



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente

# *Evaluación avanzada de la peligrosidad y del riesgo de inundación*

**F. Francés, G. Bussi. R. García Bartual, J.L. Salinas y E. Hernández**

*Universitat Politècnica de València*

**L. Pujol, V. Guna y E. Ortiz** *Hidrogaia S.L.*

**V. Bellver** *ipb S.L.*

**Encuentro Regional del Agua. Universidad de Medellín. Septiembre 2013**



# La tormenta de diseño

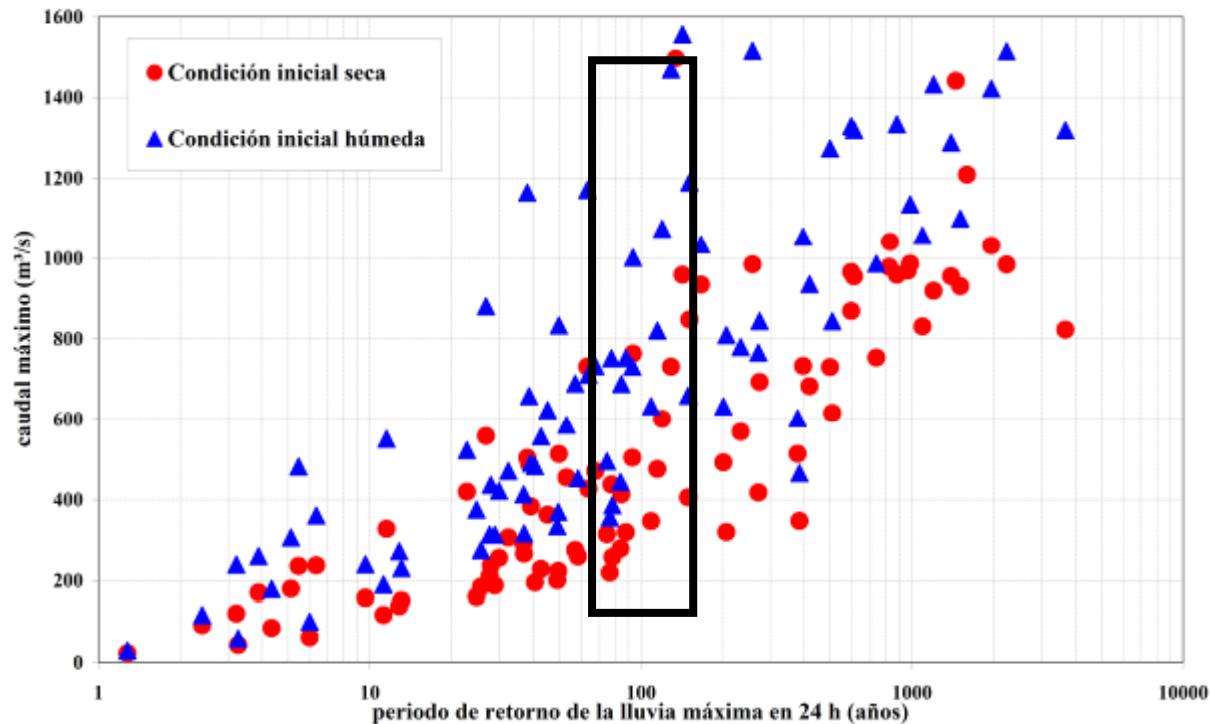
- Tradicionalmente la estimación de la peligrosidad se basa en el **paradigma de la “Tormenta de Diseño”**:  
**Análisis estadístico de  $P_d \Rightarrow$  Tormenta de diseño de  $T \Rightarrow$  Simulación hidrológica**
- Ventaja “pírrica”: Una sola simulación
- Inconvenientes específicos:
  - Distribución temporal y espacial de la precipitación
  - Estado inicial único
  - **¿ $Q_T$  lo genera  $P_d_T$ ?**



# La tormenta de diseño

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

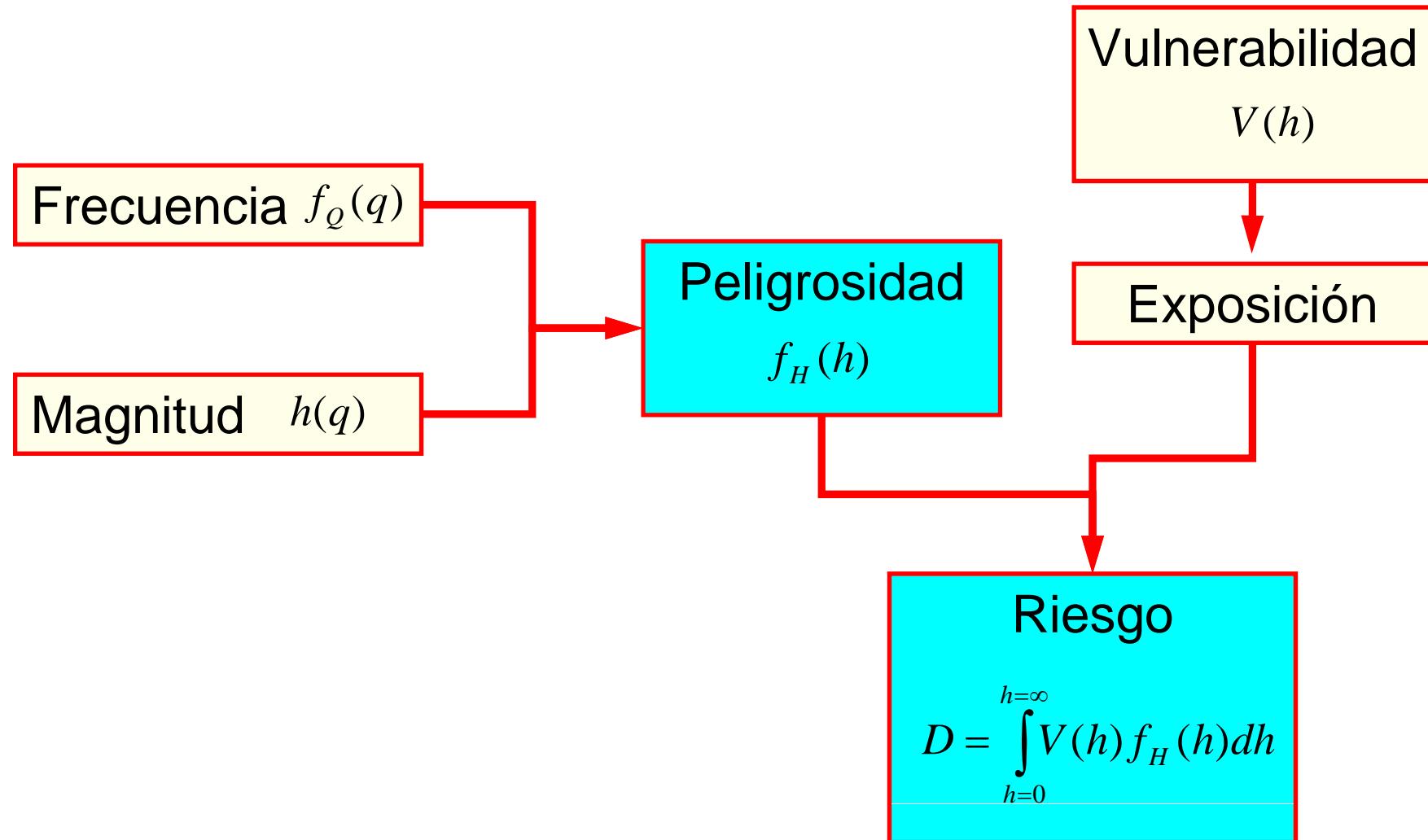
**NO!**



Distribución empírica de Qmax en R.Poyo en A7 situación actual con la probabilidad de la tormenta sintética



# Peligrosidad y riesgo



# Caso de estudio

- Comarcas de la **Marina Alta** y de la **Marina Baja** (Alicante, España)
  - Más de 200 puntos analizados en 500 km<sup>2</sup>
- Plan de Gestión del Riesgo de Inundación según la Directiva Marco 2007/60 de la C.E.)



1. Modelación hidrológica:
  - a) Estimación **frecuencia** de las **Pd** máximas anuales
  - b) Construcción de un modelo estocástico de **tormentas** y generación **sintética** de un número elevado de eventos
  - c) Implementación de un modelo **hidrológico** distribuido
  - d) Asignación de **probabilidad** final mediante un modelo estadístico multivariado
2. Modelación hidráulica: estimación de **calados** y velocidades
3. Estimación de la **vulnerabilidad**
4. Cálculo del **riesgo**

# Modelización hidrológica

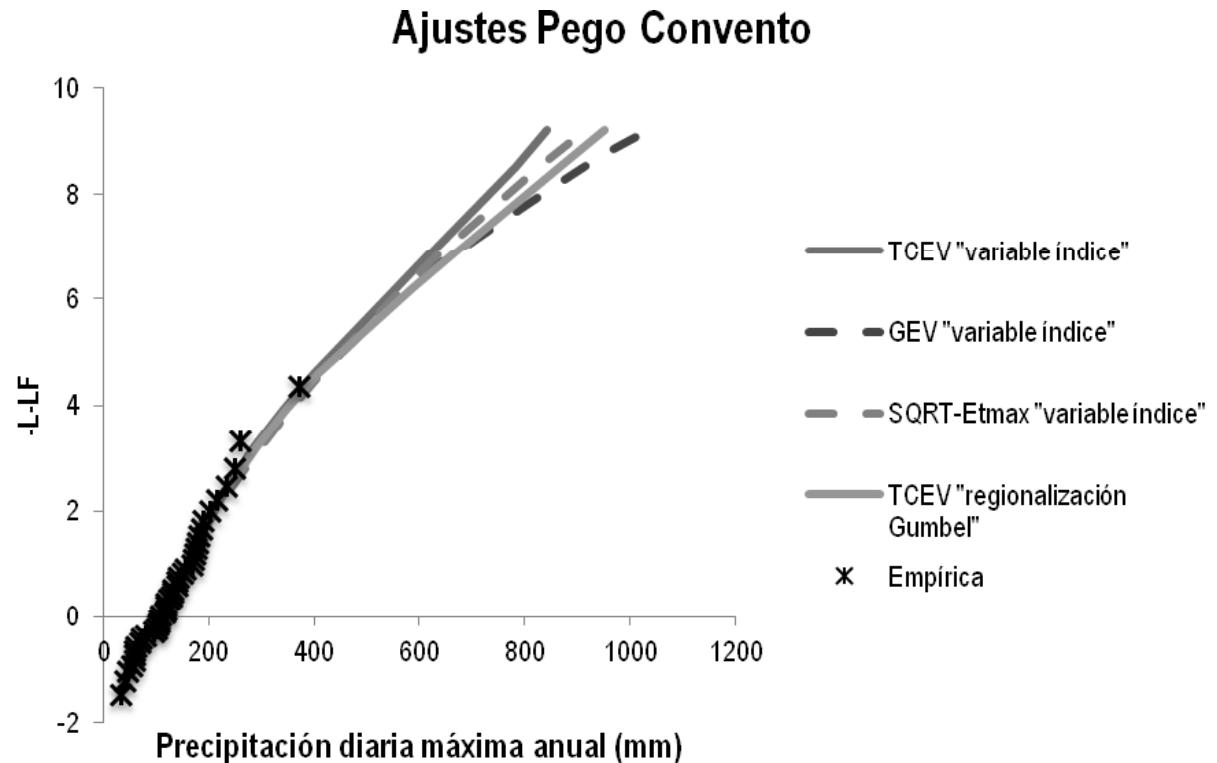
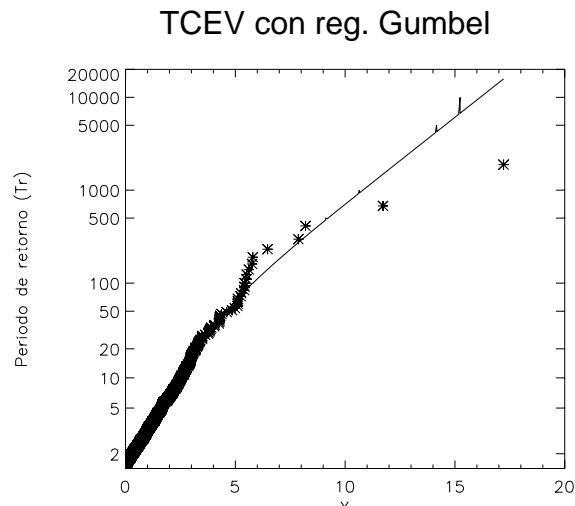
# Análisis pluviométrico

