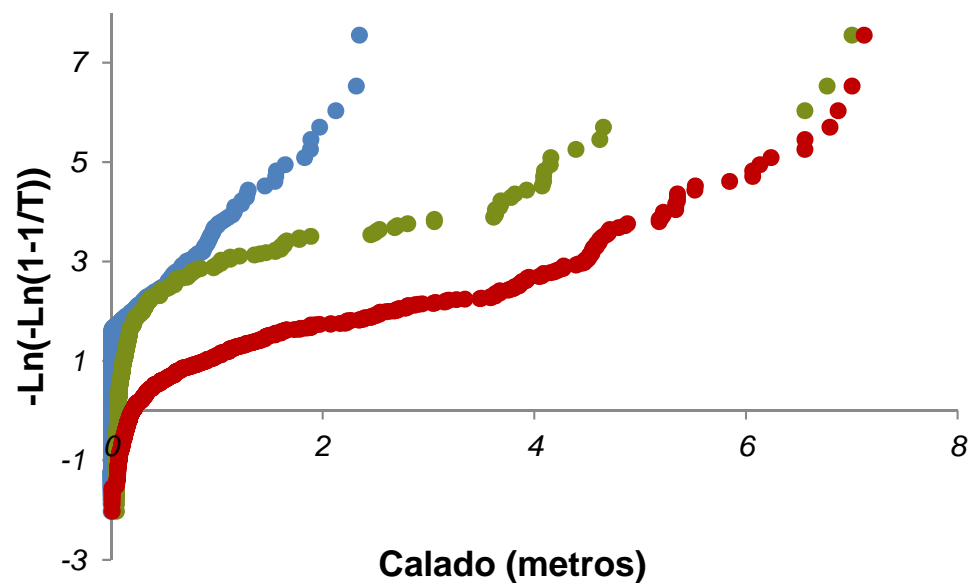


**Centro del cauce, Sección 2 – 300 m.**



- Temporal marino
- Tormenta terrestre
- Modelo conjunto

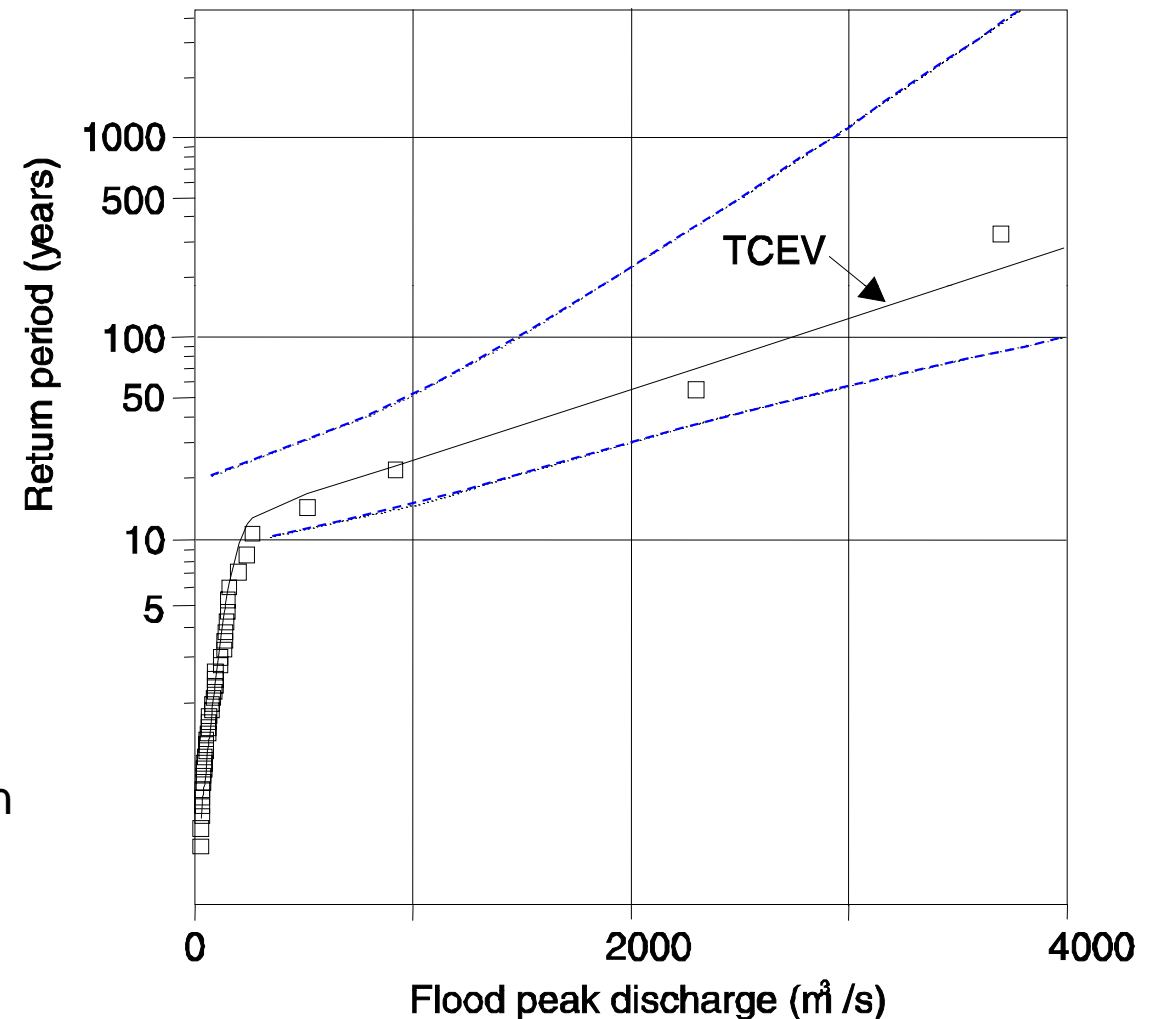
**Centro del cauce, Sección 3 - 1000 m.**



