

**Análisis del comportamiento hidrológico de una pequeña
cuenca mediterránea utilizando varios modelos hidrológicos
como hipótesis. Aplicación en la cuenca de Can Vila
(Barcelona, España)**

Universitat Politècnica de València

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Programa de doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental

Trabajo de Investigación.

Autor: Guiomar Ruiz Pérez

Directores: Félix Francés García
Chiara Medici





- **Introducción**
- **Estado del arte**
- **Área de estudio**
- **Selección del período de calibración**
- **Modelos hidrológicos**
- **Metodologías de comparación**
- **Resultados**
- **Conclusiones**
- **Líneas de investigación futuras**
- **Contribuciones**



Introducción

- Cuencas mediterráneas: comportamiento hidrológico no-lineal
- Primer paso: seleccionar/proponer un modelo hidrológico adecuado
- Nueva metodología basada en el uso de múltiples hipótesis (Clark et al., 2011)
 - Ventajas: nuestro conocimiento sobre el sistema a modelar incrementa
 - Desventajas: las diferentes hipótesis tienen que ser comprobadas

¿Cómo se puede afirmar que un modelo es más adecuado que otro?



Introducción

- Tres modelos fueron usados como hipótesis:
 - LU3: el modelo agregado propuesto más simple
 - LU4: un modelo agregado similar al anterior pero más complejo
 - TETIS: un modelo distribuido
- Comprobación de las hipótesis:
 - Índices de bondad del ajuste (demasiado simplista)
 - Análisis de la serie residual
 - Análisis de sensibilidad
 - Análisis multicriterio

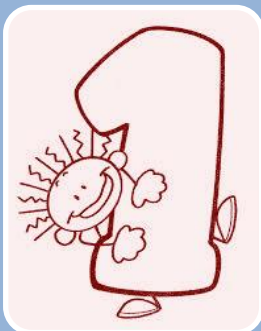
Objetivo del trabajo: determinar qué modelo (o hipótesis) podía reproducir mejor el comportamiento de la cuenca y qué modelo era capaz de reproducir la no-linealidad observada por la razón correcta.



Introducción

- Tres modelos fueron usados como hipótesis:
 - LU3: el modelo agregado propuesto más simple
 - LU4: un modelo agregado similar al anterior pero más complejo
 - TETIS: un modelo distribuido
- Comprobación de las hipótesis:
 - Índices de bondad del ajuste (demasiado simplista)
 - Análisis de la serie residual
 - Análisis de sensibilidad
 - Análisis multicriterio

Objetivo del trabajo: servir de guía para la evaluación y comparación de modelos ambientales en el futuro.



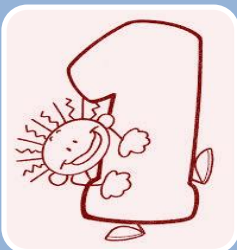
Modelos Hidrológicos

- Un poco de historia...
- Clasificación



Método del uso de múltiples modelos como hipótesis

- Definición
- Ejemplos de aplicación



Modelos Hidrológicos

- Un poco de historia...
- Clasificación

■ En función de la variabilidad espacial:

- Agregado
- Pseudodistribuido
- Distribuido

La superioridad de los modelos distribuidos sobre los modelos agregados no ha sido claramente demostrado (Perrin et al., 2003)

■ En función de su base física:

- Modelos empíricos
- Modelos conceptuales
- Modelos físicamente basados

LU3: Modelo agregado y conceptual
LU4: Modelo agregado y conceptual
TETIS: Modelo distribuido y conceptual



Método del uso de múltiples modelos como hipótesis

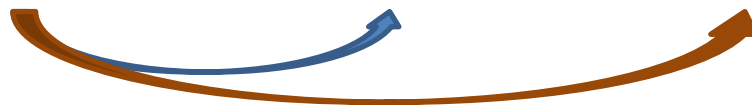
- Definición
- Ejemplos de aplicación

■ Requisitos:

- Los modelos/hipótesis deben ser comprobados e identificables
- Se deben utilizar técnicas de comparación **OBJETIVAS**

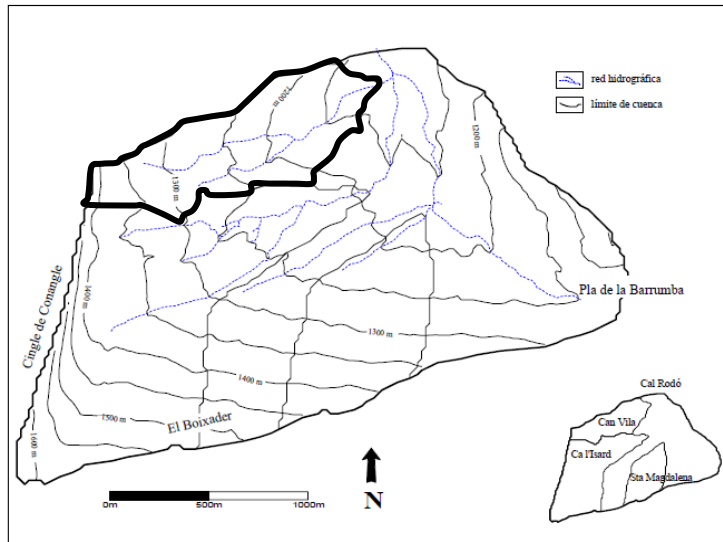
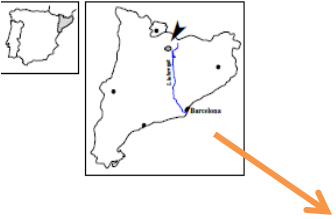
■ Ejemplos de aplicación:

- Comparación de modelos aumentando su complejidad (Ej: Buytaert y Beven, 2011)
- Comparación de modelos de igual complejidad (Smith y Marshall, 2010)



+ complejidad
Agregado vs Distribuido

Área de estudio



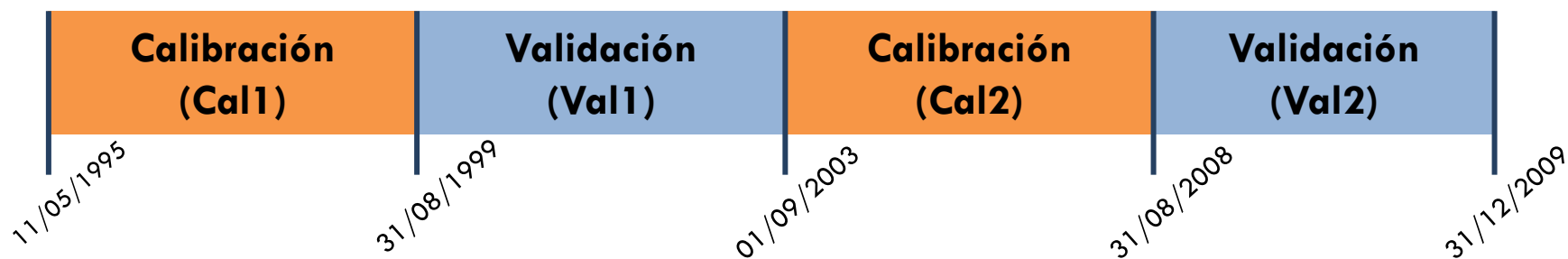
- Cuenca experimental
- Clima mediterráneo
- Área: 0.56 km²
- Suelo limo-arcilloso
- Profundidad del suelo: 0.15-3.0m
- Pendientes suaves
- **Estructura en terrazas**