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



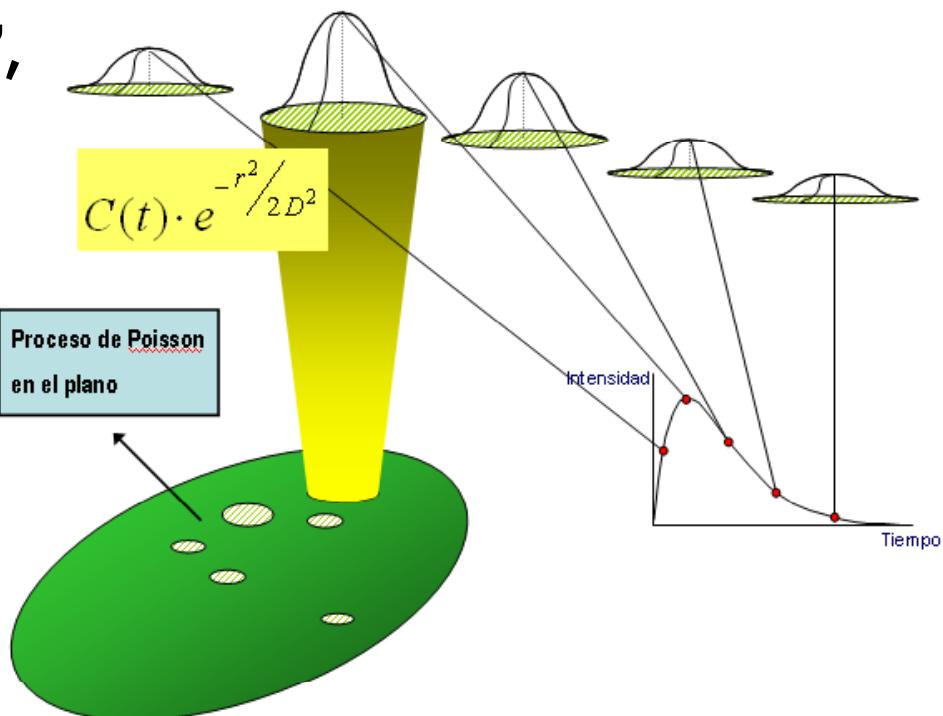
# Análisis pluviométrico

## Resultados:



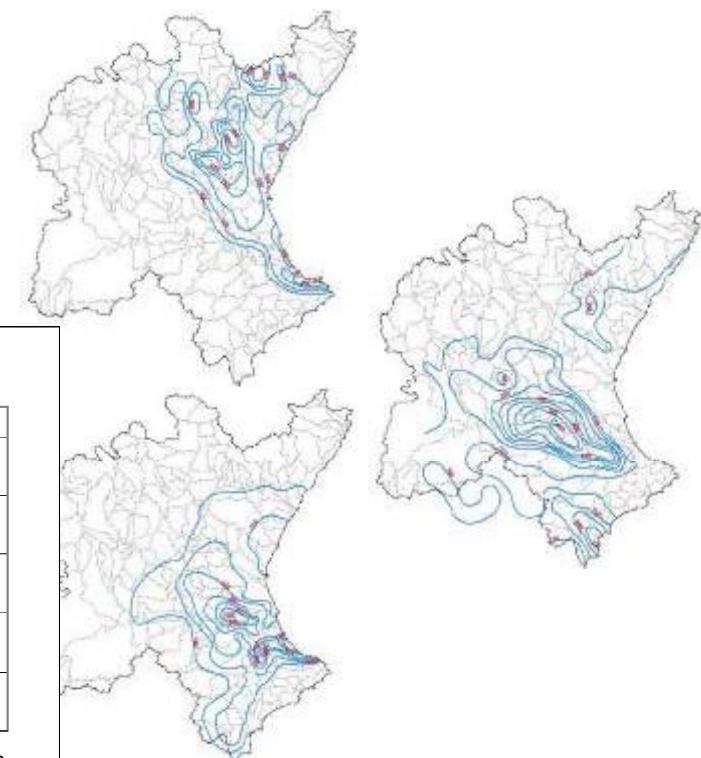
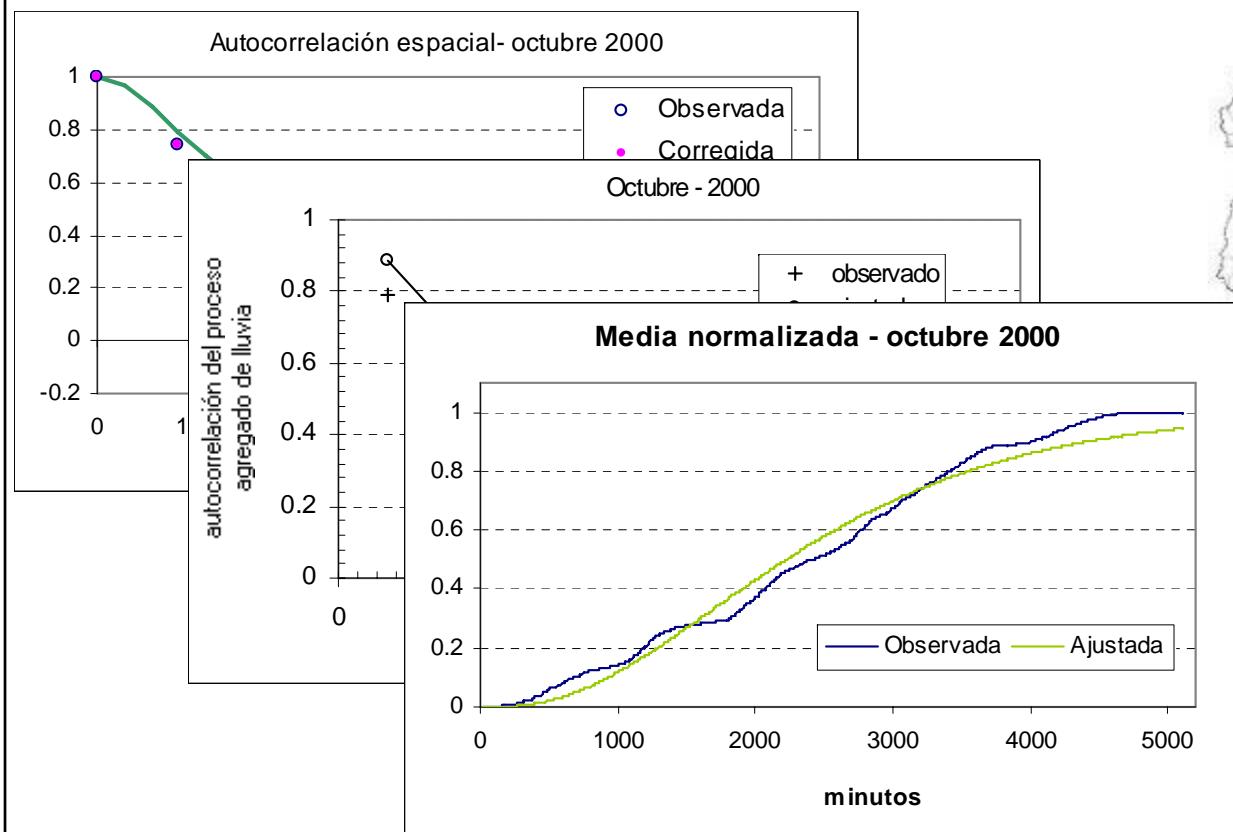
# Generación de tormentas sintéticas

- 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 y Eagleson (1987) mejorado por Salsón y García Bartual (2003)



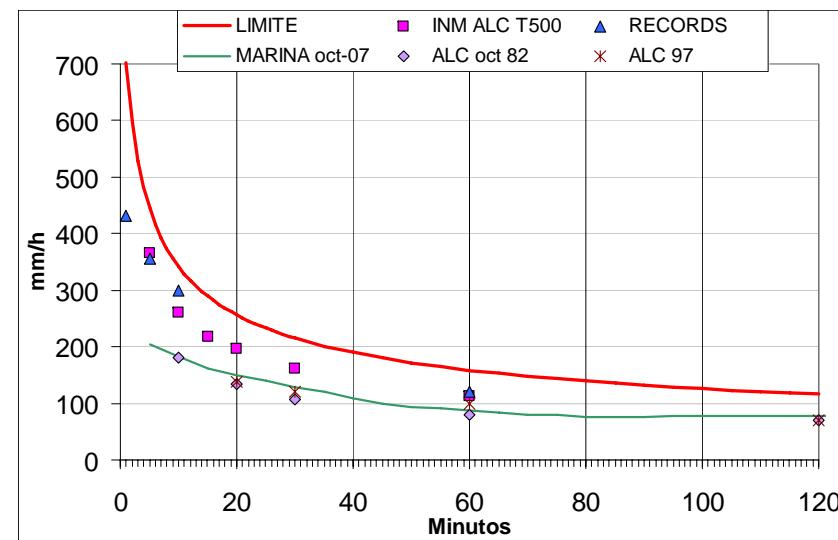
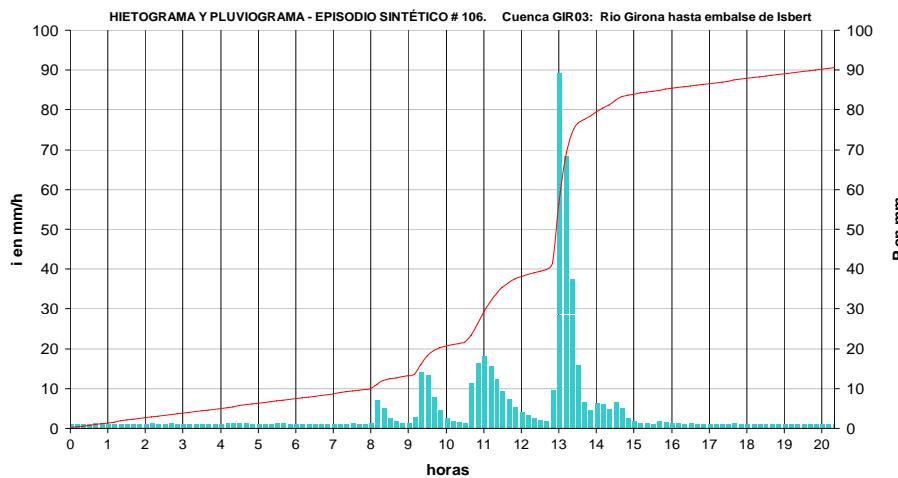
# Generación de tormentas sintéticas

