



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Congreso Latinoamericano  
**XII de Hidrogeología**  
**XXVI de Hidráulica**

# Efecto de la variabilidad de los factores de fusión en la modelación hidrológica de cuencas de alta montaña

**Ismael Orozco, Félix Francés<sup>(1)</sup>**

*(1) Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente  
(IIAMA), Universitat Politècnica de València.*



# Introducción

## □ Modelación de cuencas de alta montaña

### ➤ El éxito

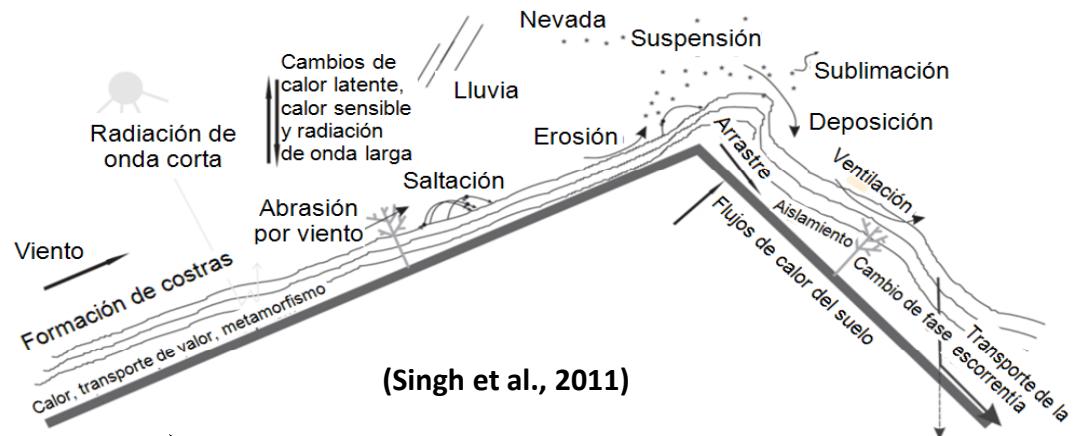
- Fusión de nieve

### ➤ Importancia

- Recursos hídricos
- P. hidroeléctrica
- Erosión
- Inundaciones

### ➤ Problemática

- Procesos físicos
- Propiedades de la nieve
- Falta de información



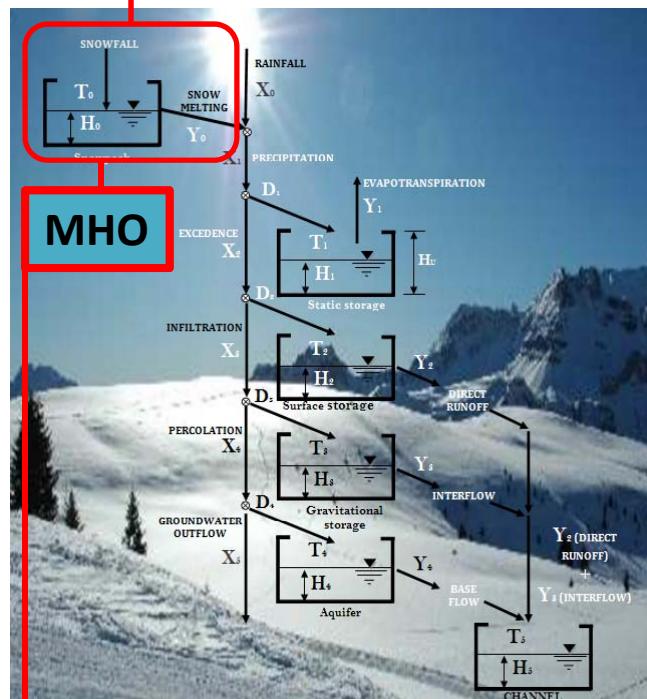
### ➤ Cuantificación de la fusión

- Modelos estocásticos
- Redes neuronales
- Modelos determinísticos
  - Balance de energía
  - Grado-día
  - Híbridos