Selección del período de calibración

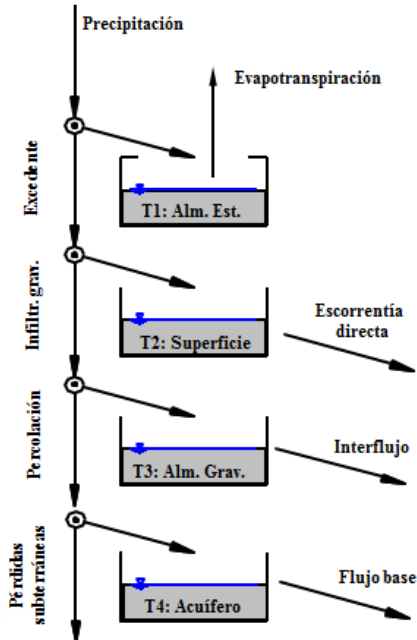
PERÍODO DE CALIBRACIÓN SELECCIONADO

- Período 1 (11/05/1995 – 31/08/1999)
 - Período húmedo
 - Prec. Máxima mensual: 325.6mm
 - Prec. Media anual: 871.5mm
- Período 2 (01/09/2003 – 31/08/2008):
 - Período seco
 - Prec. Máxima mensual: 215.6mm
 - Prec. Media anual: 664.8mm

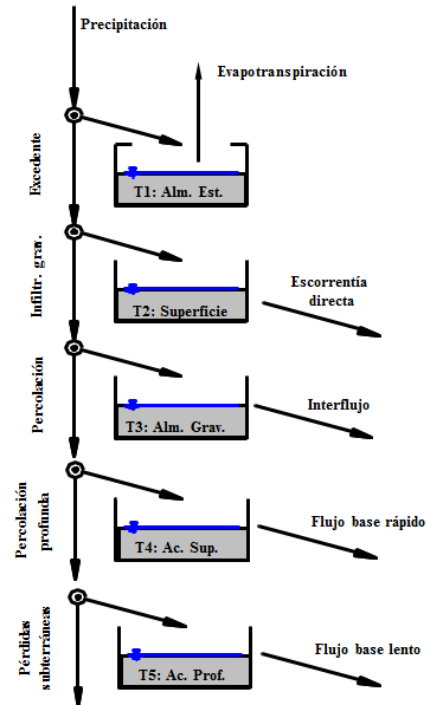


Modelos Hidrológicos

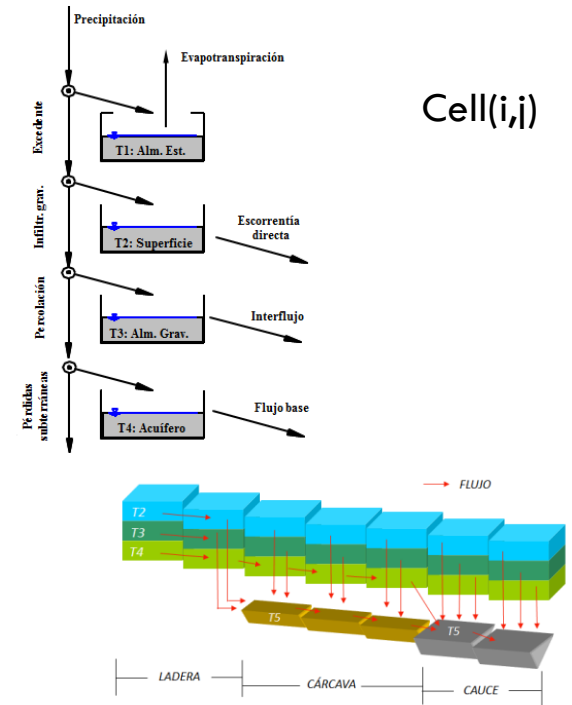
LU3 (agregado)



LU4 (agregado)



TETIS (distribuido)



8 parámetros a calibrar
3 respuestas hidrológicas

10 parámetros a calibrar
4 respuestas hidrológicas
Recarga no-lineal

9 factores correctores a calibrar
3 respuestas hidrológicas



Modelos Hidrológicos

CALIBRACIÓN

- Modelos agregados: Calibración automática (información espacial no necesaria)
- Modelo distribuido TETIS:
 - Determinación de los mapas de parámetros
 - Calibración automática de los factores correctores

TETIS: PREPARACIÓN DE LOS MAPAS DE PARÁMETROS

- Mapas derivados del DEM (pendiente, velocidad de ladera, etc.)
- Mapa λ_v
- Mapa de H_u (en el que se incluye $l_{máx}$)
- Mapa de conductividades

TETIS: PREPARACIÓN DE LOS MAPAS DE PARÁMETROS

TERRAZAS PEQUEÑAS



Máximo almacenamiento en depresión (10 mm)
Reducción de la conductividad horizontal