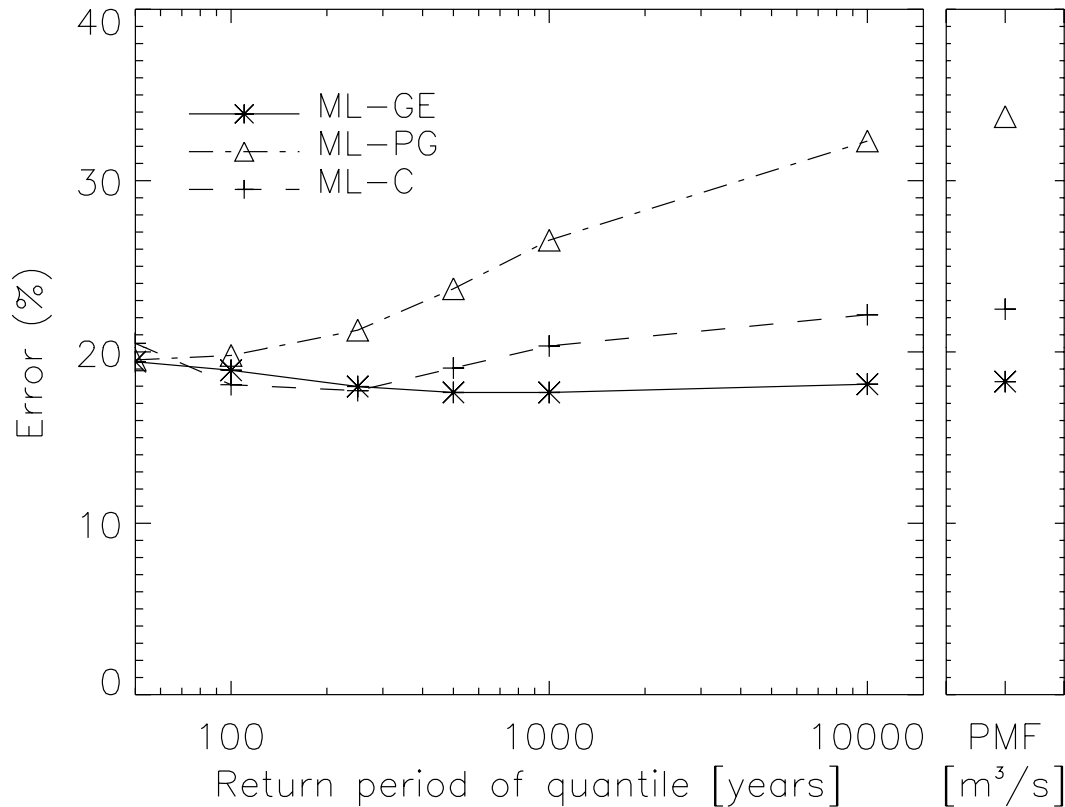


# Estimación de la incertidumbre

- Estimación matemática de la varianza del estimador (o de su varianza asintótica)



Ajuste TCEV al río Turia en  
Manises con intervalos de  
confianza del 95 %



□ O mediante simulación por Monte Carlo

EV4 quantile uncertainty in Jucar River.

Simulations with:

N = 50 years

M = 400 years

H = 50 years return period

$\gamma_x = 5.77$

Errors in G with

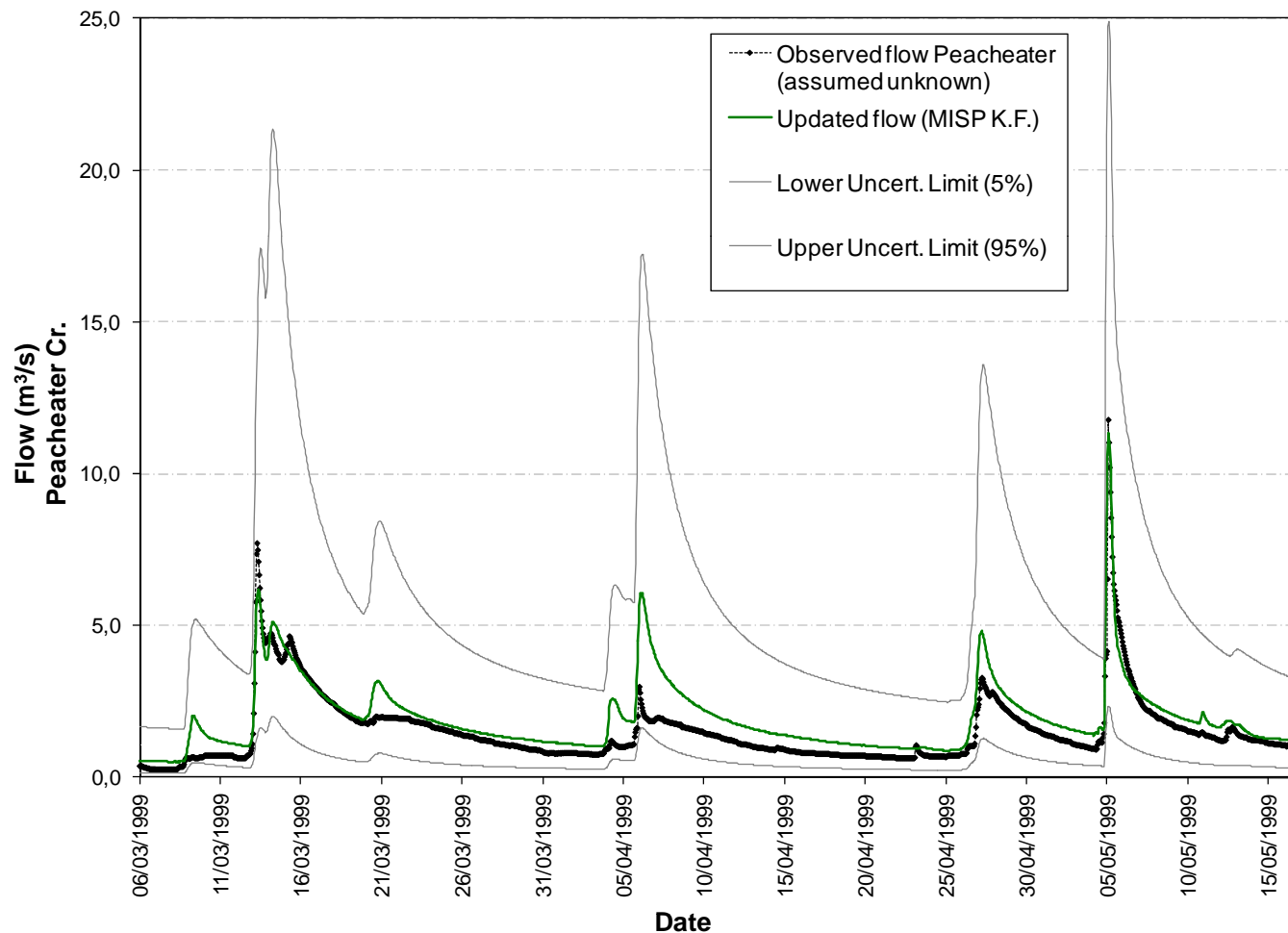
CV = 0.3

bias = +10%

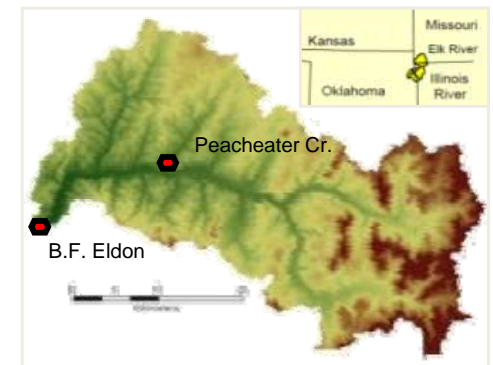
$$E(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta)^2}}{\theta} 100$$