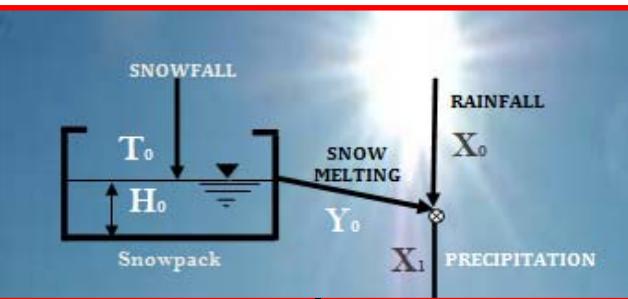




# Metodología



**Modelo hidrológico TETIS**  
(Francés et al., 2012)



**MODELOS HÍBRIDOS DE FUSIÓN**  
(MHO; Hock, 1999; Cazorzi y Dalla  
Fontana 1996; Kling, 2006)

Mapas de  
índices de  
radiación (MIR)

Mapas de  
factores DDF  
(MDDF)

## CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA

*Shuffled Complex  
Evolution SCE-UA*  
(Duan et al., 1992)

*Índice de Nash y  
Sutcliffe (-∞ a 1)*

Parámetros:  
Modelo TETIS  
Modelos de fusión

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\mathcal{Q}_{obs(t)} - \mathcal{Q}_{sim(t)})^2}{\sum_{t=1}^N (\mathcal{Q}_{obs(t)} - \bar{\mathcal{Q}}_{obs})^2}$$





# Modelos de fusión

## □ Modelo grado-día clásico (MHO)

- *Input* (precipitación y temperatura)
- Diferencia lluvia/nieve
- *Output* (Tasas de fusión, SWE, mato de nieve)

$$M_{(i)} = \begin{cases} DDF_{1,2} [Ta_{(i)} - Tb], & \text{si } Ta_{(i)} \geq Tb \text{ y } SWE > 0 \\ 0, & \text{si } Ta_{(i)} < Tb \end{cases}$$

## □ Conceptualizaciones Híbridas

- El MHO y modelo híbridos
- Inicialmente se probaron nueve conceptualizaciones
  - albedo, radiación de onda corta y larga (descartado albedo)

## ➤ Modelo MD1

$$M_{(i)} = \begin{cases} Mf_{1,2} \cdot I_{R(i)} [Ta_{(i)} - Tb], & \text{si } Ta_{(i)} \geq Tb \text{ y } SWE > 0 \\ 0, & \text{si } Ta_{(i)} < Tb \end{cases}$$

donde:

- $I_{R(i)}$ , valor del índice de radiación de onda corta del mapa MIR (1 y 6 mapas)
- $Mf_{1,2} \cdot I_{R(i)}$  corresponde al factor de fusión distribuido con y sin lluvia ( $\text{mm}^2 \text{C}^{-1} \text{d}^{-1}$ )
- Seis mapas





# Modelos de fusión

## ➤ Modelo MD2

$$M_{(i)} = \begin{cases} Mf_{L1,2} + \alpha I_{R(i)} [Ta_{(i)} - Tb], & \text{si } Ta_{(i)} \geq Tb \text{ y } SWE > 0 \\ 0, & \text{si } Ta_{(i)} < Tb \end{cases}$$

donde:

- $\alpha$ , coeficiente de conversión de índices ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
- $Mf_{L1,2}$ , corresponde a la componente de onda larga obtenida por calibración ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
- $Mf_{L1,2} + \alpha I_{R(i)}$ , es el factor de fusión distribuido sin y con lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
- Seis mapas

## ➤ Modelo MD3

$$M_{(i)} = \begin{cases} Mf_{V1,2(i)} + \alpha I_{R(i)} [Ta_{(i)} - Tb], & \text{si } Ta_{(i)} \geq Tb \text{ y } SWE > 0 \\ 0, & \text{si } Ta_{(i)} < Tb \end{cases}$$

donde:

- $Mf_{V1,2(i)}$ , valor del **factor DDF** para cada celda tomado del **mapa MDDF** ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
- $Mf_{V1,2(i)} + \alpha I_{R(i)}$  corresponde al factor de fusión distribuido sin y con lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
- Dos y siete mapas





# Casos de estudio

## □ Proyecto DMIP2 (Smith et al., 2013)

- NOAA
- Sierra Nevada, EE. UU.
  - Cuenca del río Carson
  - Cuenca del río American