## □ Estimación de parámetros a partir de tormentas SAIH:



# Generación de tormentas sintéticas

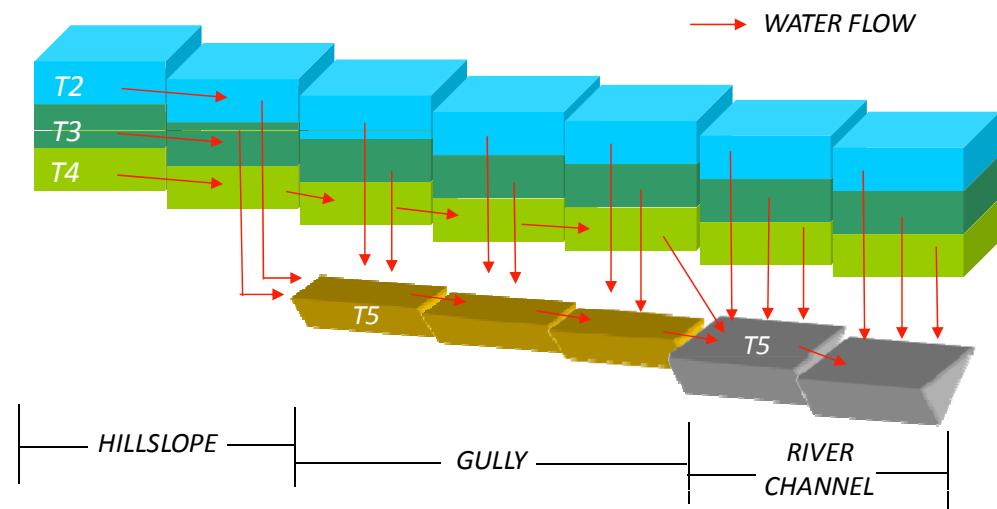
- Se generaron unas 500 tormentas sintéticas en una cuadrícula de 60x65 km con discretización de 1km y 10 min



- ... y se seleccionaron 368

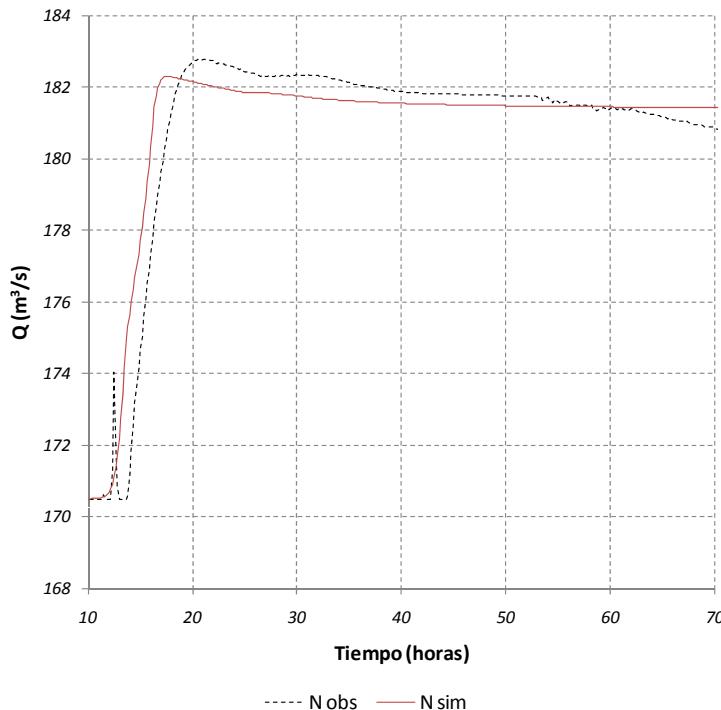
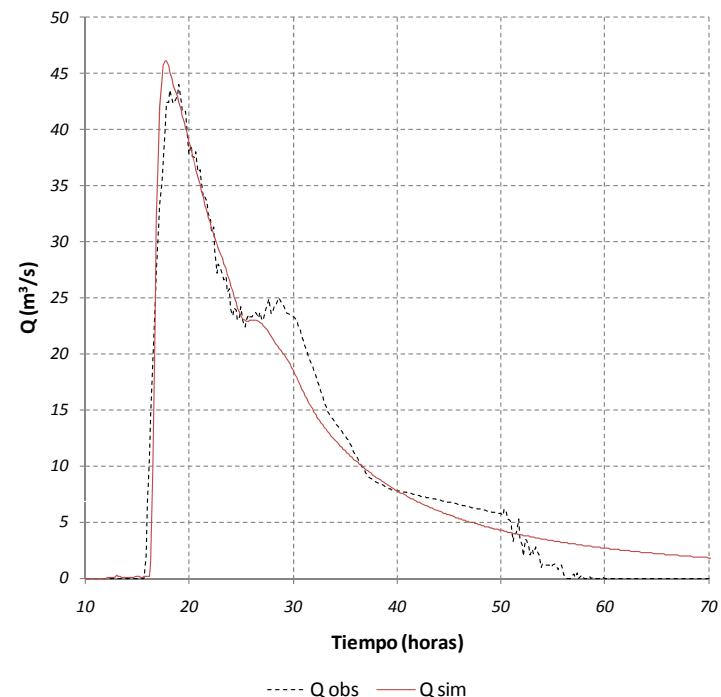
# El modelo TETIS

- Desarrollado en la UPV desde 1994 (versión 8.2.7 en la red)
- **Distribuido** en el espacio, conceptual con **parámetros sentido físico**
  - Reproducción variabilidad espacial del Ciclo Hidrológico
  - Reducción del efecto de escala espacial
  - Resultados en **cualquier punto**
- **Modelo global**: recursos, crecidas y sedimentos ... calidad, vegetación dinámica, ...
- Estructura separada de parámetros efectivos
  - Algoritmo de **calibración automática** potente
  - Explotación de **toda la información** existente