# En simulación cuencas no aforadas

- Aplicación de un filtro de Kalman (MISP) sobre simulaciones con TETIS calibrado aguas abajo:



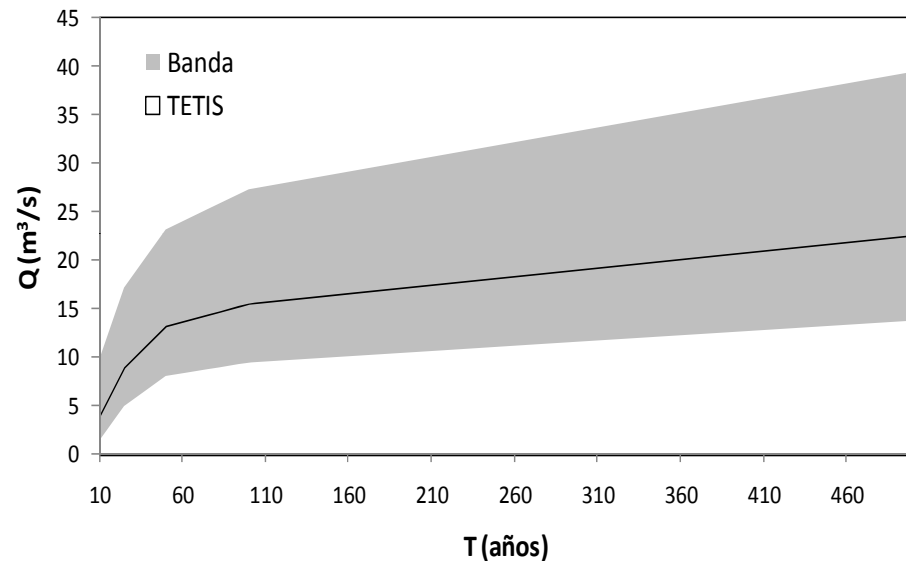
Peacheater Creek, uncertainty bounds (06/03/1999 – 17/05/1999)