## □ Área

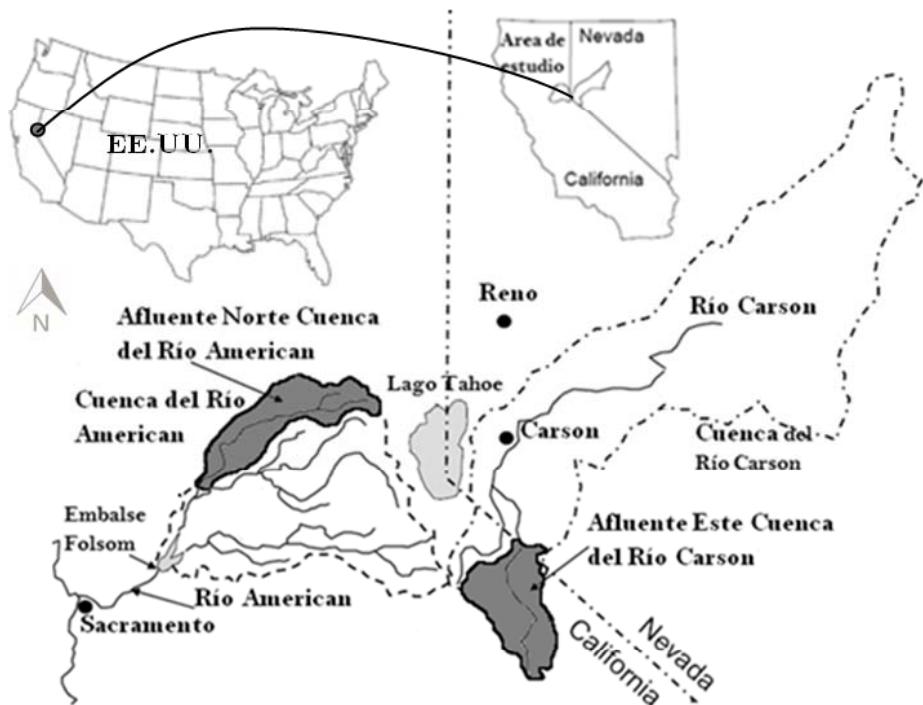
- Carson: 922 km<sup>2</sup>
- American: 886 km<sup>2</sup>

## □ Régimen hidrológico

- Nieve: 1,539-3,407 m (Carson)
- Mixto: 281-2,630 m (American)

## □ Precipitaciones

- Carson: 559 -1,244 mm/año (1,722 -2,438 m)
- American: 813 -1,651 mm/año (393-1,676 m)



(Jeton et al., 1996)