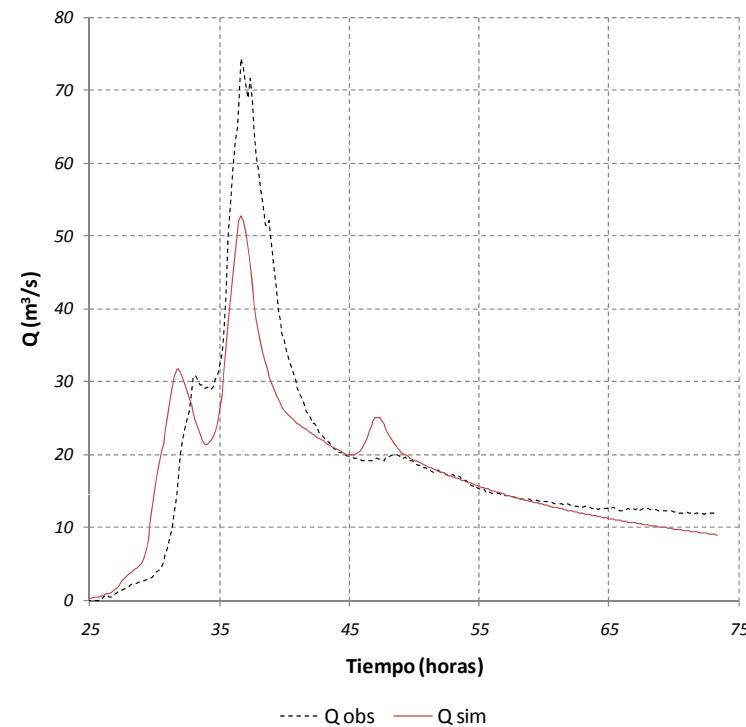
# Modelación hidrológica con TETIS

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

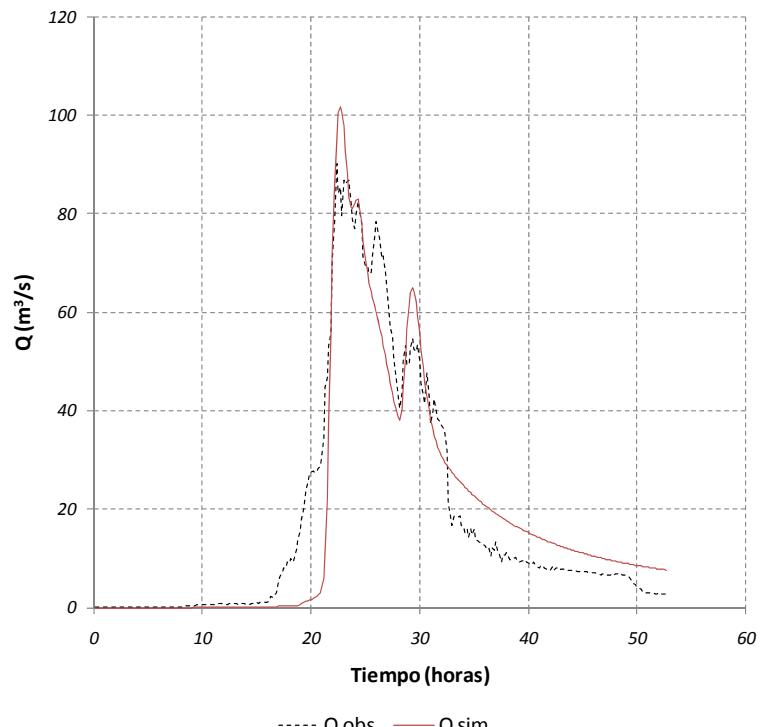


# Modelación hidrológica con TETIS

## □ Validación espacio-temporal



Estación de aforo de Marina Baixa, evento de Mayo 2002

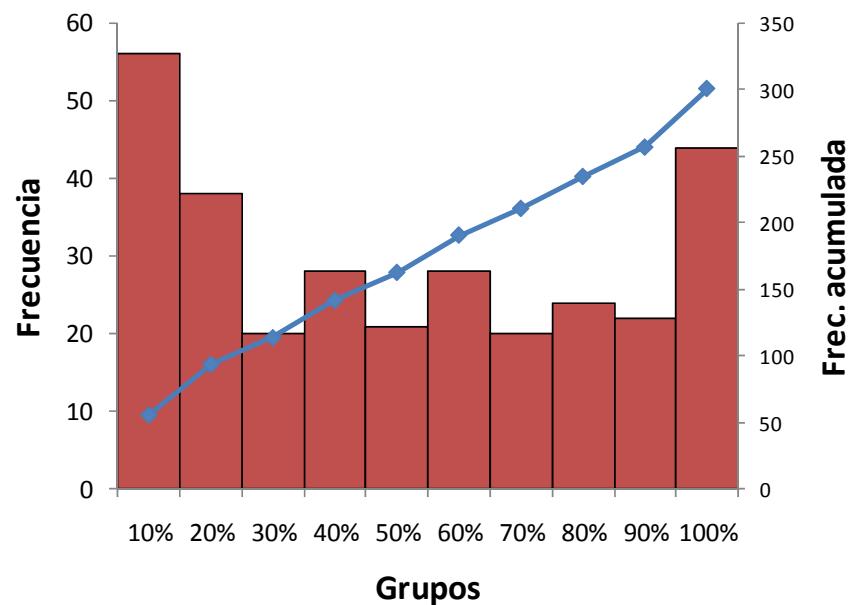


Estación de aforo de Guadalest, evento de Octubre 2007



# Análisis estado de humedad inicial

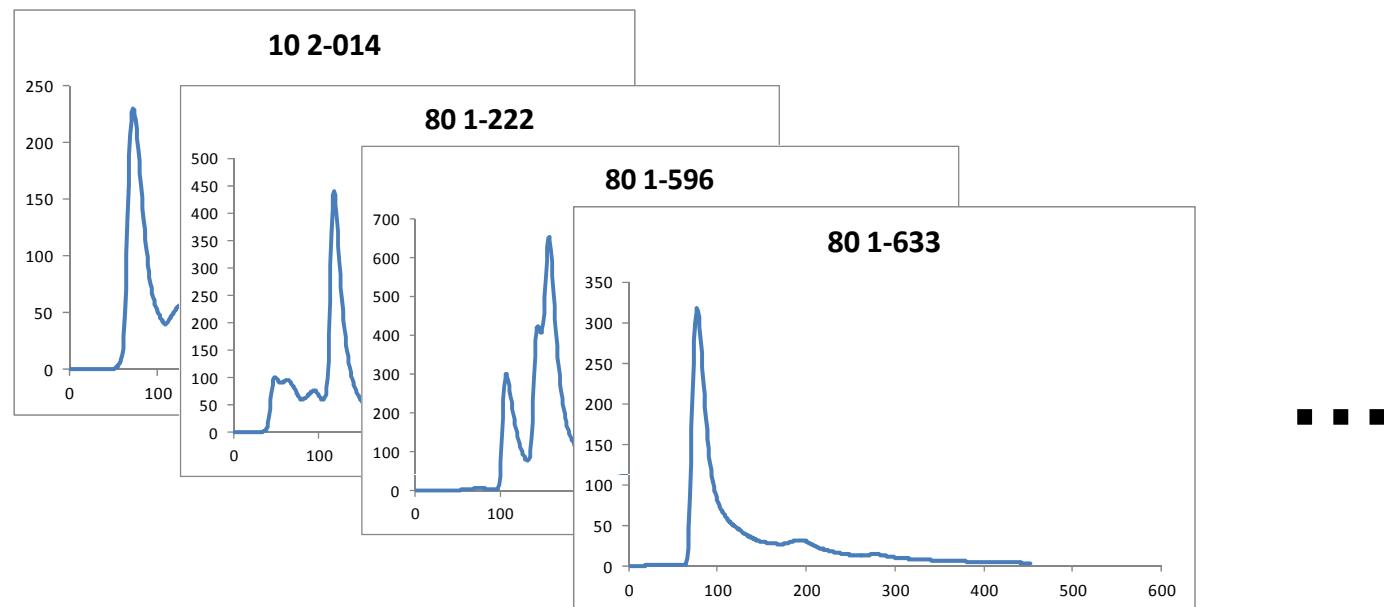
- Ajuste modelo diario en Rambla Gallinera
- Simulación continua 1943-2010
- Análisis frecuencia estados para  $P_d > 30\text{mm}$
- 3 estados de humedad:
  - Seco (10%)  $P = 0,3$
  - Medio (40%)  $P = 0,4$
  - Húmedo (80%)  $P = 0,3$



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

# Simulación de hidrogramas sintéticos

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

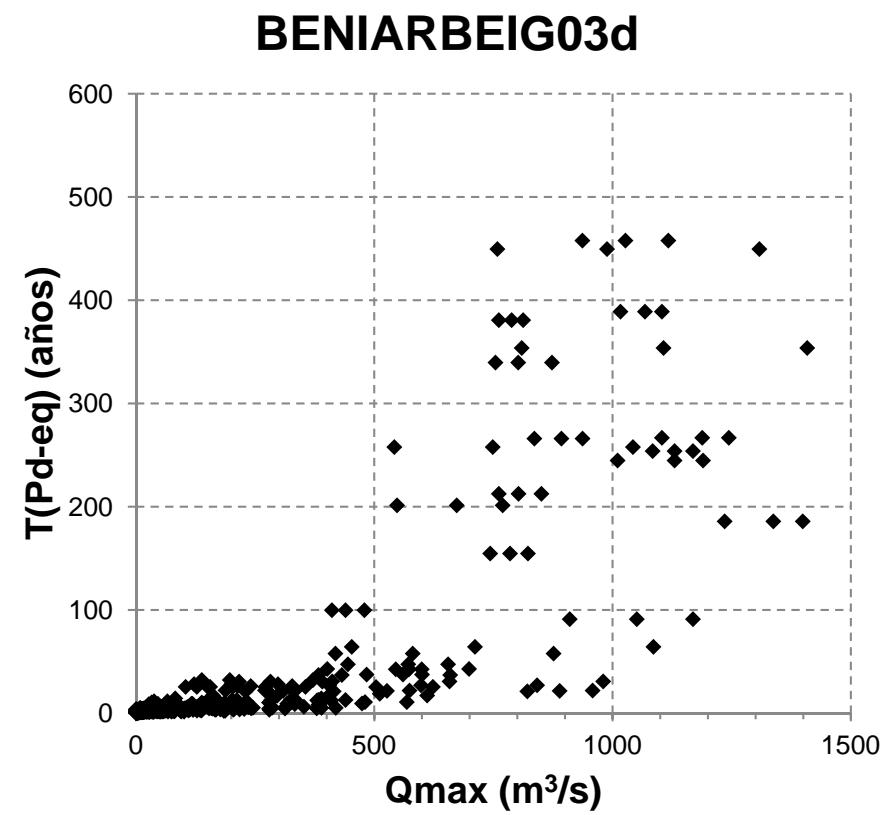
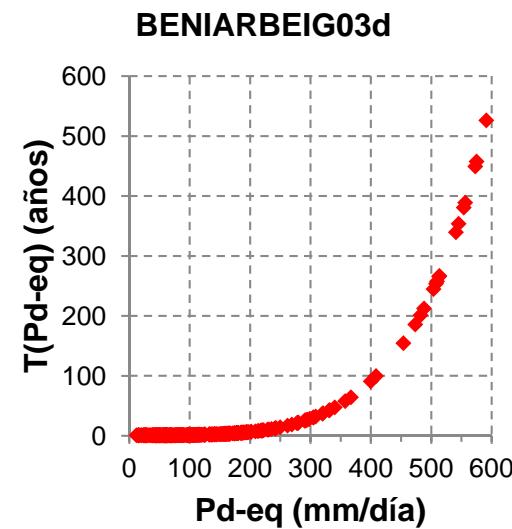


Hidrogramas generados en la desembocadura del Girona (Benairbeig03d)



# Caudales pico en función de T(Pd-eq)

## □ Resultados en la desembocadura río Girona



# Análisis de frecuencia de los Qmáx

- **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)
- **Se puede obtener la distribución empírica de  $X$ :**
  - Se conocen las marginales de  $R$  y  $M$
  - Si  $M$  es independiente de  $R$

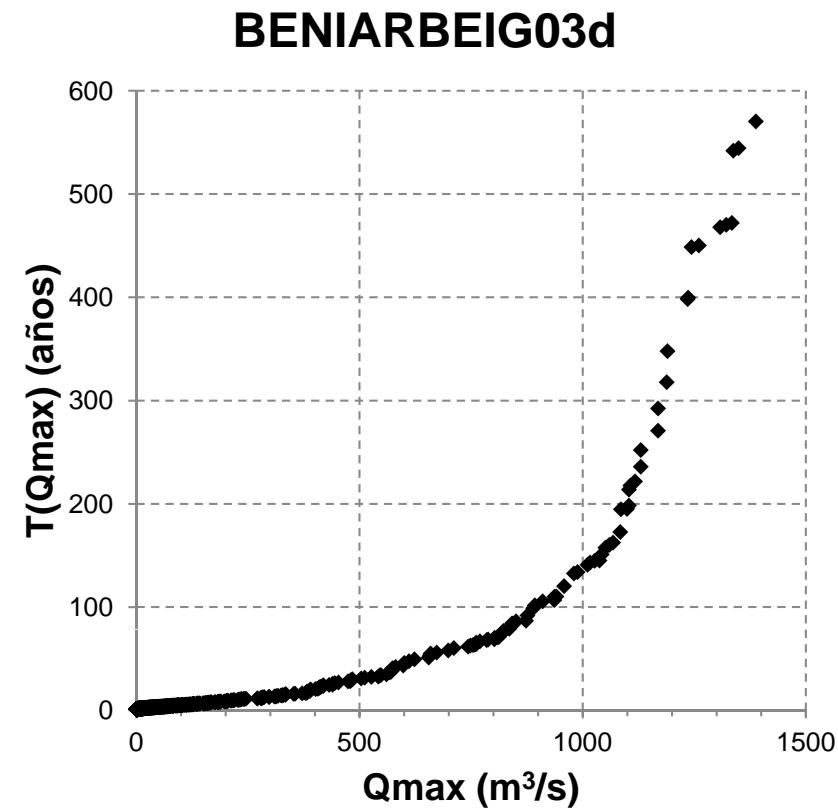
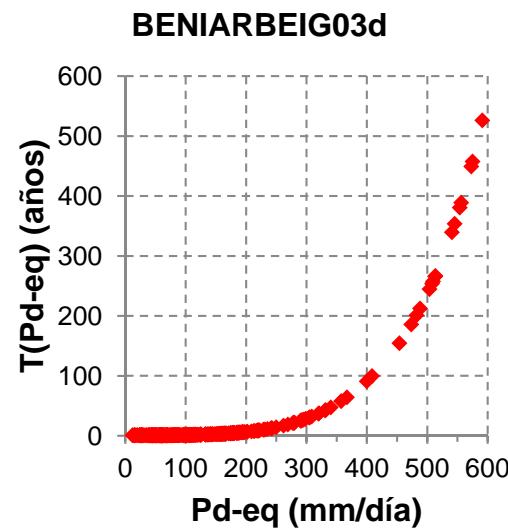
$$F_X(a) \approx \sum_{j=1}^3 \left\{ P_j \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n_{ij}(a)}{N_{ij}} [F(R_{i+1}) - F(R_i)] \right\}$$