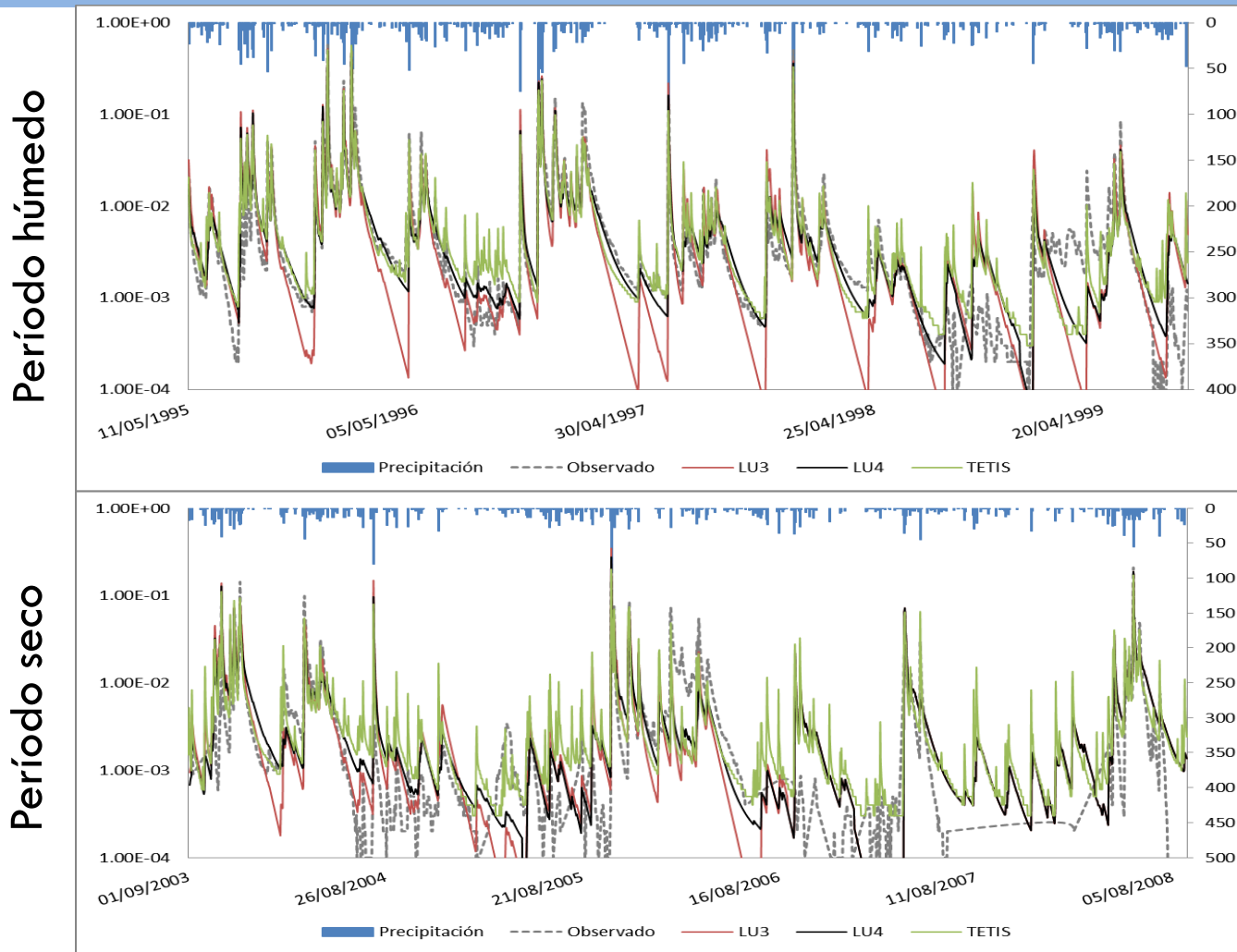
TERRAZAS GRANDES





Modelos Hidrológicos

RESULTADOS Y PRIMERAS CONCLUSIONES



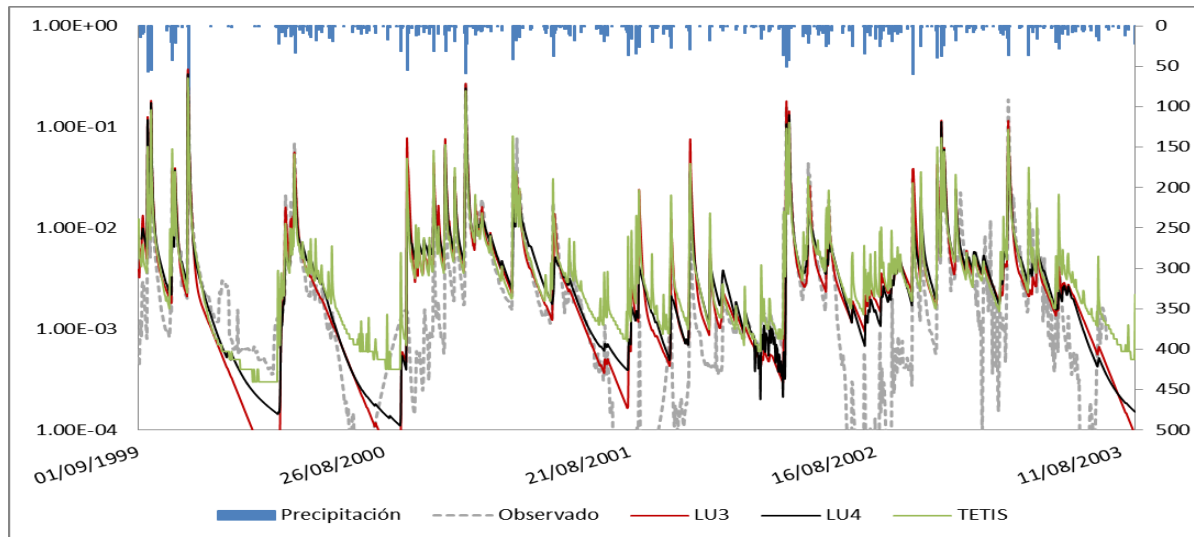
CALIBRACIÓN



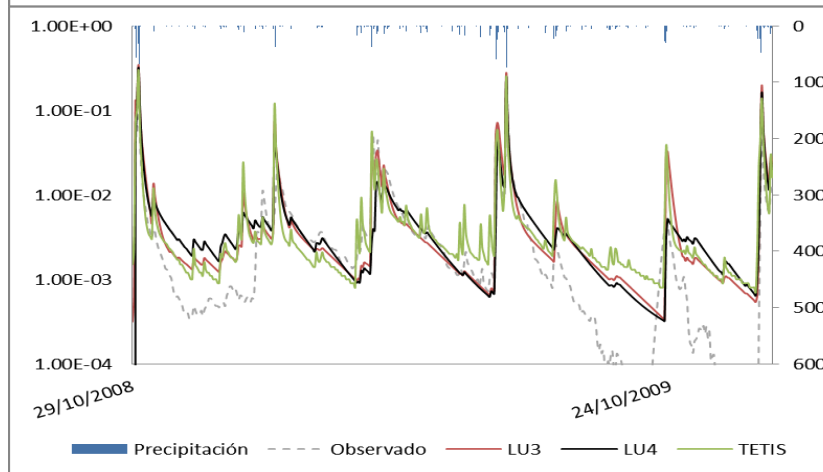
Modelos Hidrológicos

RESULTADOS Y PRIMERAS CONCLUSIONES

Período 1



Período 2



VALIDACIÓN



Modelos Hidrológicos

RESULTADOS Y PRIMERAS CONCLUSIONES

Calibración	PERÍODO HÚMEDO	Indexes	LU3	LU4	TETIS
		E	0.861	0.872	0.895
		V(%)	4.33	8.98	7.85
	PERÍODO SECO	Indexes	LU3	LU4	TETIS
		E	0.479	0.601	0.698
		V(%)	-15.69	-11.34	-14.17
Validación	PRIMER PERÍODO	Indexes	LU3	LU4	TETIS
		E	0.782	0.818	0.818
		V(%)	-27.43	-18.06	-20.09
	SEGUNDO PERÍODO	Indexes	LU3	LU4	TETIS
		E	0.335	0.638	0.705
		V(%)	-54.69	-33.14	-31.42

LU3:
Resultados en validación pésimos

LU4 y TETIS:
Muy similares. Necesario utilizar otras técnicas de comparación

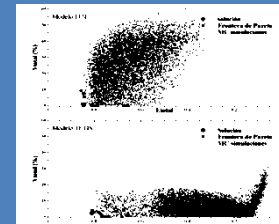
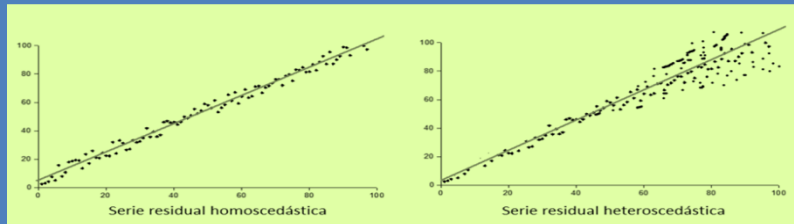
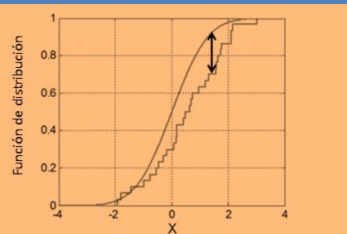


Metodologías de comparación

TÉCNICAS DE COMPARACIÓN APLICADAS

- Índices de la bondad del ajuste
- Análisis de la serie residual
- Análisis de sensibilidad
- Análisis multicriterio (frontera de Pareto)

$$E = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - Q_{sim,j}]^2}{\sum_{j=1}^m [Q_{obs,j} - \bar{Q}_{obs}]^2}$$





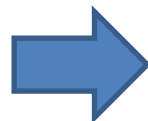
Metodologías de comparación

ÍNDICES DE LA BONDAD DEL AJUSTE

'... the user may get lost in a jungle of potential criteria' (Pushpalatha et al., 2012)