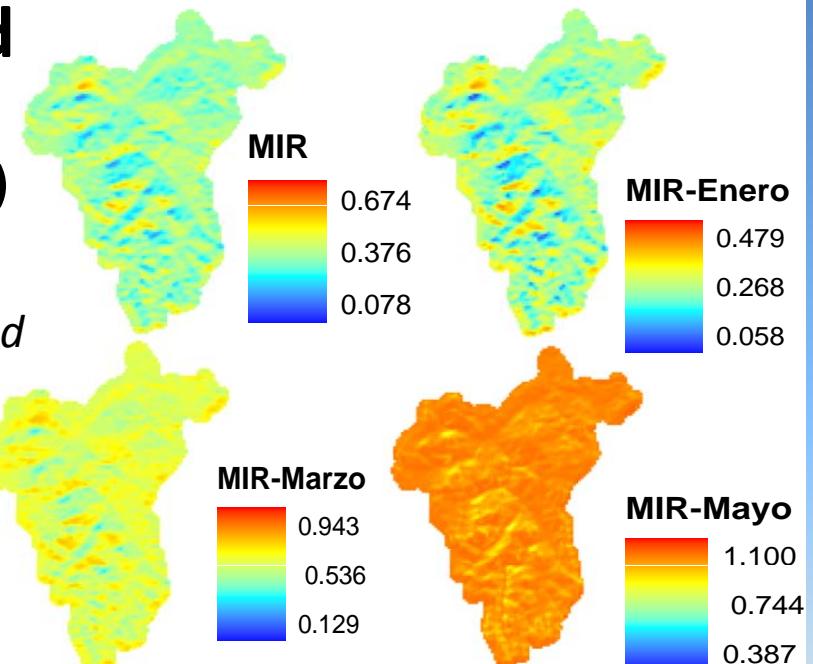




# Mapas de variabilidad

## □ Índices de radiación de onda corta (MIR)

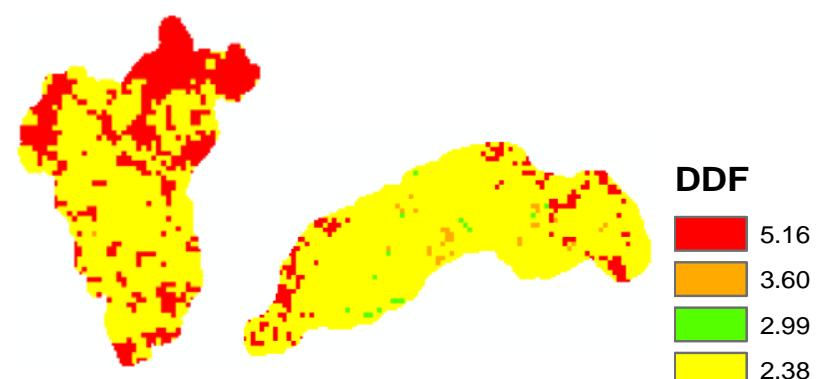
- DEM (400 x 400 m)
- ArcGIS-script *Area solar radiation-Viewshed*  
(Rich et al., 1994)
- A cielo despejado
- Latitud



## □ Factores de fusión grado-día (MDDF)

- Revisión bibliográfica: Bengtsson y Semádeni-Davies, 2011; Martinec y Rango, 1986; Gray y Prowse, 1992

Clasificación	DDF (mm °C <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	DDF <sub>medio</sub> (mm °C <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
Desnudo y prados	2.82-7.50	5.16
Bosque caducifolio	2.70-4.50	3.60
Bosque de coníferas	1.40-3.36	2.38
Bosques mixtos	=	2.99