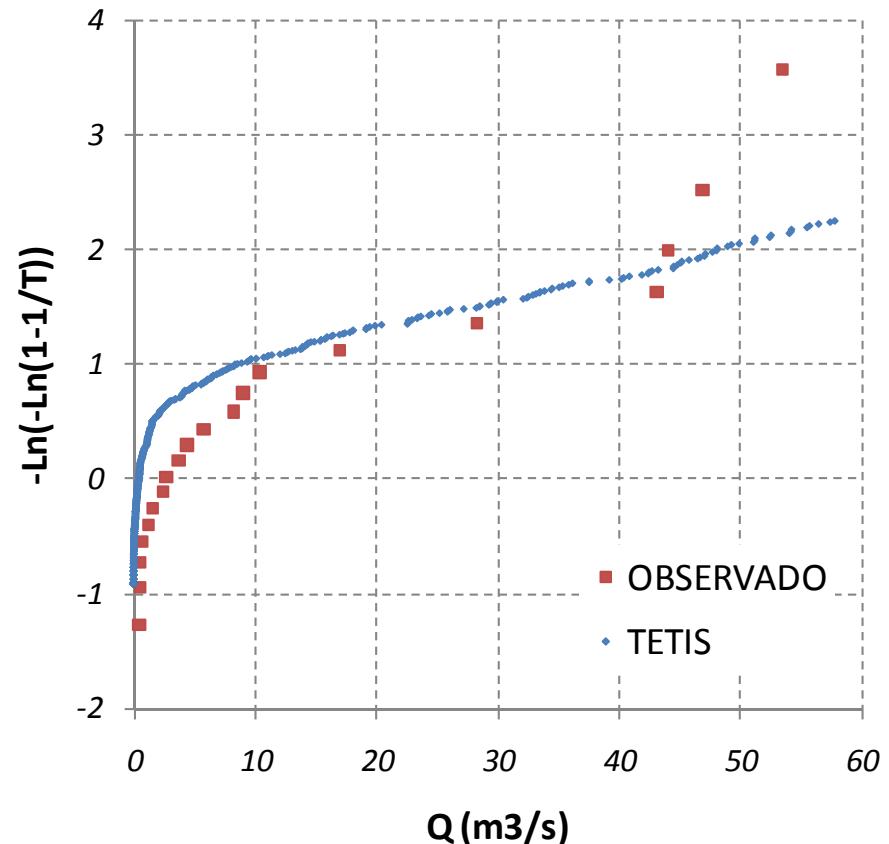


# Análisis de frecuencia

- Asignación de probabilidad desembocadura río Girona



# Validación estadística



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



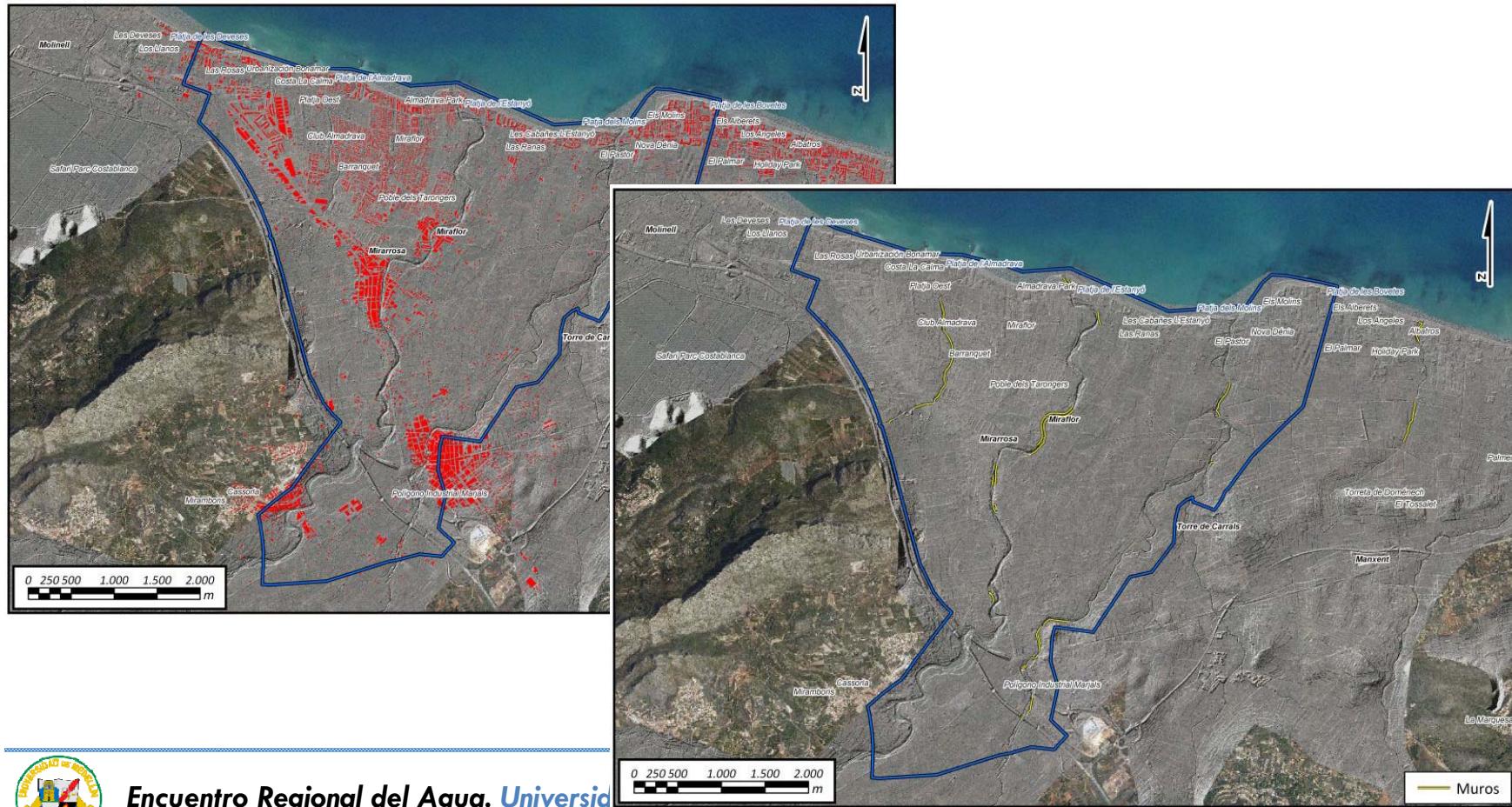
# Modelización hidráulica



- **Objetivo:** calados máximos de inundación asociados a  $T = 10, 25, 50, 100$  y  $500$  años
  - Input: hidrogramas de crecida de todos los períodos de retorno (modelación hidrológica), pero número limitado (6)
- Software: Infoworks RS 2D
  - Nueva generación de algoritmos en volúmenes finitos
  - Malla triangular irregular
- Teniendo en cuenta la geomorfología

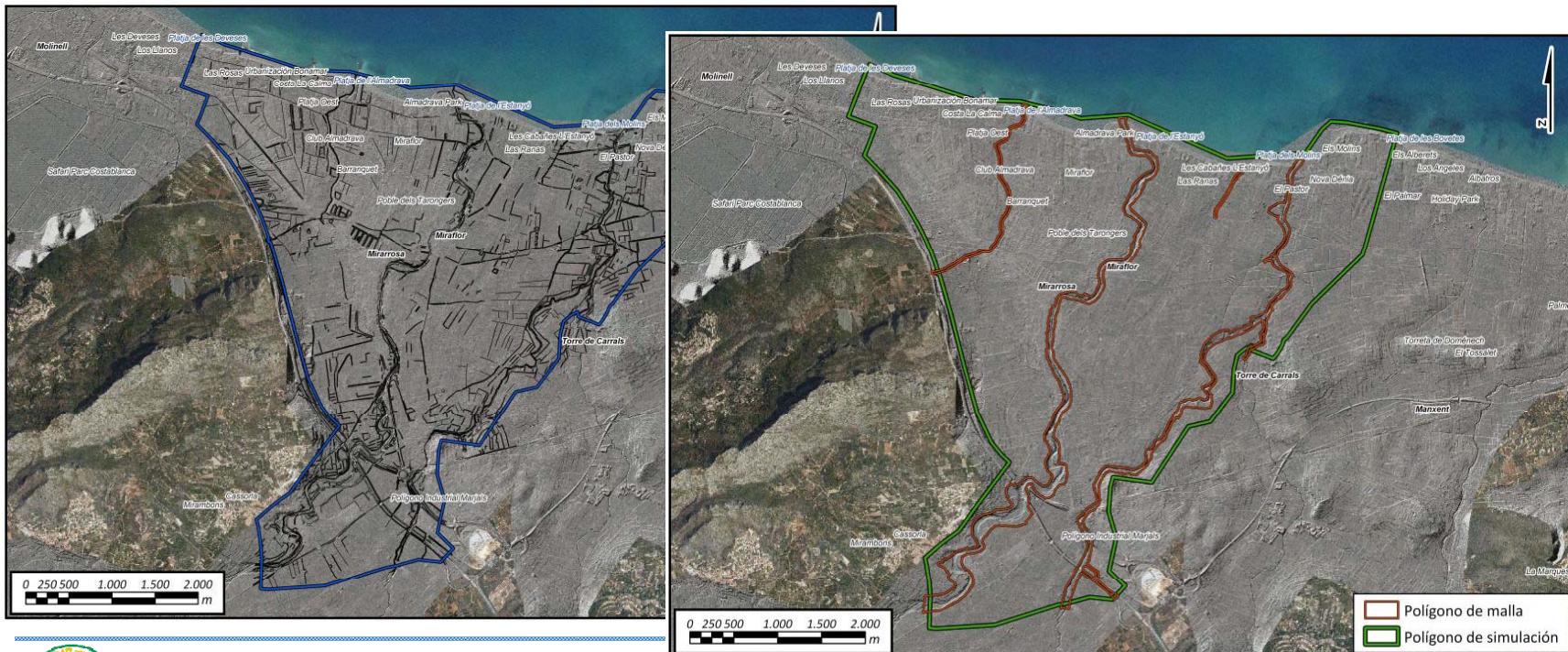


- MED de partida: Lídar 1x1 m
  - Corrección edificaciones y muros



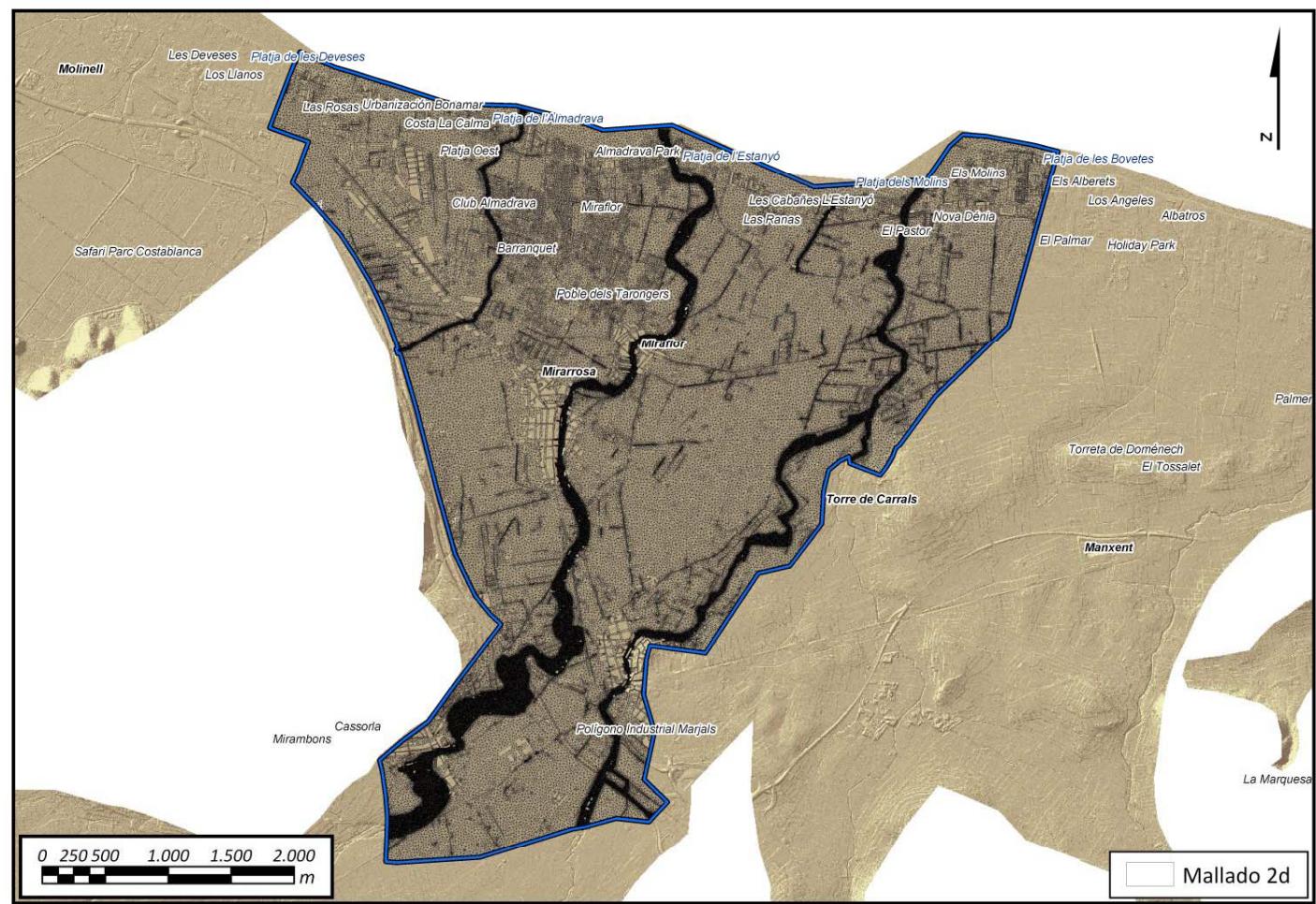


- MED de partida: Lídar 1x1 m
  - Corrección edificaciones y muros
  - Inclusión líneas de rotura
  - Mallado específico en cauces principales





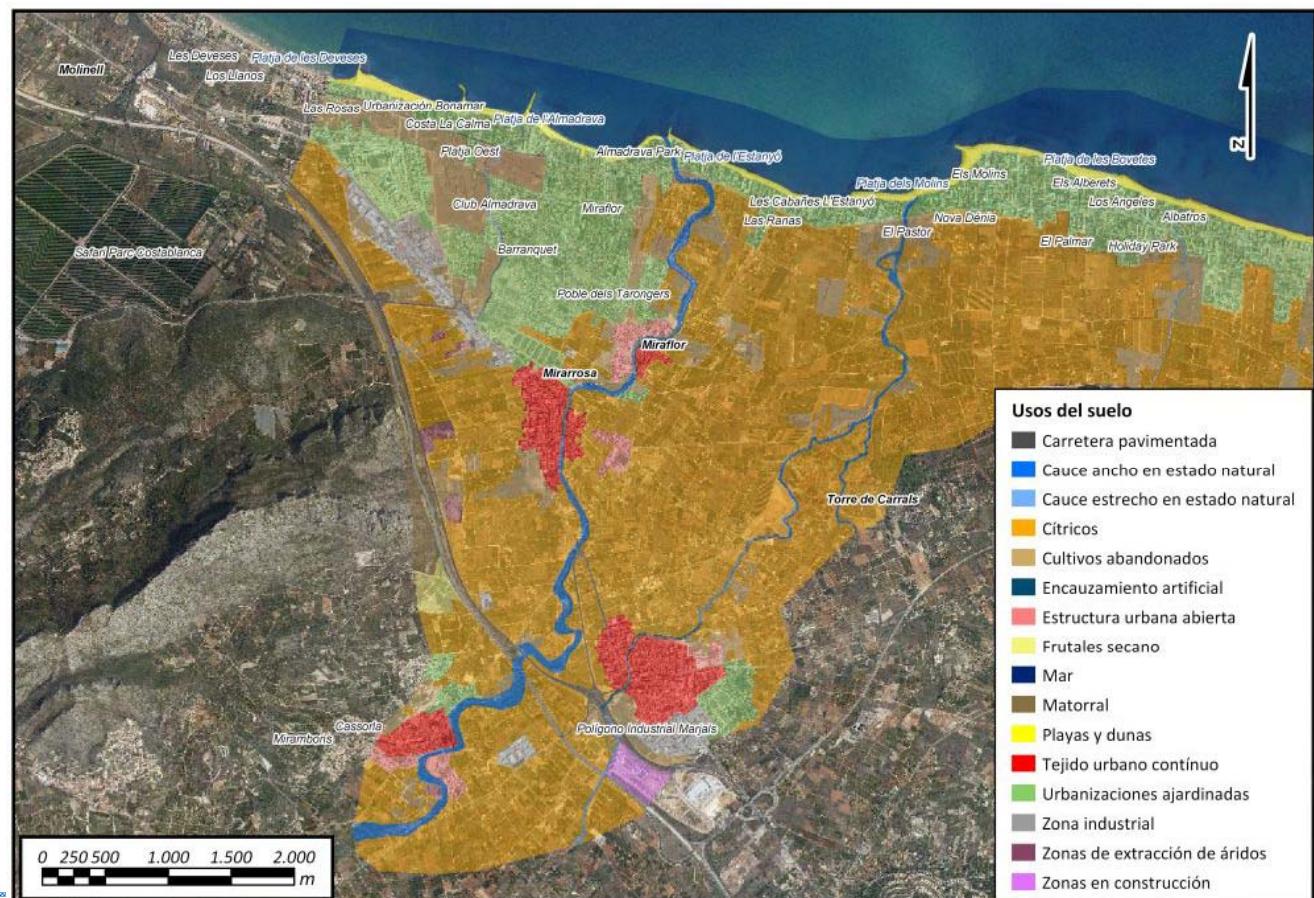
## □ MED final:





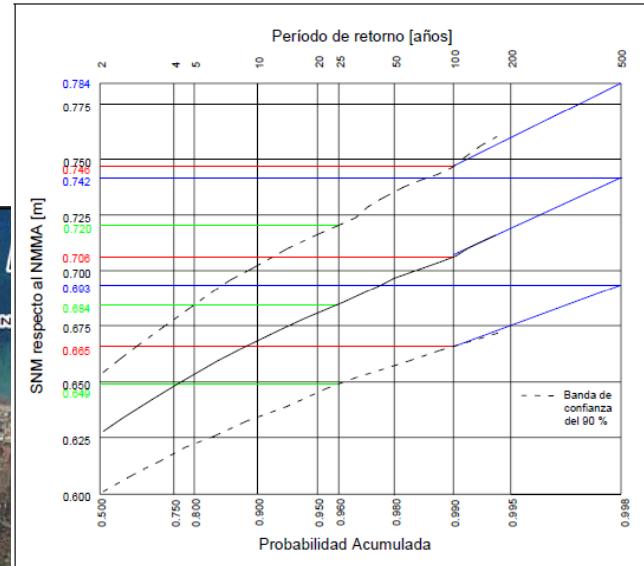
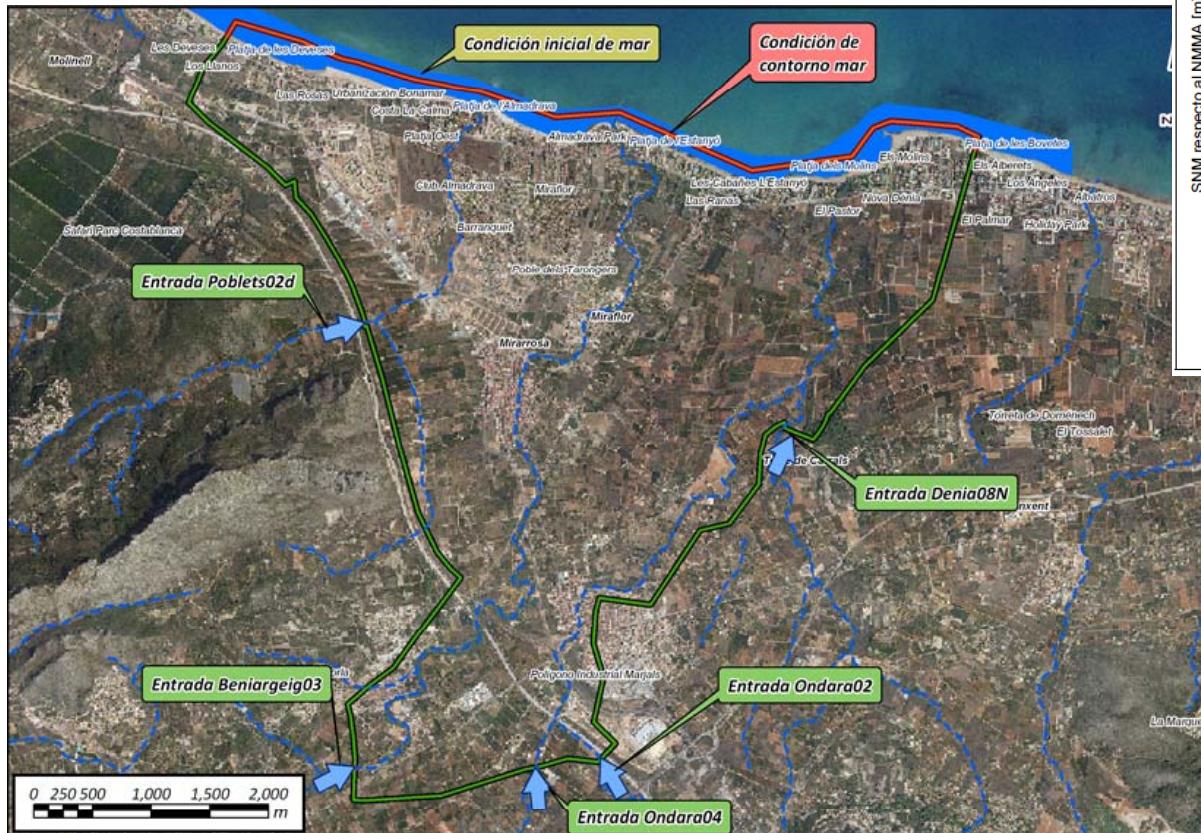
# Mapa de rugosidades

- Rugosidad: CORINE (mapa europeo cubierta del suelo a escala 1:100,000) + Ortofoto



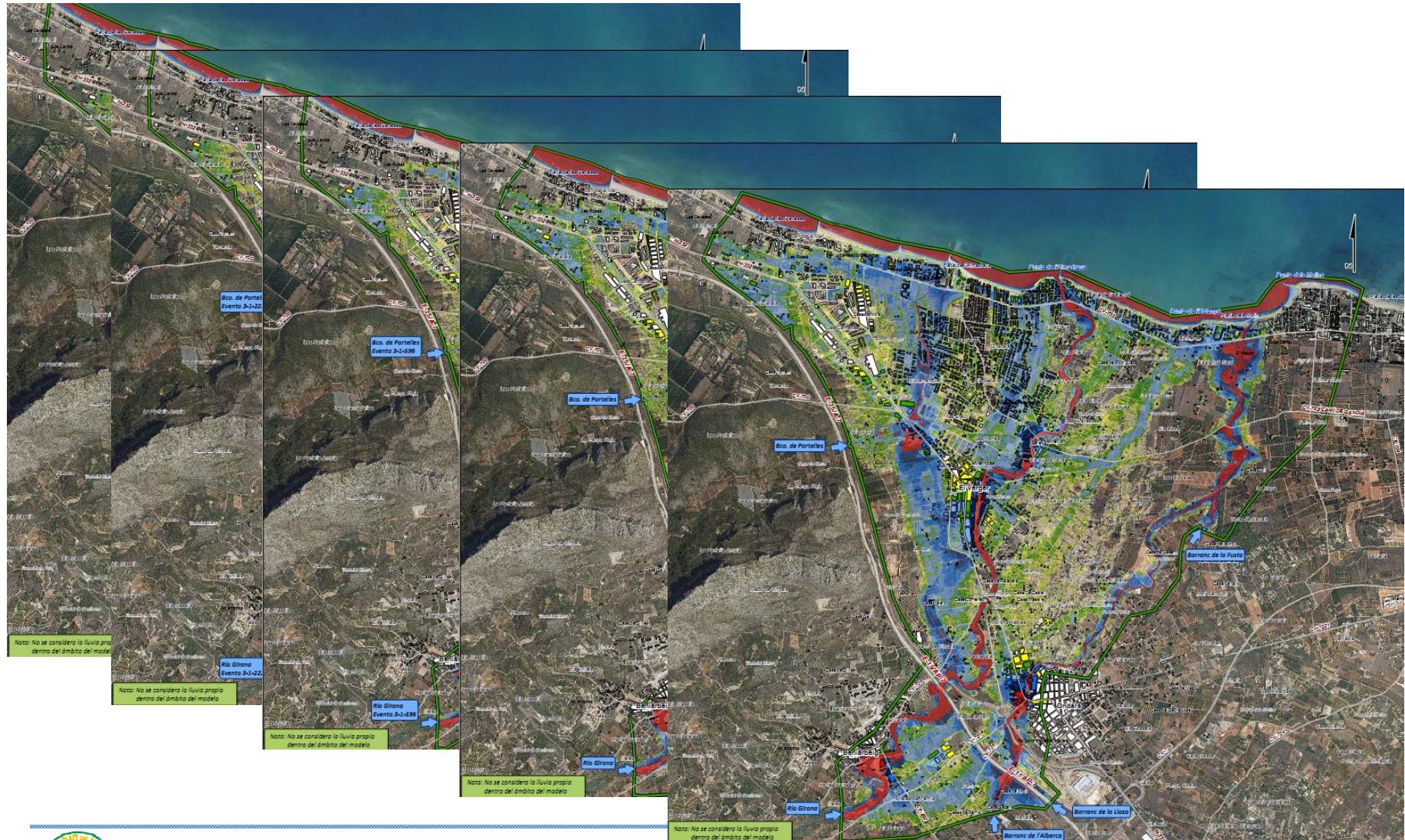


# Condiciones de contorno





# Resultados Río Girona



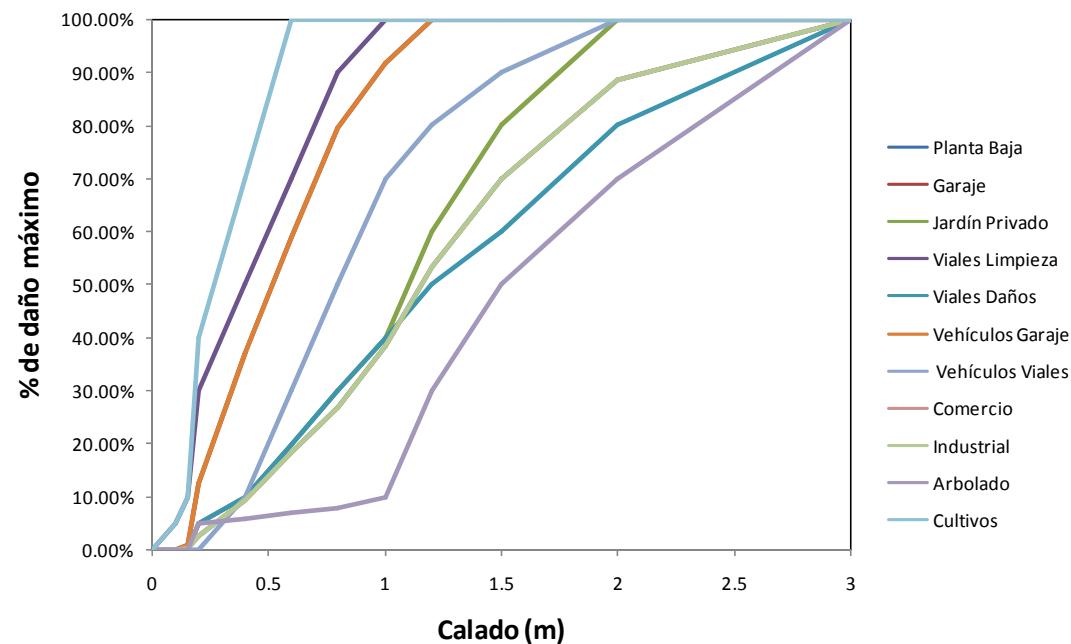


# Estimación del riesgo



# Curvas de daños

## Curvas de vulnerabilidad elementales en función del uso del suelo



## Módulos de daños máximos

Tipología	Módulo
Residencial en Planta Baja	200.00 €
Garaje en sótano	50.00 €
Jardín Privado	2.00 €
Viales Limpieza	0.70 €
Viales Daños	15.00 €
Vehículos en Garaje	2.50 €
Vehículos en Viales	2.50 €
Comercial	250 €
Industrial	250 €
Arbolado Regadío	0.50 €
Arbolado Secano	3.00 €
Cultivos Regadío	0.25 €
Cultivos Secano	1.50 €



# Validación de las curvas

- Evento de validación: octubre 2007
- Datos: daños registrados por el Consorcio de Compensación de Seguros y el ayto. de El Verger
- Daños registrados: 4.300.000 € (**georeferenciados**)



Importe de daños obtenido por la presente metodología: 4.500.000 € (error de 5%)



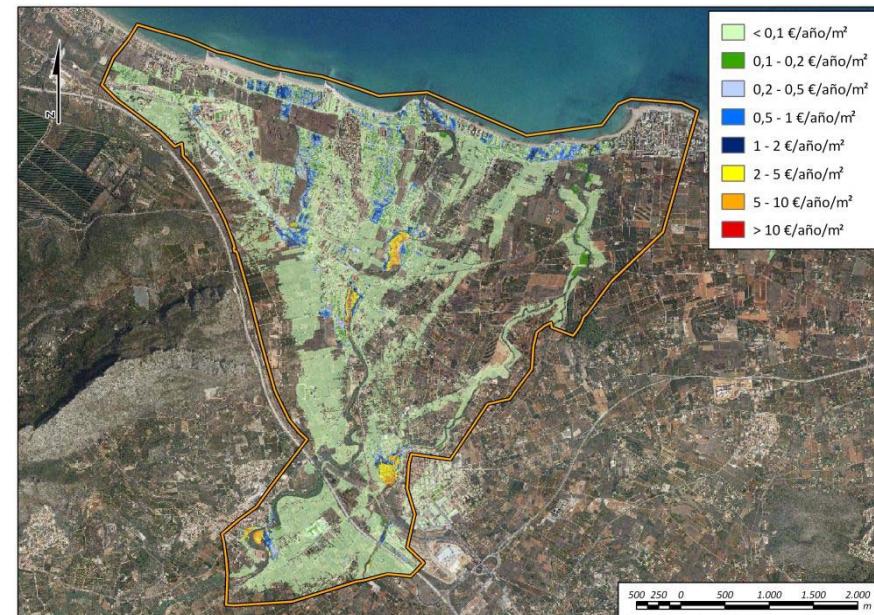


# Estimación del riesgo

- Riesgo= densidad de daño/año:

$$D = \int_{F=0}^{F=1} V(h) dF_H = \int_{h=0}^{h=\infty} V(h) f_H(h) dh$$

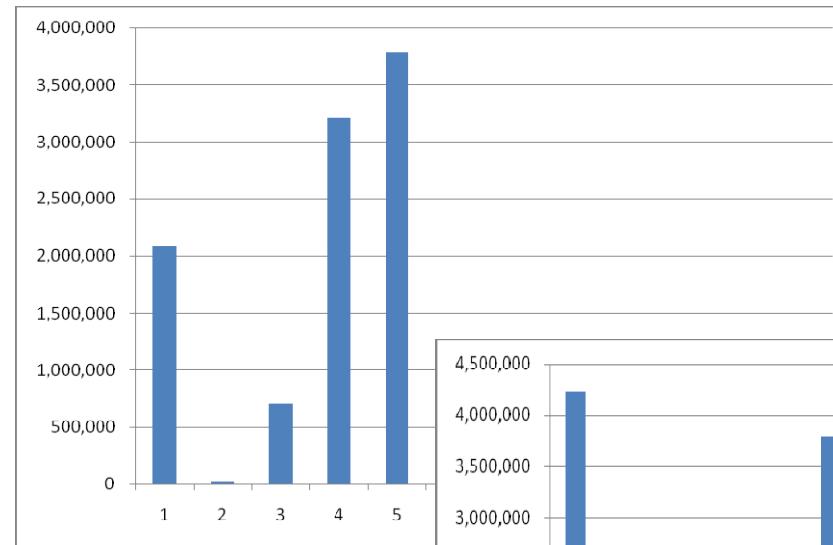
$$D \approx \frac{V_{10}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{10} \right] + \frac{V_{10} + V_{25}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{10} - \frac{1}{25} \right] + \frac{V_{25} + V_{50}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{25} - \frac{1}{50} \right] + \frac{V_{50} + V_{100}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{50} - \frac{1}{100} \right] + \frac{V_{100} + V_{500}}{2} \cdot \left[ \frac{1}{100} - \frac{1}{500} \right] + V_{500} \left[ \frac{1}{500} \right]$$



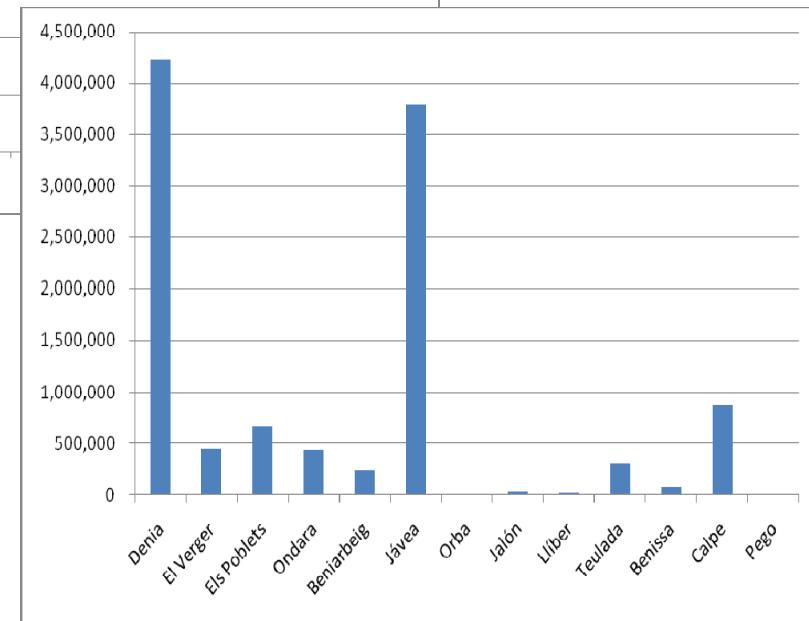
# Resultados Marina Alta

## □ Diagnóstico situación actual

### ➤ Por ZIs:



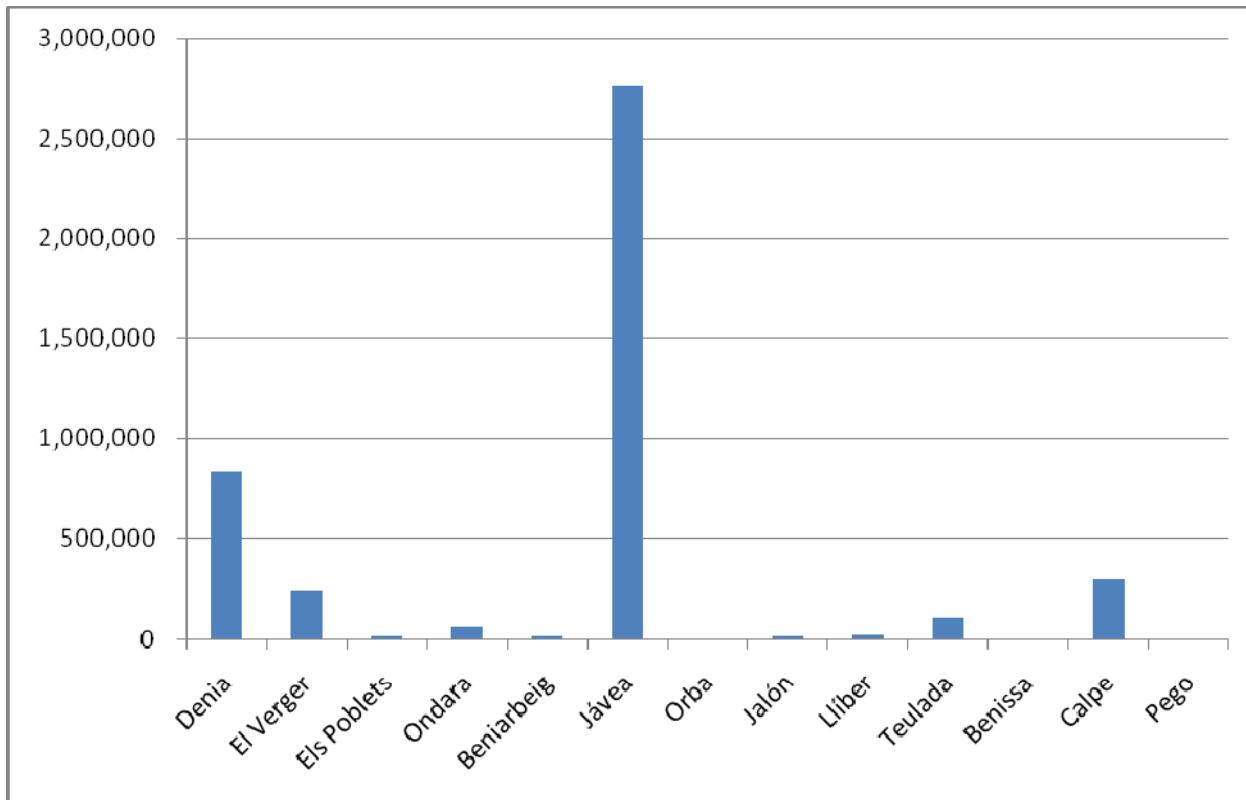
### ➤ Por municipios:





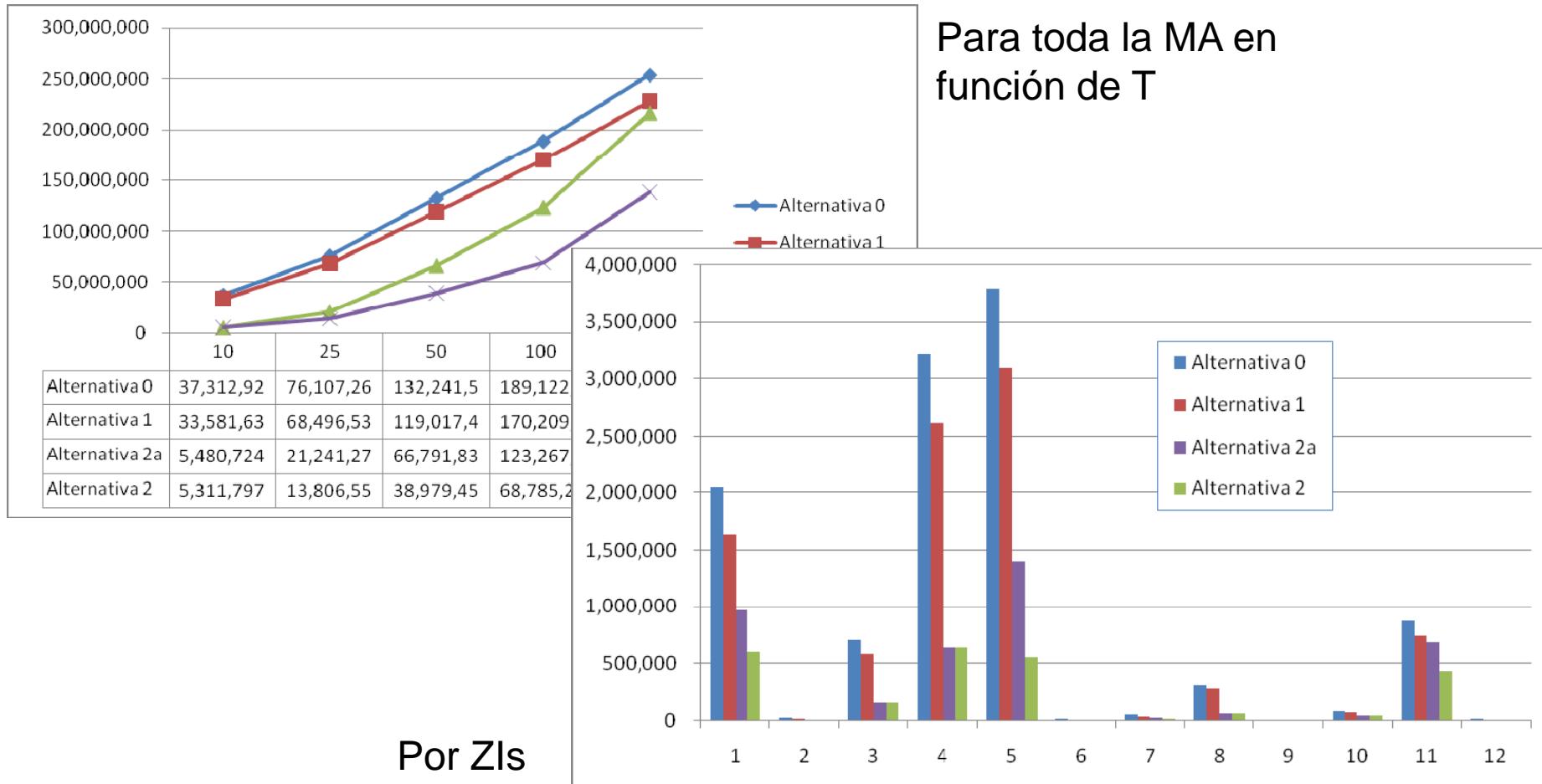
# Resultados Marina Alta

## □ Incremento por usos planificados



# Resultados Marina Alta

## □ Comparación de alternativas



# Conclusiones

- Modelación hidrológica **distribuida** permite fácilmente resultados en número elevado de puntos
- **Lidar + modelo hidráulico 2D** obtienen simulaciones de inundación confiables
- **Metodología novedosa** y alternativa al concepto de “tormenta de diseño”
  - Inclusión de **variabilidad espacio-temporal** de tormentas
  - Inclusión del estado de **humedad inicial**
  - Posibilidad eventos **muy baja frecuencia**

## Conclusiones

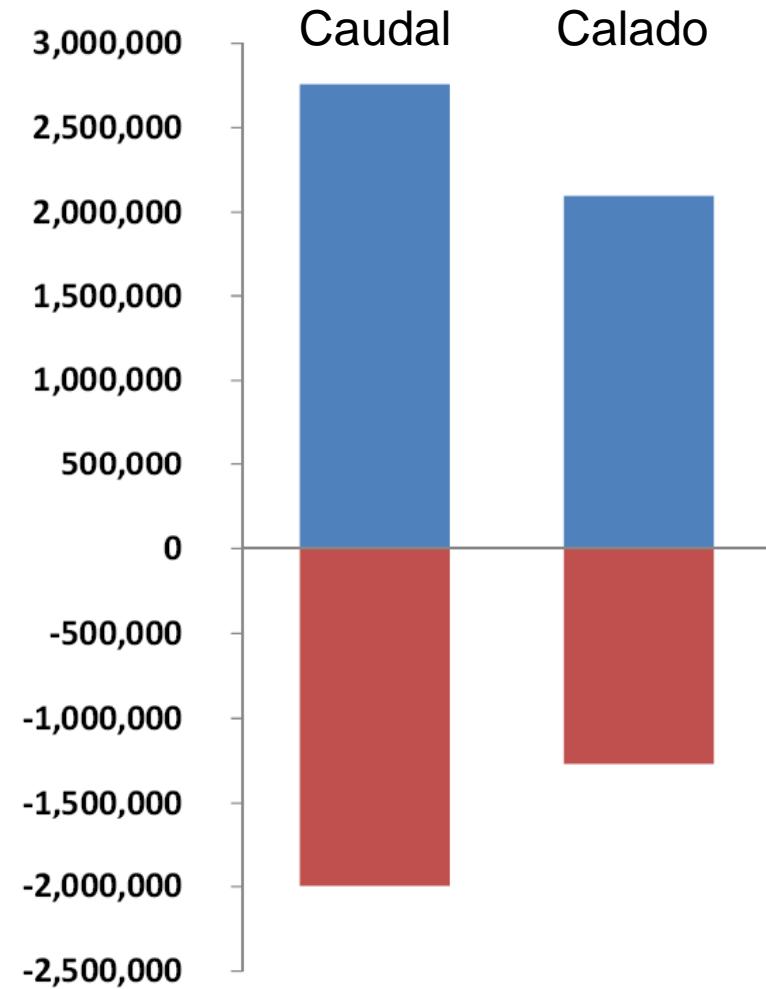
- La alta incertidumbre en las curvas de daño obliga a su **calibración/comprobación** con casos históricos
- La estimación del riesgo por ZI ayuda en la **priorización** de los problemas
- La estimación del riesgo por alternativas en cada ZI:
  - Ayuda en la selección de la mejor alternativa **(efectividad)**
  - Permite el análisis coste/beneficio, donde el beneficio es la disminución del riesgo anual **(eficiencia)**



# Conclusiones

- 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**
  - Sensibilidad a los errores:

- Error -20%
- Error +20%





## 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>



Tabasco (Méjico), 2008



Cañete (Cuenca), 2011



Pakistán, 2010

Encuentro Regional del Agua. Universidad de Medellín. Septiembre 2013