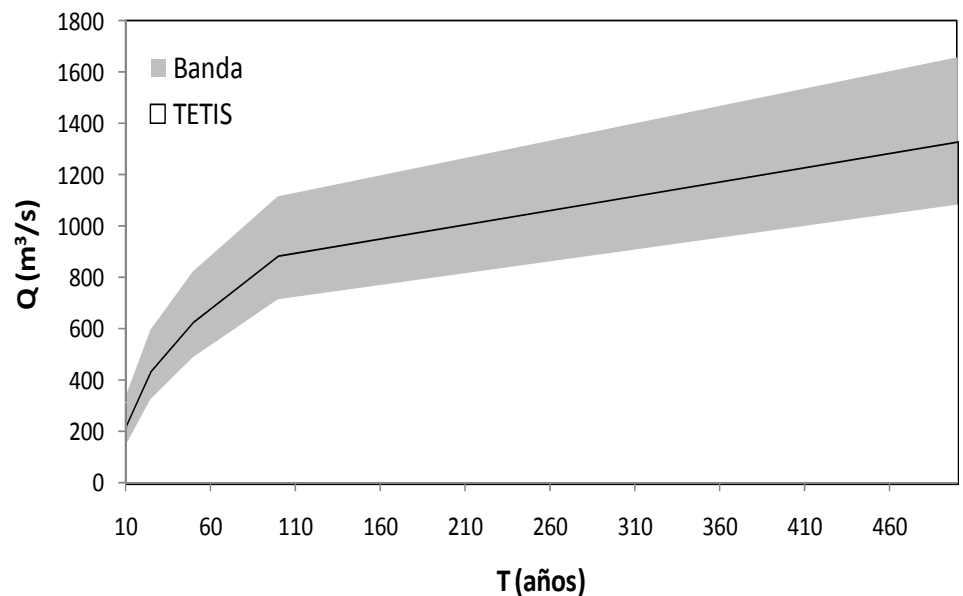
# En el Estudio de las Marinas

- Aproximación de la incertidumbre con sensibilidad al error en parámetros de producción escorrentía (de 50 a 25%):

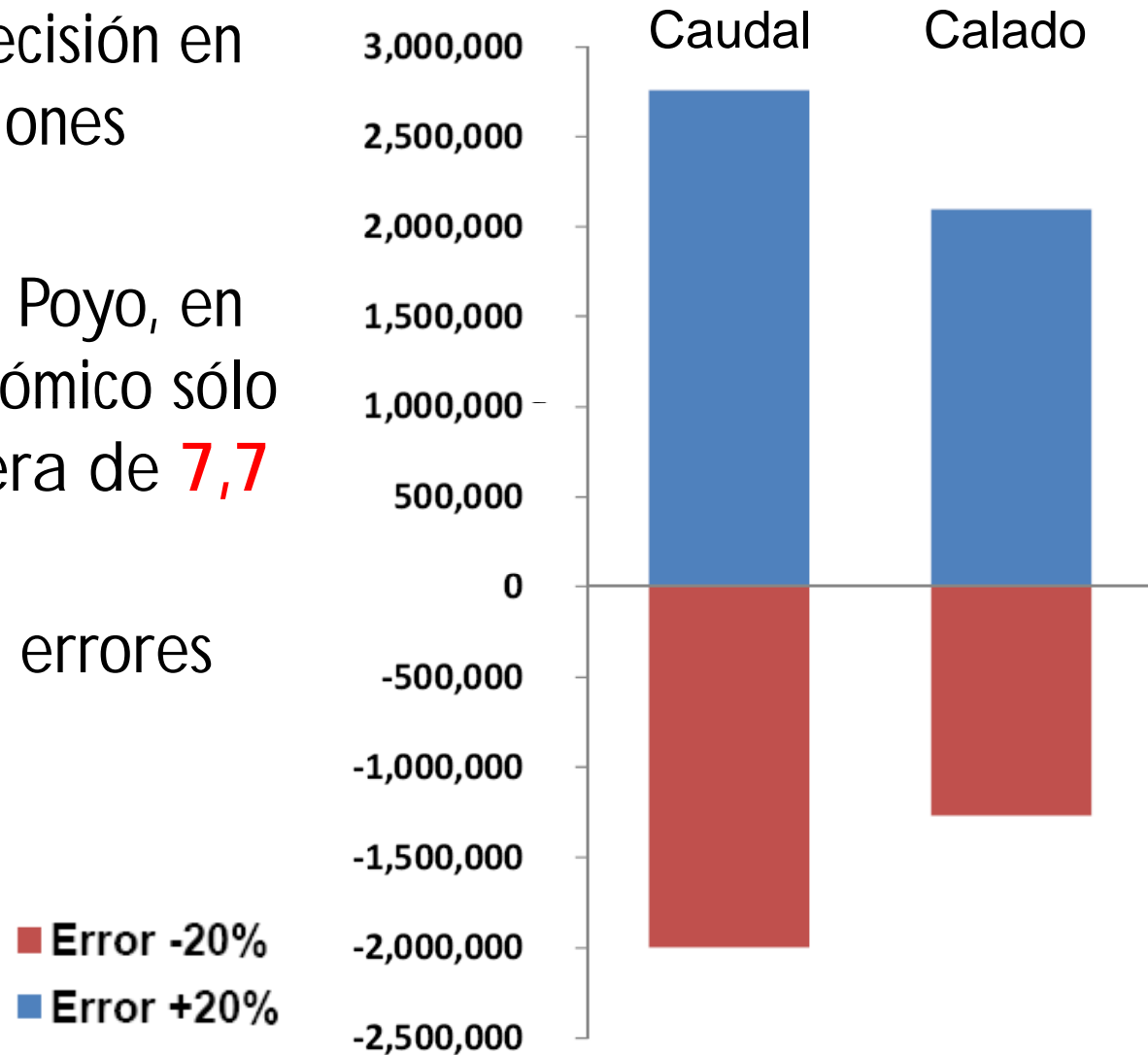


Barranco de Benihome, afluente Girona  
en Beniarbeig (**0.67 km²**)

Río Girona en desembocadura  
(**110.73 km²**)



- ❑ Exigible la máxima precisión en función de las implicaciones económicas y sociales
  - En ZI de Rambla del Poyo, en 2006 el riesgo económico sólo por daños directos era de **7,7 millones de €/año**
  - La sensibilidad a los errores es:



Ignacio Vélez, Juan C. Yuste, Sandra García, Eduardo Albentosa, Julián Vélez, Miguel Mondría, Andreu Roig, Sindo Alonso, Ronald Wenstein, Pablo Martín, Javier Benito, Gonzalo Gómez, Miguel A. Zorrilla, Marcos Pereira, Mar Gómez, Carlos Barrios, Antonio Huerta, Mario Hernández, Enrique Ortiz, Enrique Lorente, Gonzalo Gómez, Joan Palomares, Juan A. Pascual, Javier González, José M. Giménez, Victor Rozalén, Gabrielle Coccia, Francisco Vique, Miguel Serrano, Vicente Bellver, Antonio Nicolás, Àlvar Escrivà, Ignacio Marcos, Andrea Lamberti, Alejandra López, Rosa Orient, Juan J. Montoya, Virginia Dávila, Diana Quevedo, Delva Guichard, Marino Puricelli, **Juan C. Múnera**, **Blanca Botero**, Belén Sánchez, **Estefanía Fernández**, Guiomar Ruiz, Lina Ramirez, Marta Pasquato, Ilona Vaskova, Chiara Medici, Marco Morales, **Sergio Salazar**, Miguel Barrios, Ismael Orozco, **Gianbattista Bussi**, Joaquín Real, **Jesús López**, Alicia García, Lía Ramos

Juan B. Marco, Vicente Fullana, Joaquín Andreu, José Salas, José R. Témez, Joan Mateu, Duane Boes, Morel Seytoux, Ignacio Rodríguez-Iturbe, Michele Lang, Juan Valdés, Mariano Barriandos, Maria C. Llasat, Rafael García Bartual, Juan F. Fernández, Manuel Menéndez, Teodoro Estrela, Vicente Serrano, Javier Ferrer, Enrique Cifres, Julián Allepuz, José Antón, Diego Irlas, Francisco Franch, Antonio Jiménez, Federico Estrada, Francisco Cabezas, Ramiro Martínez, Vicente Guna, José M. García Ruiz, Francisco Martínez Capel, Ramón Domínguez, Andrew Wade, Fermín López, Pierre Julien, Vicente Llorens, Fernando Ricart, Luis Juaristi, Carles Sanchis, José M. Ruiz, Francisca Segura, Pilar Carmona, Ana Camarasa, Ángel Cayuela, Juan Carlos Gírbés, Juan Calatayud, Ángel Latorre, José L. Miralles, Thomas Glade, Gerardo Benito, Teresa Ferreira, Ángel Eraso, Miguel Francés, Francesc Gallart, Luis Garrote, Gregory Egger, Francesc Sabater, Ezio Todini, Soorosh Sooroshian, Günter Blöschl, Axel Bronstert, José Aguilar, Mike Smith, Daniel Sempere, Mauro Nagethini, James Smith

Plan Nacional de I+D+I, Programa de Projectes d'Investigació i Desenvolupament Tecnològic "Generalitat Valenciana", CICYT, Framework Programs of the European Commission, INTERREG III C, Programa Intercampus de la AECl, Era-net CRUE Funding Initiative, Universitat Politècnica de València, Era-net IWRM Funding Initiative, Parques Nacionales, Plan CONSOLIDER, Confederación Hidrográfica del Júcar, GRHSA, EPTISA, Confederación Hidrográfica del Segura, Ayuntamiento de Valencia, Empresa Nacional ADARO, Consellería d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports, ICTSA, Ayto. de Cullera, IBERDROLA, INARTEC, Ayuntamiento de Benicassim, Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Asocivil, Ayuntamiento de Humanes, HIDROWAT, INICIAS, URBINSA, FIRME CIVIL, Institut Turístic Valencià, STUDI7, Onden S.A., SACYR, Confederación Hidrográfica del Ebro, NECSO, CALDIGA, AIRTEL, CEMAGREF, Dirección General de Interior de la Consellería de Presidencia, INIPSA, IVALEYING, Dragados y Construcciones, Confederación Hidrográfica del Tajo, MS Ingenieros, Ingeniería CM, Dir. General de Carreteras del Ministerio de Fomento, Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, Ayuntamiento de Alzira, Agriconsas, FranJuan SL, Ayuntamiento de Benimuslem, Intecsa-Inarsa, Dpto. De Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, Typsa, Gobierno Regional de Murcia, Consellería de Agricultura de la Generalitat Valenciana, OCIDE, AMINSA, IDOM, Confederación Hidrográfica del Norte, INOCSA, Dirección General de Aguas del Ministerio de Medio Ambiente, Paymacotas, Ayuntamiento de Utiel, GETEC 2000, Asdara, Ingeniería y Promoción Bellver, Inypsa, I.V. Ingenieros Consultores, Vielca Ingenieros, Ayto. de Villanueva de Castellón, Ingiopsa, Hidrogaia, Consellería de Territori i Habitatge, SENER, Agencia Vasca del Agua



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Prof. Félix Francés (ffrances@hma.upv.es)

*Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y  
Ambiental (GIMHA)*

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



Cañete (Cuenca), 2011



Tabasco (México), 2008



Pakistán, 2010