# Variabilidad de los factores de fusión

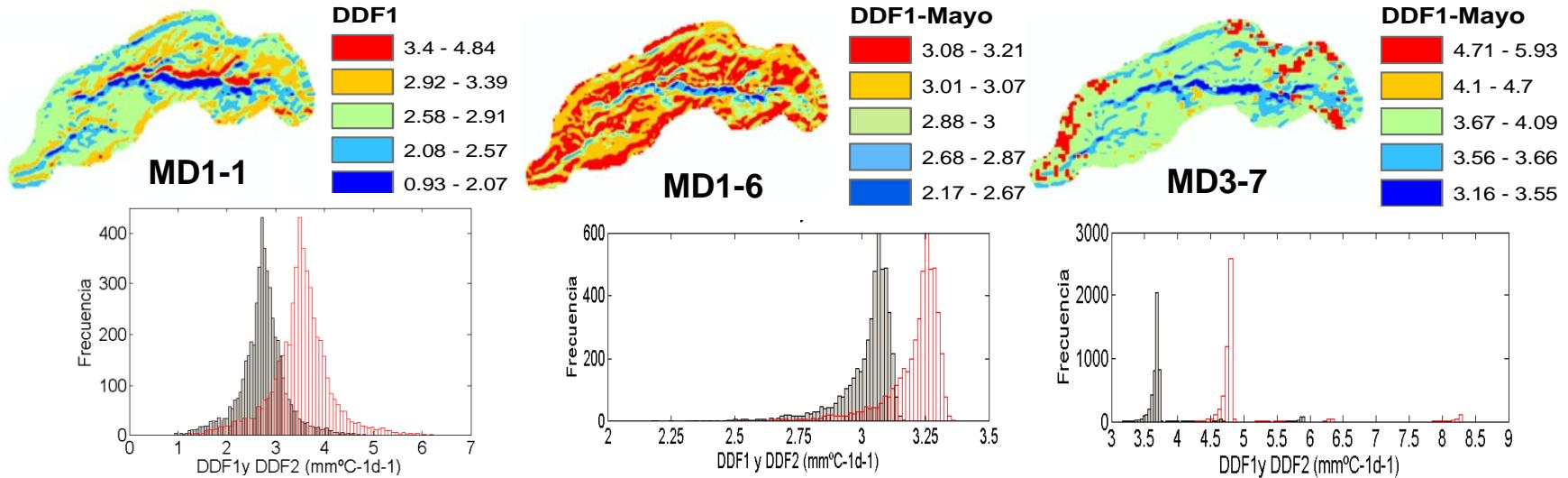
## □ Rango DDFs obtenidos

- Nieve:  $0.23 - 8.5 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$

Cuenca Carson						
Factor DDF	MHO	MD1-1	MD1-6	MD2-6	MD3-2	MD3-7
DDF1 sin lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	3.39	1.20-3.70	0.34-3.90	1.60 - 3.10	2.60-6.40	2.15-5.86
DDF2 con lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	3.17	1.30-4.00	0.70-7.30	4.90- 8.40	3.40-8.00	3.40-8.50

Cuenca American						
Factor DDF	MHO	MD1-1	MD1-6	MD2-6	MD3-2	MD3-7
DDF1 sin lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	3.51	0.93-4.80	0.23-3.21	1.65 - 3.15	3.14-7.08	2.01-5.93
DDF2 con lluvia ( $\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	7.96	1.19-6.20	0.24-3.40	4.96- 8.54	3.60-8 .20	3.20-8.40

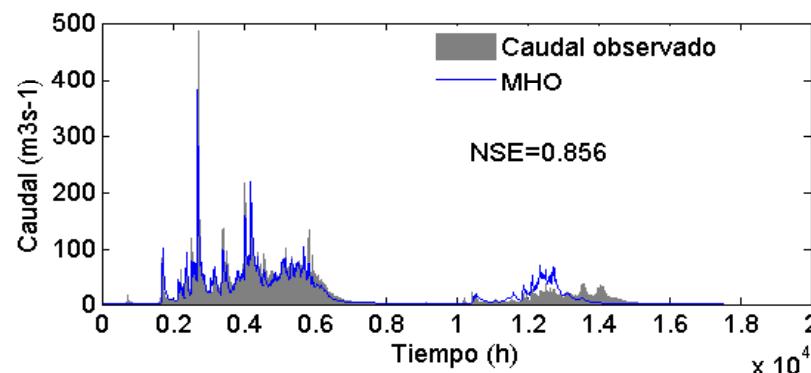




# Modelación de los caudales

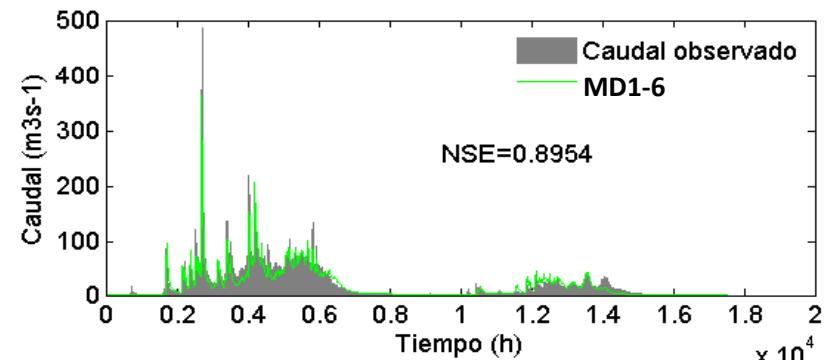
## □ Calibración en American

- NSE= 0.85-0.89
- RMSE= 9.39-11.01  $m^3 s^{-1}$



## □ Calibración en Carson

- NSE=0.84-0.88
- RMSE=4.15-4.84  $m^3 s^{-1}$



## □ Capacidad predictiva de los modelos

Cuenca	Validación	Estadísticos	MHO	MD1-1	MD1-6	MD2-6	MD3-2	MD3-7
Carson	Temporal	NSE	0.705	0.69	0.775	0.763	0.66	0.713
		RMSE ( $m^3 s^{-1}$ )	7.843	8.06	6.868	7.363	8.345	7.688
	Espacial	NSE	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88	0.90
		RMSE ( $m^3 s^{-1}$ )	4.52	4.39	4.28	4.24	4.33	3.90
	Espacio-temporal	NSE	0.65	0.70	0.705	0.703	0.603	0.658
		RMSE ( $m^3 s^{-1}$ )	9.86	8.81	9.238	9.233	10.4	9.805
American	Temporal	NSE	0.603	0.633	0.663	0.593	0.628	0.65
		RMSE ( $m^3 s^{-1}$ )	27.72	27.36	26.69	28.52	27.32	26.78