APORTACIONES RECIENTES

- Bennet et al., 2013
- Pushpalatha et al., 2012
- Harmel et al., 2010
- Jain y Sudheer, 2008
- Dawson et al., 2007
- Otros



- Método gráfico de comparación
- Indicador del error
- Índice adimensional



Metodologías de comparación

ÍNDICES DE LA BONDAD DEL AJUSTE

- Métodos gráficos
 - Gráfico de dispersión
 - Curvas de duración
 - Comparación directa de hidrogramas
- Indicadores del error
 - Sesgo: problemas de cancelación
 - RMSE: sesgo hacia los caudales pico
 - MAE: menor sesgo hacia los caudales pico
 - RMSE(λ): análisis caudales bajos con $\lambda=0.2$
- Índice adimensional del ajuste: Índice de Nash-Sutcliffe

Nombre	Fórmula
SESGO	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs_i} - y_{sim_i})$
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs_i} - y_{sim_i})^2}$
MAE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{obs_i} - y_{sim_i} $
RMSE(λ)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs_i}^\lambda - y_{sim_i}^\lambda)^2}$
E	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs_i} - y_{sim_i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{obs_i} - \bar{y}_{obs})^2}$



Metodologías de comparación

ÁNÁLISIS DE LA SERIE RESIDUAL

Aunque no se espera para ninguno de los modelos que la serie residual sea un ruido blanco perfecto, cuanto más 'blanca' sea la serie residual, mejor.

ASPECTOS A ANALIZAR:

- Media próxima a cero
- Normalidad
- No autocorrelación
- No correlación cruzada con el input
- Homocedasticidad

SE AÑADIÓ:

- Ancho de las bandas que contienen el 90% de las observaciones

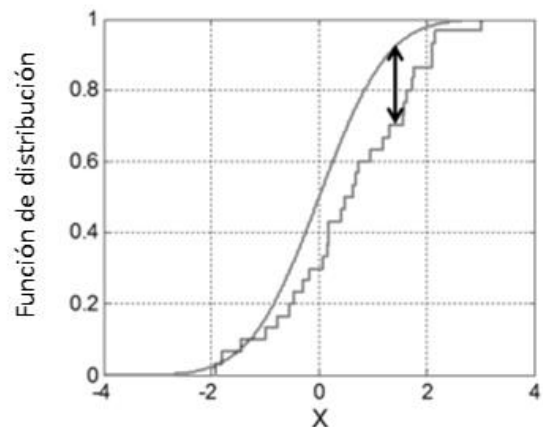


Metodologías de comparación

ÁNÁLISIS DE LA SERIE RESIDUAL

NORMALIDAD:

- Técnicas gráficas:
 - Gráfico de distribución normal
 - Comparación directa función de distribución empírica y teórica
 - **QQ-plot: comparación entre cuantiles**
- Test estadísticos:
 - Test chi-cuadrado
 - **Test Kolmogorov-Smirnov**
 - Test Lilliefors
 - Test Anderson-Darling
 - Test Cramér-von-Mises
 - Test Saphiro-Wilk



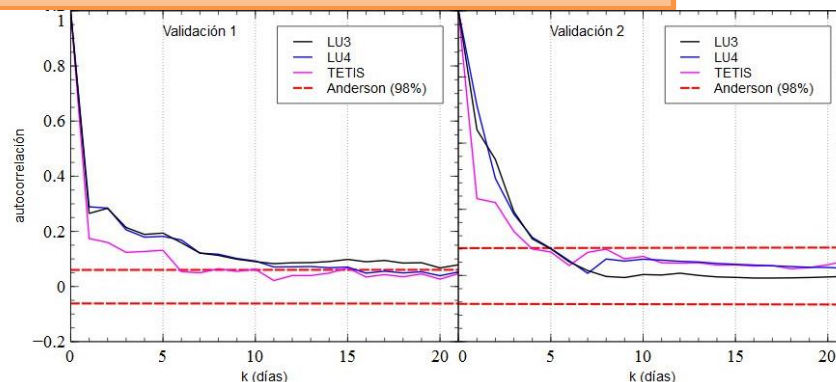


Metodologías de comparación

ÁNALISIS DE LA SERIE RESIDUAL

AUTOCORRELACIÓN Y CORRELACIÓN CRUZADA:

- Técnicas gráficas:
 - Autocorrelograma/correlograma cruzado
 - Límites de Anderson



- Test estadísticos:
 - Test Q de Box-Pierce
 - Test Q de Ljung-Box
- basado en los cuadrados de los primeros coeficientes de autocorrelación



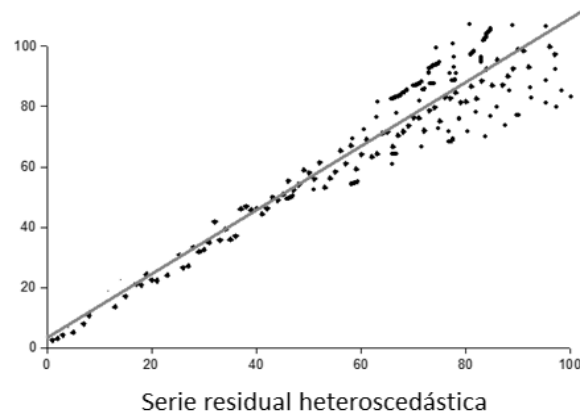
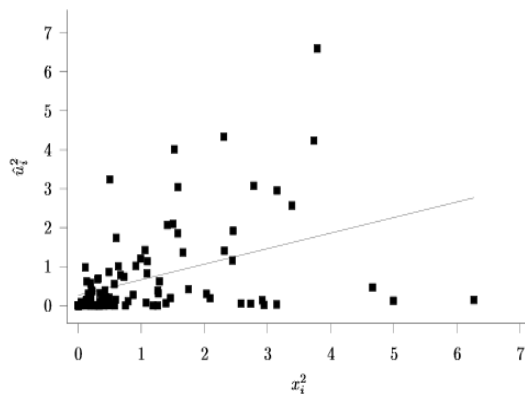
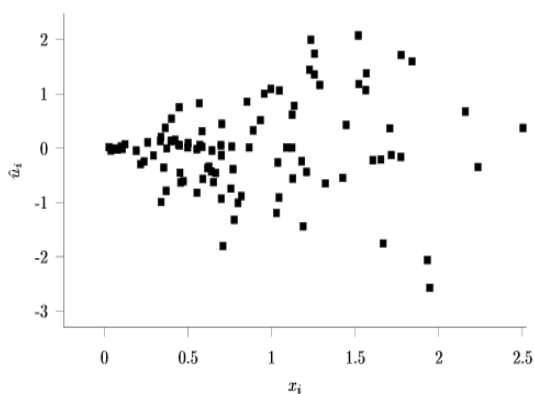
Metodologías de comparación

ÁNÁLISIS DE LA SERIE RESIDUAL

HOMOCEASTICIDAD:

■ Técnicas gráficas:

- Diagrama de dispersión de los residuos vs variable explicativa
- Diagrama de dispersión de los residuos² vs variable explicativa
- Diagrama de dispersión variable sim vs variable obs





Metodologías de comparación

ÁNALISIS DE LA SERIE RESIDUAL

HOMOCEDASTICIDAD:

■ Test estadísticos tradicionales:

- Contraste de White
- Contraste de Breusch-Pagan
- Contraste de Goldfeld-Quandt
- Otros

Ecuaciones de regresión

■ Alternativa:

- Dividir en g grupos ordenados por intensidad del evento
- Test de homogeneidad de la varianza
 - Prueba de Bartlett → Supuesto de normalidad
 - Prueba de Hartley
 - Prueba de Cochran
 - Prueba Levene → No normalidad



Metodologías de comparación

ÁNALISIS DE SENSIBILIDAD

OBJETIVO: Conocer la importancia que tiene el mecanismo no-lineal del modelo LU4

METODOLOGÍA:

- Basada en simulaciones de Montecarlo
- 10.000 simulaciones aleatorias usando función de distribución uniforme
- Dos análisis de sensibilidad:
 - Caudales altos: índice de Nash-Sutcliffe (E)
 - Caudales bajos: $RMSE(\lambda)$
- Establecimiento de criterio de aceptabilidad
 - Conductuales
 - No-conductuales
- Comparación de las funciones de distribución para ordenar por influencia



Metodologías de comparación

ÁNÁLISIS MULTICRITERIO

OBJETIVO: (1) Comprobar que el resultado de la calibración automática está incluido en la frontera de Pareto y (2) comparar la capacidad de los modelos para reproducir igualmente bien el período húmedo y seco simultáneamente

METODOLOGÍA:

- 10.000 simulaciones aleatorias usando función de distribución uniforme
- Funciones objetivo empleadas:
 - Índice E: E_{TOTAL} , E_{WET} y E_{DRY}
 - Error en volumen, V: V_{TOTAL} , V_{WET} y V_{DRY}

OBJETIVO 1: E_{TOTAL} vs V_{TOTAL}
OBJETIVO 2: E_{WET} vs E_{DRY} y V_{WET} vs V_{DRY} → recta 1:1

ÍNDICES DE BONDAD DEL AJUSTE

CALIBRACIÓN

PERÍODO HÚMEDO

Índice	LU3	LU4	TETIS
E	0.861	0.872	0.895
V(%)	4.33	8.98	7.85
RMSE	0.0111	0.0107	0.0097
MAE	0.0035	0.0033	0.0032
RMSE(λ)	0.0653	0.0563	0.0607

PERÍODO SECO

Índice	LU3	LU4	TETIS
E	0.479	0.601	0.698
V(%)	-15.69	-11.34	-14.17
RMSE	0.0076	0.0067	0.0058
MAE	0.0027	0.0026	0.0025
RMSE(λ)	0.1456	0.1441	0.1512

PERÍODO 1

Índice	LU3	LU4	TETIS
E	0.782	0.818	0.818
V(%)	-27.43	-18.06	-20.09
RMSE	0.0071	0.0065	0.0065
MAE	0.0026	0.0025	0.0026
RMSE(λ)	0.0952	0.0966	0.1017

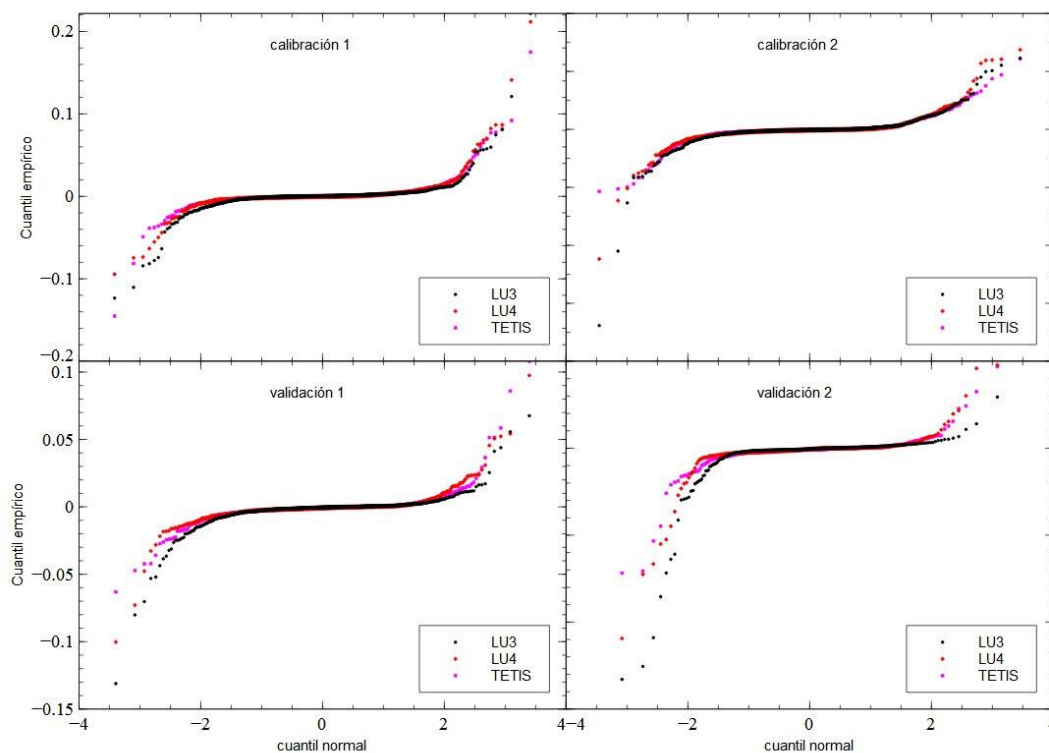
PERÍODO 2

Índice	LU3	LU4	TETIS
E	0.335	0.638	0.705
V(%)	-54.69	-33.14	-31.42
RMSE	0.0126	0.0093	0.0074
MAE	0.0034	0.0029	0.0028
RMSE(λ)	0.0870	0.0760	0.0752

VALIDACIÓN

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

NORMALIDAD:



TEST K-S

Nivel de confianza: 95%

Valores críticos:

Cal1: 0.022

Cal2: 0.023

Val1: 0.021

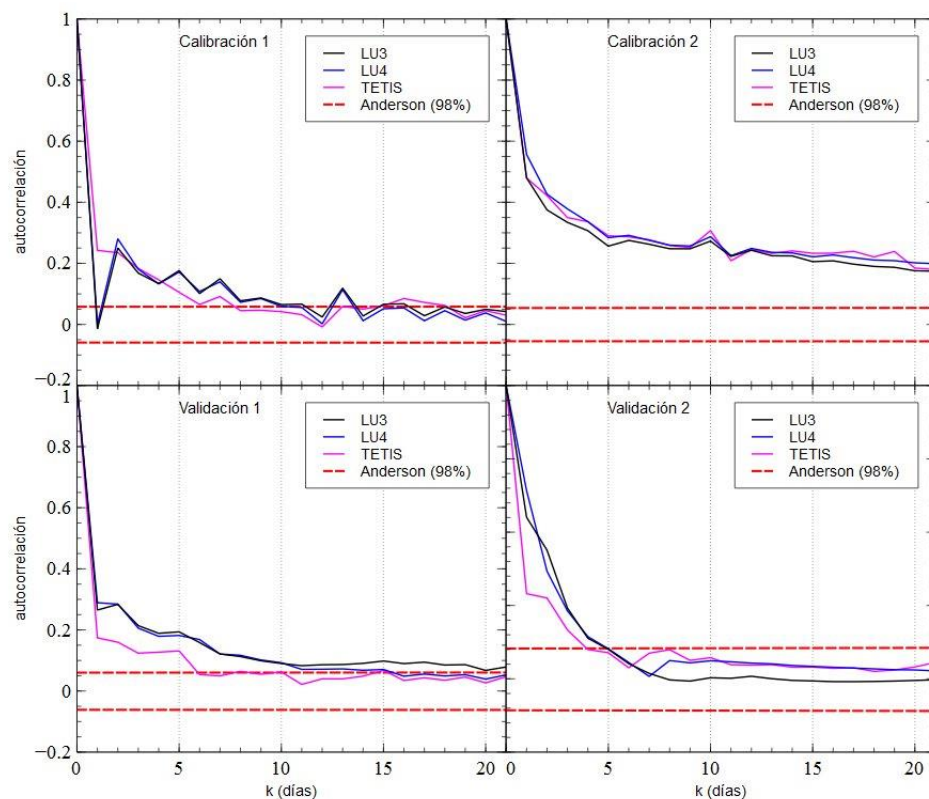
Val2: 0.04

		Cal1	Val1	Cal2	Val2
D _{K-S}	LU3	0.287	0.267	0.274	0.384
	LU4	0.294	0.291	0.288	0.388
	TETIS	0.274	0.286	0.262	0.284

NO NORMALES

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

AUTOCORRELACIÓN:



LÍMITES DE ANDERSON

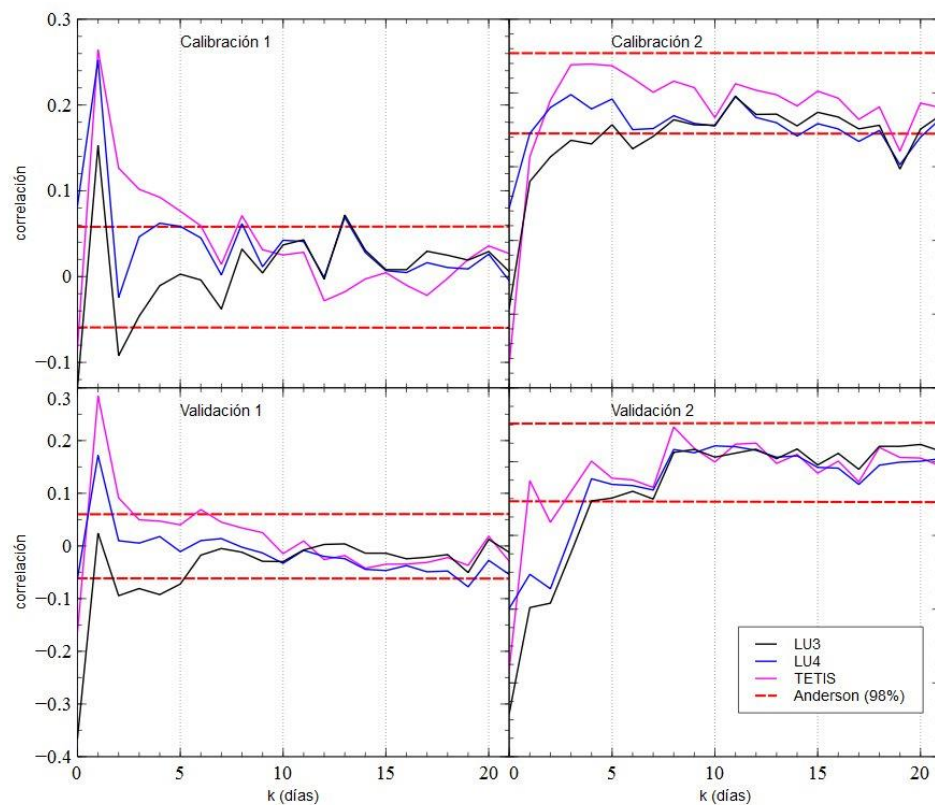
Nivel de confianza: 98%

		Cal1	Val1	Cal2	Val2
ΔT (DÍA)	LU3	10	20	>20	5
	LU4	10	11	>20	5
	TETIS	8	6	>20	4

Número de días con autocorrelación significativa elevado especialmente en período seco

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

CORRELACIÓN CRUZADA CON PPT:



LÍMITES DE ANDERSON

Nivel de confianza: 98%

		Cal1	Val1	Cal2	Val2
ΔT (DÍA)	LU3	5	5	5	4
	LU4	5	2	1	3
	TETIS	6	3	1	2

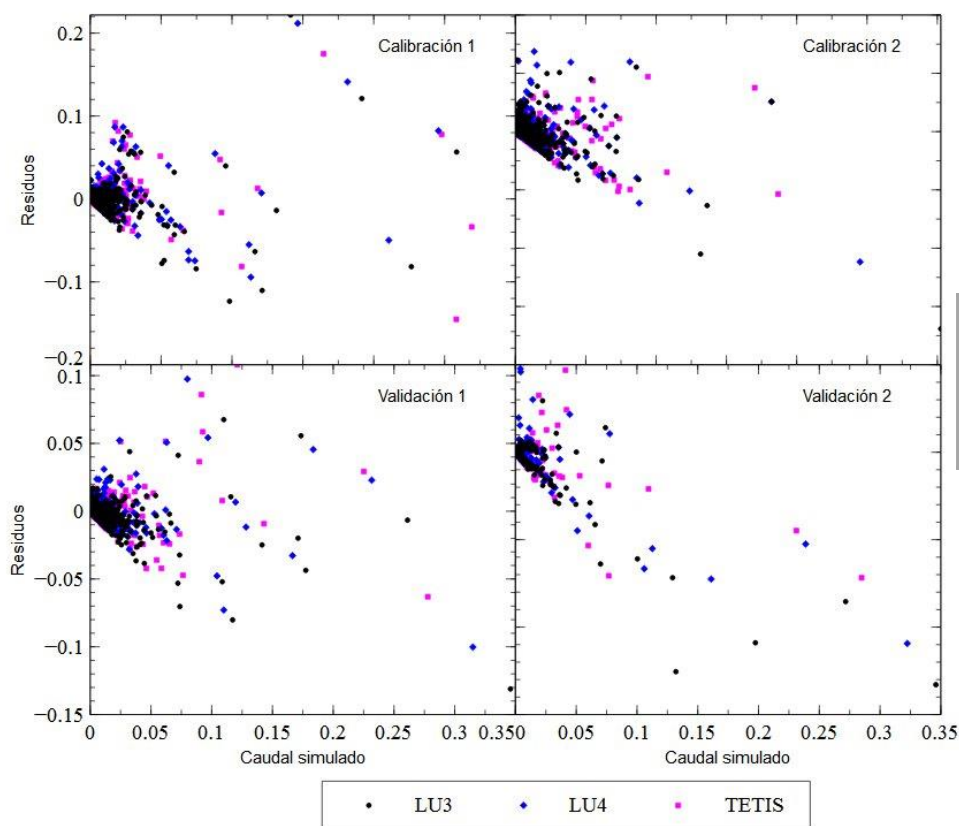
Número de días con correlación cruzada con PPT mucho menor que autocorrelación



Resultados

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

HOMOCEDESTICIDAD:



PRUEBA DE LEVENE

Nivel de confianza: 95%

3 g.d.l en el numerador

>120 g.d.l en el denominador

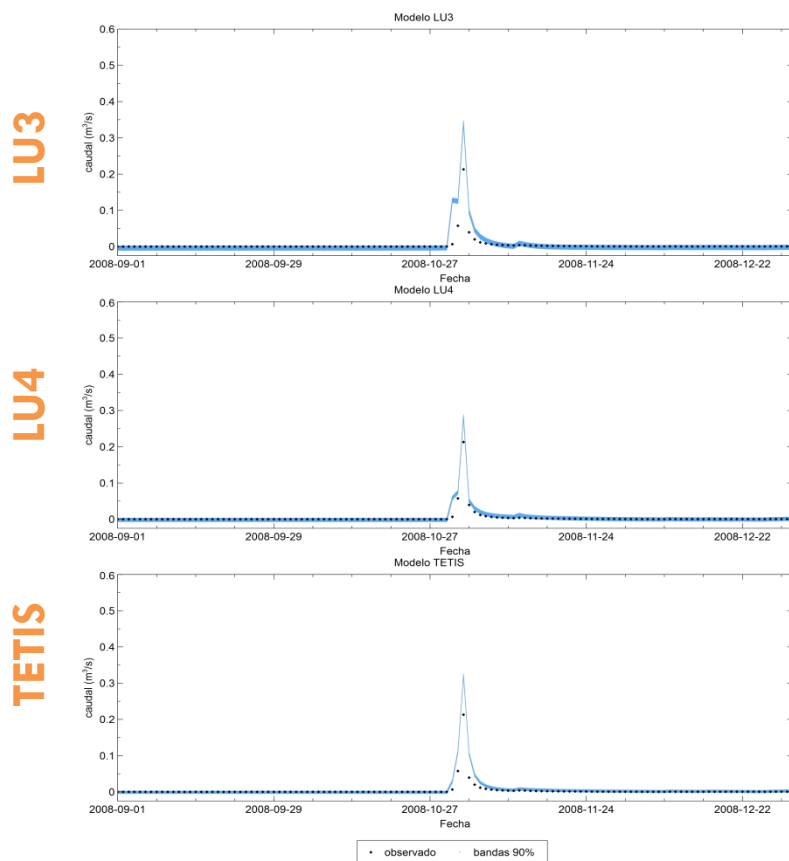
Valor crítico: 2.605

		Cal1	Val1	Cal2	Val2
W	LU3	86.95	97.77	86.36	52.59
	LU4	83.18	77.60	116.94	48.83
	TETIS	85.10	90.26	105.97	45.32

**FUERTE
HETEROCEDASTICIDAD**

ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

BANDAS QUE CONTIENEN EL 90% DE OBSERVADOS:



		Cal1	Val1	Cal2	Val2
ANCHO	LU3	0.0139	0.0103	0.0124	0.0128
	LU4	0.0123	0.0095	0.0113	0.0073
	TETIS	0.0131	0.0094	0.0111	0.0017

TETIS consigue las bandas más estrechas pero con pocas diferencias, excepto en el segundo período de validación

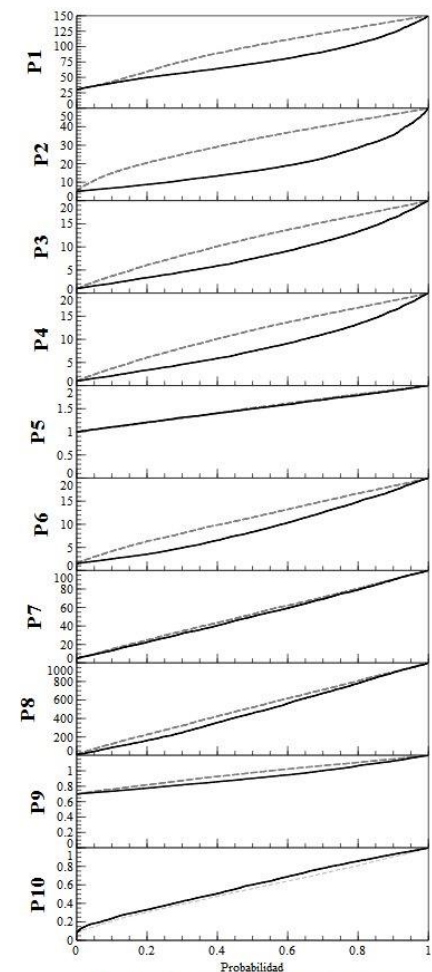


Resultados

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

- Usando índice E (**CAUDALES ALTOS**):

Parámetros	D_{K-S}
Capacidad de infiltración superficial (P2)	0.447
Almacenamiento estático máximo (P1)	0.281
Capacidad de percolación (P3)	0.252
Capacidad de percolación profunda (P4)	0.252
Tiempo de residencia medio del tanque gravitacional (P6)	0.186
Factor corrector de la ET_0 (P9)	0.159
Tiempo de residencia medio del acuífero profundo (P8)	0.075
Umbral de activación del acuífero profundo (P10)	0.068
Tiempo de residencia medio del acuífero superficial (P7)	0.038
Tiempo de residencia medio del tanque superficial (P5)	0.026

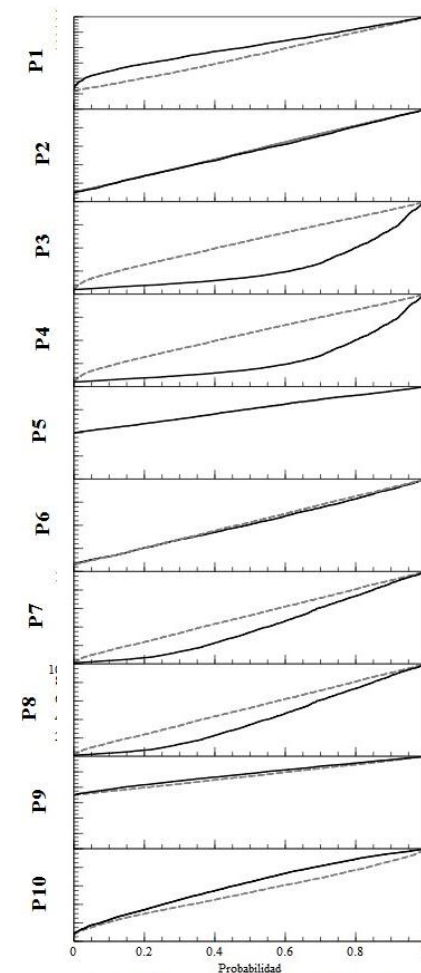


Análisis de sensibilidad caudales altos

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

- Usando $RMSE(\lambda)$ (CAUDALES BAJOS):

Parámetros	D_{K-S}
Capacidad de percolación (P3)	0.491
Capacidad de percolación profunda (P4)	0.488
Tiempo de residencia medio del acuífero profundo (P8)	0.220
Tiempo de residencia medio del acuífero superficial (P7)	0.209
Almacenamiento estático máximo (P1)	0.096
Umbral de activación del tanque profundo (P10)	0.093
Factor corrector de la ET_0 (P9)	0.082
Tiempo de residencia medio del tanque gravitacional (P6)	0.035
Capacidad de infiltración superficial (P2)	0.028
Tiempo de residencia medio del tanque superficial (P5)	0.018



Análisis de sensibilidad caudales bajos



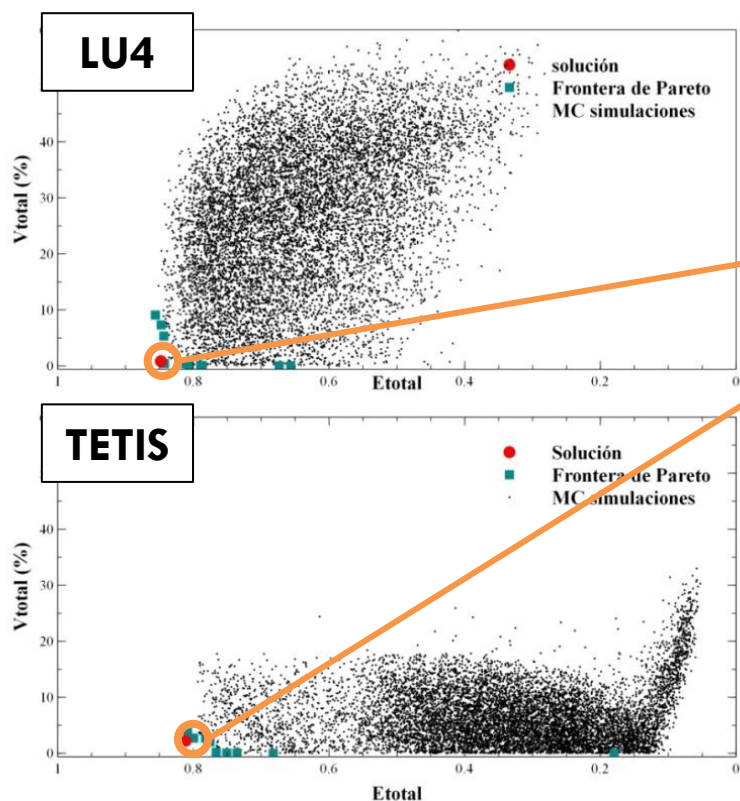
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El umbral de activación de la recarga del acuífero más profundo **NO** es un parámetro influyente ni en la generación de los picos ni en los caudales bajos.

El tiempo de residencia medio de los **DOS** acuíferos son relevantes en lo que respecta a la generación de los caudales más bajos.

ANÁLISIS MULTICRITERIO

OBJETIVO 1: Comprobar que el resultado de la calibración automática está incluido en la frontera de Pareto



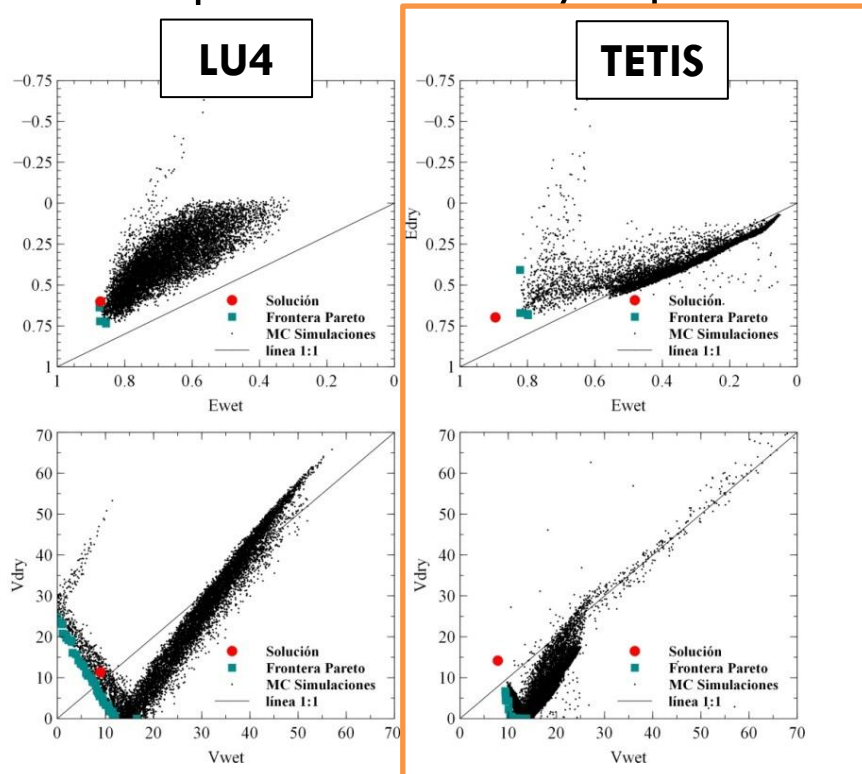
El resultado de la calibración automática está incluido en la frontera de Pareto en ambos modelos

● Solución
■ Frontera Pareto
• MC Simulaciones

ANÁLISIS MULTICRITERIO

OBJETIVO 2: Comparar la capacidad de los modelos para reproducir igualmente bien el período húmedo y el período seco simultáneamente.

● Solución
■ Frontera Pareto
• MC Simulaciones
— línea 1:1



La menor dispersión de la nube de puntos con una tendencia más parecida a una recta 1:1 se da en el modelo TETIS



Conclusiones

- Primeras conclusiones:
 - Modelo LU3: Incapaz de reproducir la no-linealidad observada
 - Modelo LU4: formación acuífero colgado
 - Modelo TETIS: variabilidad espacial
- Índices de bondad del ajuste:
 - Modelo LU3: Peores resultados → 2º período de validación
 - Modelo LU4 y TETIS resultados muy similares entre sí
 - Modelo TETIS: resultados ligeramente mejores
- Análisis de la serie residual:
 - Series residuales muy diferentes a un ruido blanco
 - Resultados muy similares en los tres modelos
 - Bandas algo más estrechas en el modelo TETIS



Conclusiones

- **Análisis sensibilidad:**
 - El mecanismo no-lineal no es relevante
 - Los tiempos de residencia media de los acuíferos sí son relevantes
- **Análisis multicriterio:**
 - Resultados de calibración buenos en sentido multi-criterio
 - TETIS mayor capacidad para reproducir período seco y húmedo
- **CONCLUSIONES FINALES:**
 - Se ha demostrado la superioridad del modelo distribuido TETIS con respecto a su homólogo agregado LU3
 - Modelo TETIS y LU4 resultados muy parecidos. La selección de uno u otro dependerá del objetivo del trabajo
 - La estructura en terrazas parece jugar un papel clave en el comportamiento hidrológico de la cuenca → modelo distribuido es la mejor opción



Líneas de investigación futuras

- Modelación de toda la cuenca de Vallcebre o, al menos, de la subcuenca de Cal Rodó
- Modelación de otra cuenca mediterránea con una estacionalidad todavía más marcada y sin modificaciones antrópicas
- Modelación con un Δt inferior al diario para analizar el efecto de las terrazas en los eventos de crecida
- Actualización del modelo con versiones mejoradas de TETIS
- **Tomar medidas en campo adecuadas para poder llevar a cabo una validación espacial de los resultados obtenidos con el modelo TETIS**



Contribuciones

- Tres contribuciones a congresos internacionales:
 - Jornadas de Ingeniería del Agua. Valencia, España. Octubre, 2013
 - International Symposium on Distributed Hydrological Modelling. Bolonia, Italia. Junio, 2013
 - EGU General Assembly. Viena, Austria. Abril, 2013

- Un artículo en proceso:
 - G. Ruiz-Pérez, C. Medici, J. Latron, P. Llorens, F. Gallart y F. Francés. Investigating a small Mediterranean catchment behavior using three different hydrological models as hypotheses. *Hydrological Processes*



Agradecimientos



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente



Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental



Félix Francés
Chiara Medici
Guiomar Ruiz



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



Francesc Gallart
Jérôme Latron
Pilar Llorens



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

Proyecto ECO-TETIS (ref. CGL2011-28776-C02-01)

**Análisis del comportamiento hidrológico de una pequeña
cuenca mediterránea utilizando varios modelos hidrológicos
como hipótesis. Aplicación en la cuenca de Can Vila
(Barcelona, España)**

Universitat Politècnica de València

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Programa de doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental

Trabajo de Investigación.

Autor: Guiomar Ruiz Pérez

Director: Félix Francés García

Co-Directora: Chiara Medici