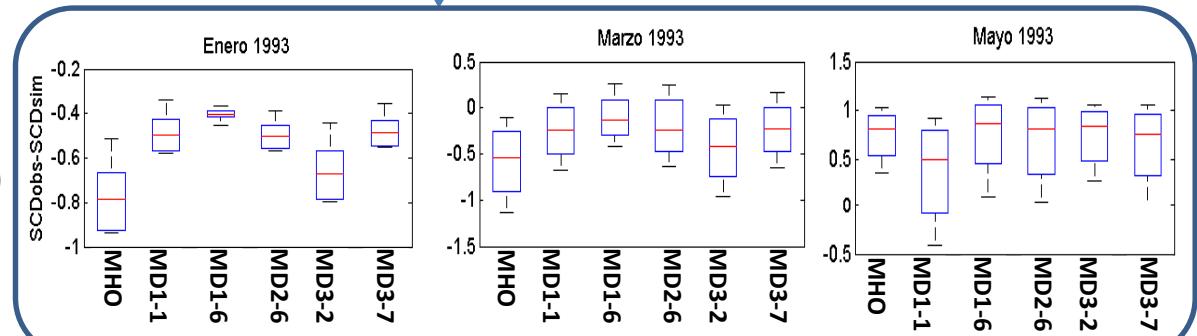
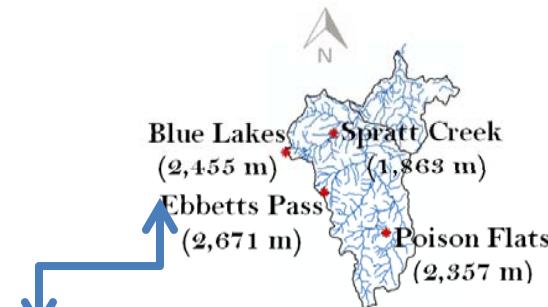
# Modelación de la acumulación de nieve

## □ Cuenca Carson

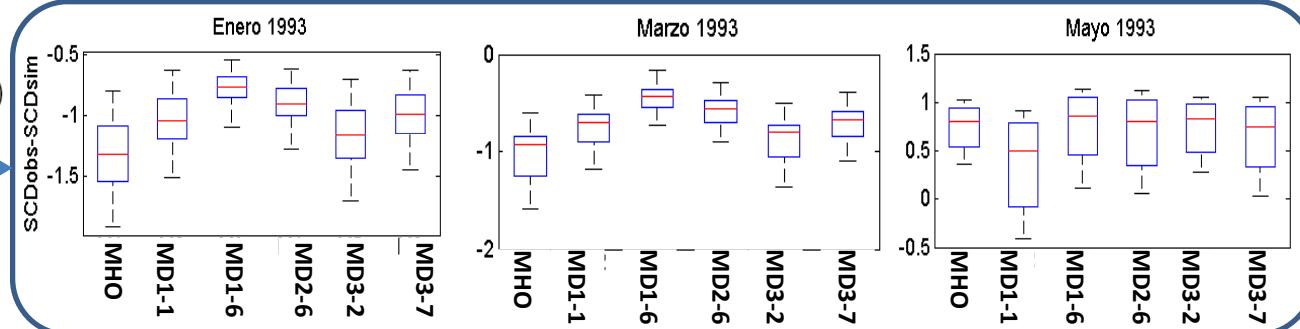
- SWE
- Periodo: 01/10/1992-30/09/1994
- SWE centroid date (Kapnick y Hall, 2010)

## ➤ Eficiencias

- PB= >50% (**Spratt Creek**)
- PB=-5% a 21% (>2,000 m)
- Shamir y Georgakakos (2006)



## □ Cuenca American

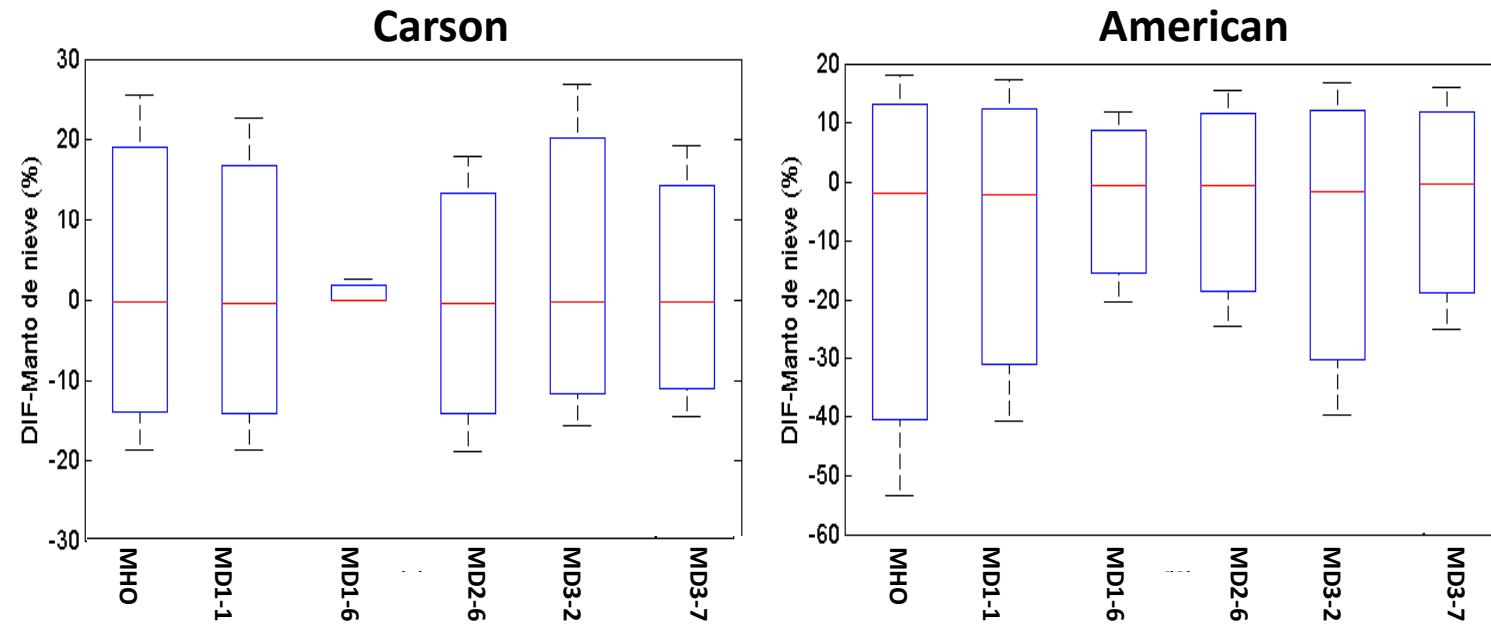




# Modelación de la distribución espacial de la nieve

## □ Validación espacial del manto de nieve

- 202 imágenes de satélite (254 disponibles)
- Periodo: 02/01/1993 al 10/06/1997
- Diferencias entre las áreas del manto de nieve (%)





## Conclusiones

- La variabilidad de los factores DDF, conseguida en los tres casos de estudio, indica que se está modelando con parámetros acordes a los encontrados en la literatura con valores de 1 a  $11.6 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .
- Los resultados en la calibración y validación de los caudales de las cuencas de Sierra Nevada EE. UU., al introducir la variabilidad son buenos tomando en cuenta la complejidad de las cuencas de alta montaña. Además, son eficiencias similares a las conseguidas en el DMIP2 (Smith et al., 2013).
- En relación con la modelación de la acumulación de la nieve, los mejores resultados se obtienen en las estaciones ubicadas a mayor elevación, mientras que los resultados con mayor incertidumbre en las estaciones más bajas (Shamir y Georgakakos, 2006 y Smith et al., 2013).
- La variabilidad de los factores de fusión, mejora significativamente la modelación de la distribución espacial de la nieve. Este resultado es de gran relevancia, ya que en los trabajos encontrados en la literatura no reportan un análisis de este tipo y sólo se enfocan en la validación de los caudales y de la acumulación puntual de la nieve.



# Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).
- A Parques Nacionales de España, Proyecto I+D “ACOPLA” (OAPN 011/2008).
- Al Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.
- Al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València.

## Gracias por su atención



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



GIMHA  
Grupo de Investigación de Modelación  
Hidrológica y Ambiental



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología