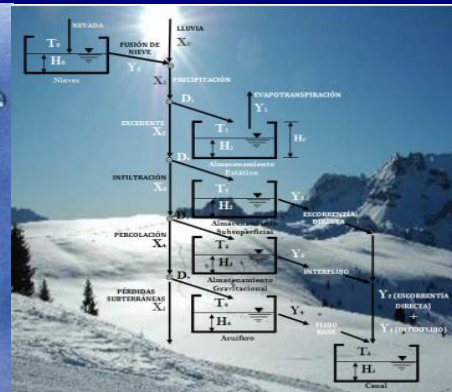


## TESINA

Evaluación del submodelo de fusión de nieve del Modelo TETIS en las cuencas de alta montaña del río American y Carson dentro del proyecto DMIP2



Presentada por:  
Ismael Orozco Medina

Dirigida por:  
Dr. Félix Francés García

# CONTENIDOS

---

- Introducción
- Modelo TETIS y Submodelo de fusión
- Fases iniciales de implementación del modelo
- Calibración
- Validación
- Conclusiones y futuras líneas de investigación

# INTRODUCCIÓN

---

## ➤ **Nieve**

- Mezcla de hielo, aire y agua
- Variables meteorológicas (temperatura)
- Proceso de fusión

## ➤ **Importancia de la nieve**

- Recurso deportivo
- Recurso hídrico
- Crecidas por fusión o mixtas (fusión y lluvia)

## ➤ **Modelación hidrológica de la nieve**

- Estimación de agua almacenada en el manto de nieve
- Evaluación del proceso fusión
- Almacenamiento y liberación del agua en varias escalas de tiempo
- Difícil acceso

# INTRODUCCIÓN

## ■ Modelos y métodos de fusión de nieve

### ➤ Modelos

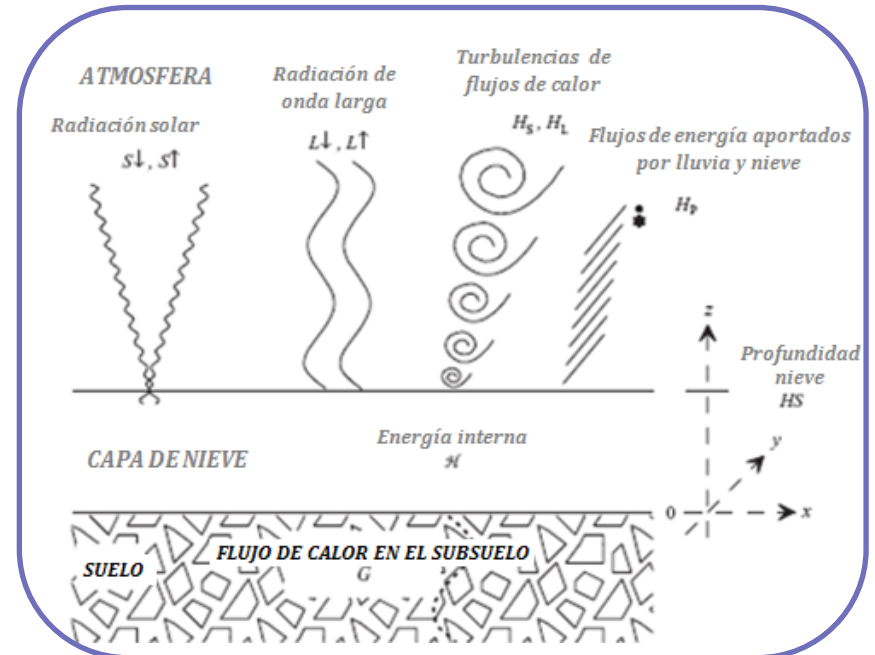
- Determinísticos
- Estocásticos
- ANN

### ➤ Balance de energía

$$Q_i = Q_{ns} + Q_{nl} + Q_h + Q_e + Q_r + Q_g + Q_m$$

### ➤ Método *Grado-día*

- Enfoque empírico (60 años)
- Usado para nieve y glaciares
- Asume una relación empírica entre la temperatura del aire y la fusión
- Correlación entre la radiación de onda larga y corta con la temperatura del aire



$$M = M_f (T_a - T_b)$$

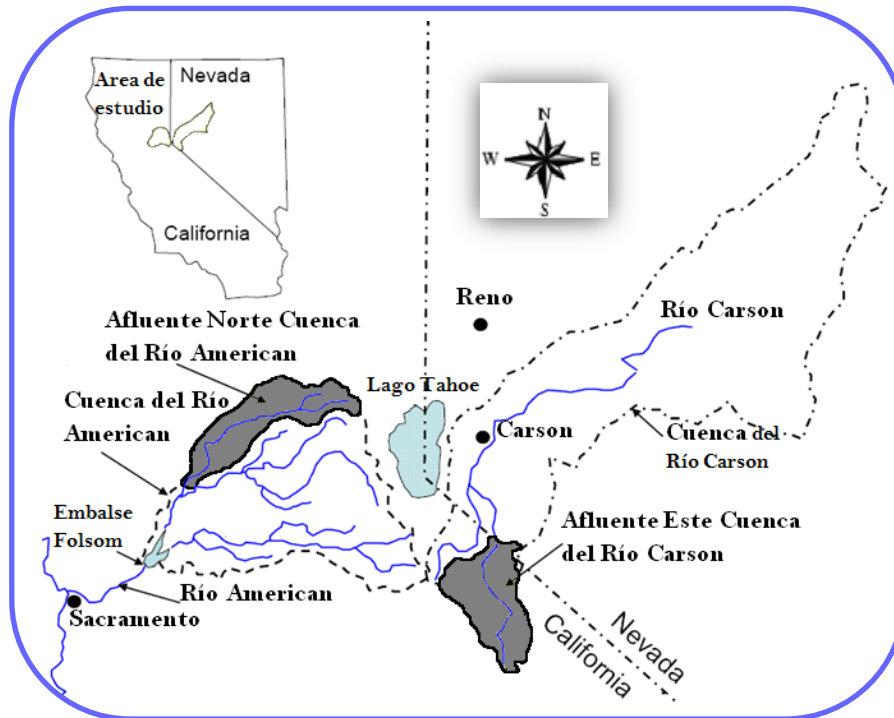
## ■ Objetivos de la tesina

- Implementar el modelo hidrológico distribuido TETIS, en las cuencas de alta montaña *American* y *Carson* en *EE. UU.*, para su evaluación dentro del Proyecto Comparación de Modelos Distribuidos fase II (*DMIP2 por sus siglas en inglés*), para la predicción de crecidas
- Evaluar el funcionamiento del submodelo de fusión de nieve de TETIS en los casos de estudio
- Obtener los puntos de partida para el planteamiento de la investigación doctoral

# INTRODUCCIÓN

---

- Proyecto Comparación de Modelos Distribuidos (*DMIP*)
  - ***NOAA/NWS (2000)***
  - ***DMIP***
    - ***DMIP1***
      - Río *Illinois, Blue, Elk* (*Oklahoma, Arkansas y Missouri en EE. UU.*)
    - ***DMIP2***
      - Río *Illinois, Blue, Elk*
      - Río *American y Carson* (*Sierra Nevada en EE. UU.*)
  - **Interés por participar en el *DMIP2***
    - Aprovechar la información y comparar el modelo TETIS frente a otros modelos distribuidos
    - Analizar el funcionamiento del submodelo de fusión de nieve
    - Participar en las reuniones que organiza la *NOAA/NWS*



### ➤ Subcuenca del río *American*

- Área: 886 km<sup>2</sup>
- Precipitación media:
  - 813 mm (393 msnm)
  - 1651 mm (1676 msnm)
- Temperatura: 3-18 °C
- Rocas volcánicas y granodioritas
- Franco y franco-arenoso
- Bosque y pastizales

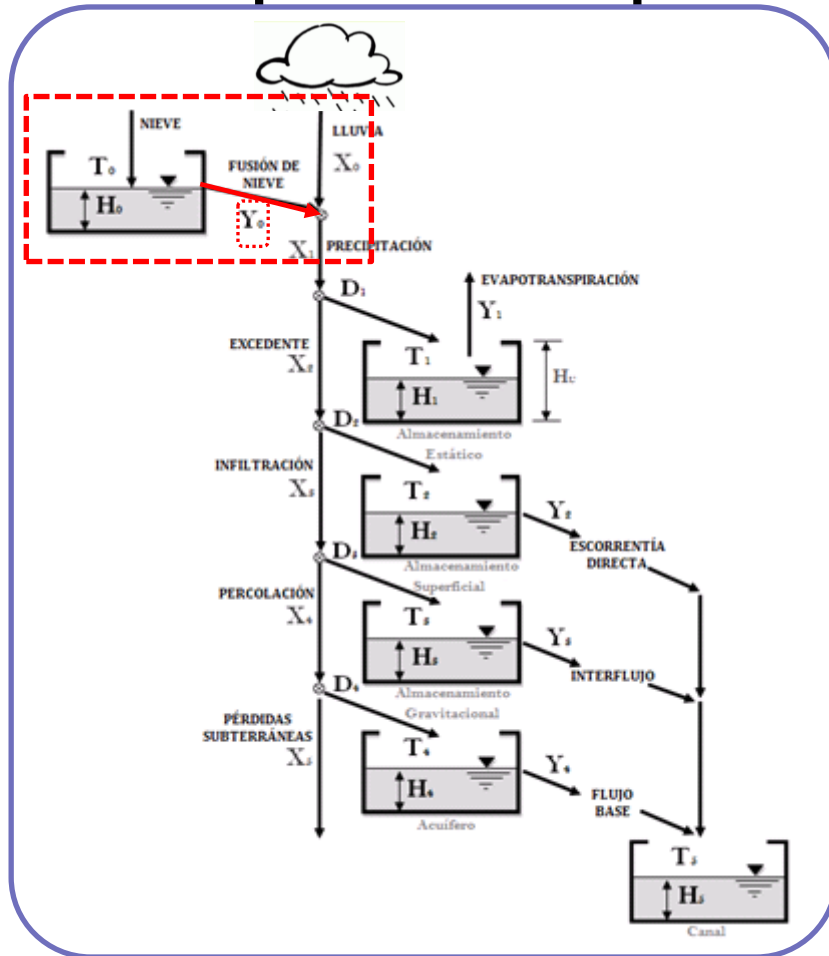
### ➤ Subcuenca del río *Carson*

- Área: 922 km<sup>2</sup>
- Precipitación media:
  - 560 mm (393 msnm)
  - 1244 mm (1676 msnm)
- Temperatura: 0-14 °C
- Rocas metasedimentarias y granodioritas
- Franco-arcilloso y franco arenoso
- Bosques, arbustos y pastizales

# MODELO TETIS Y SUBMODELO DE FUSIÓN

## ■ Conceptualización del modelo

### ➤ Esquema de tanques



### ➤ Submodelo *grado-día*

#### ■ Precipitación: $T_c = T_b; (0^\circ C - 2^\circ C)$

- Nieve:  $T < T_b$  ( $T_0$ )
- Lluvia:  $T \geq T_b$  ( $X_1$ )

#### ■ Fusión y acumulación de nieve

$$Y_0 = \begin{cases} M_f (T - T_b); si(T \geq T_b) \\ 0; si(T < T_b) \end{cases}$$

$$M_f \begin{cases} M_{f1}; (sin\_lluvia) \\ M_{f2}; (con\_lluvia) \end{cases}$$

#### ■ Distribución espacial

- Altura equivalente de agua (*SWE*)
- Inverso de la distancia al cuadrado



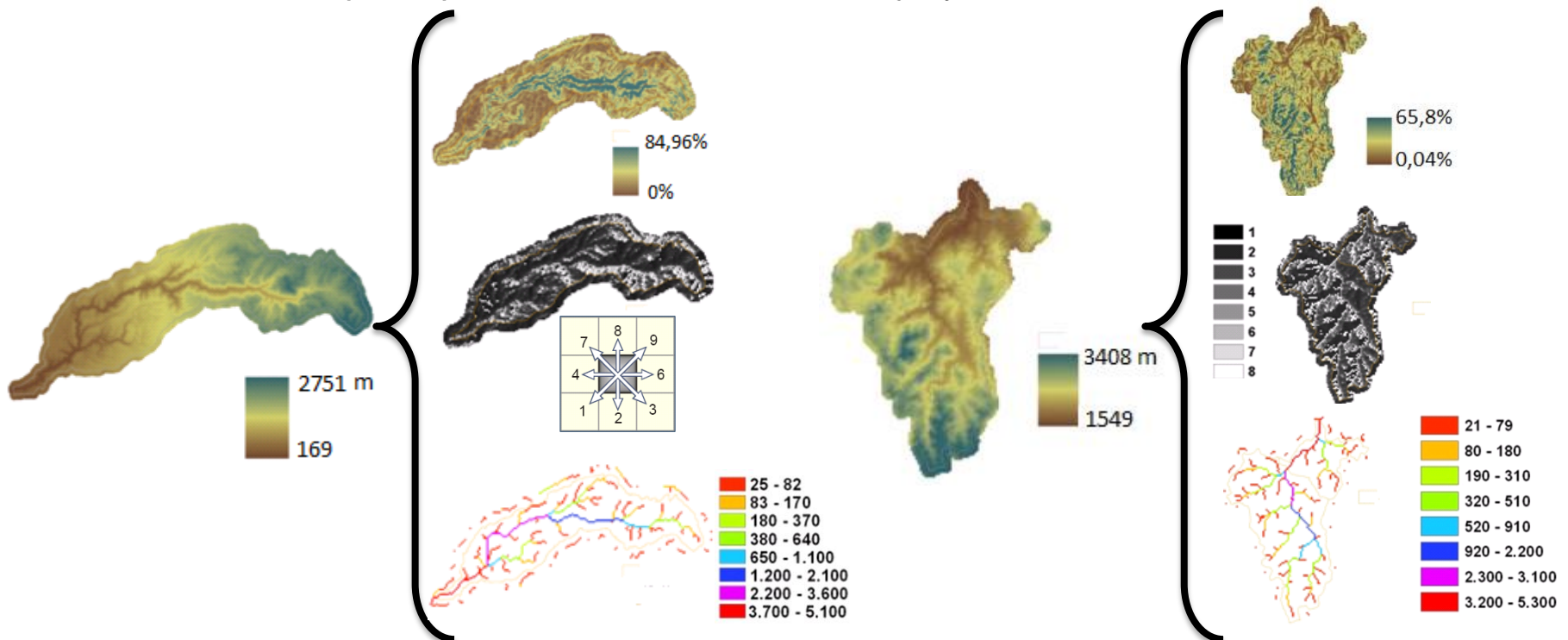
# FASES INICIALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

## ■ Procesamiento de la información

- Escala espacial 400 m (geográfica)
- Escala temporal horaria (hidrometeorológica)
- *Alberts Equal-Area Conic NAD 83*

## ➤ Mapas de entrada

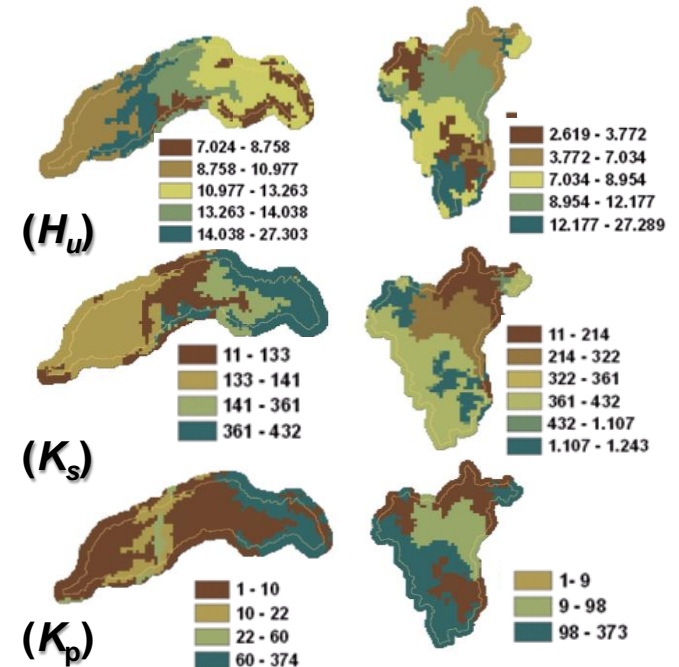
- DEM: mapa de pendientes, direcciones de flujo, y acumulación de flujo (**ArcGIS**)



# FASES INICIALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

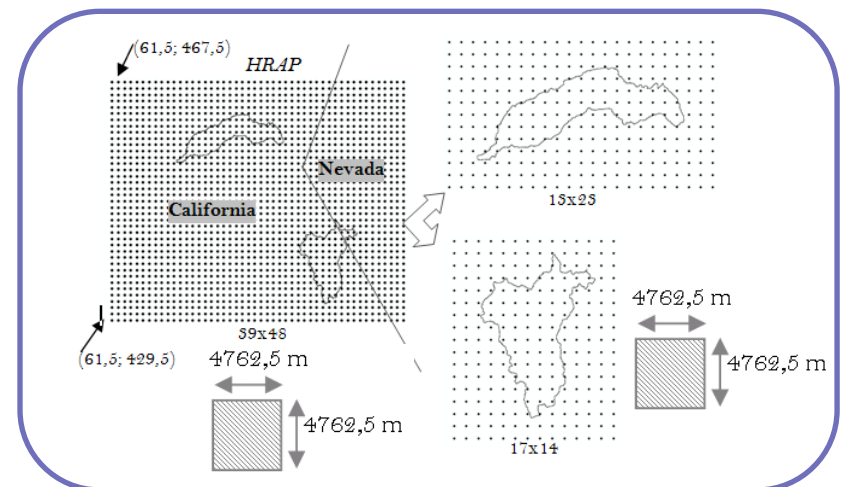
## ➤ Mapas de parámetros del modelo

- Almacenamiento estático ( $H_u$ )
- Conductividad hidráulica del suelo ( $K_s$ )
- Conductividad hidráulica del estrato rocoso ( $K_p$ )



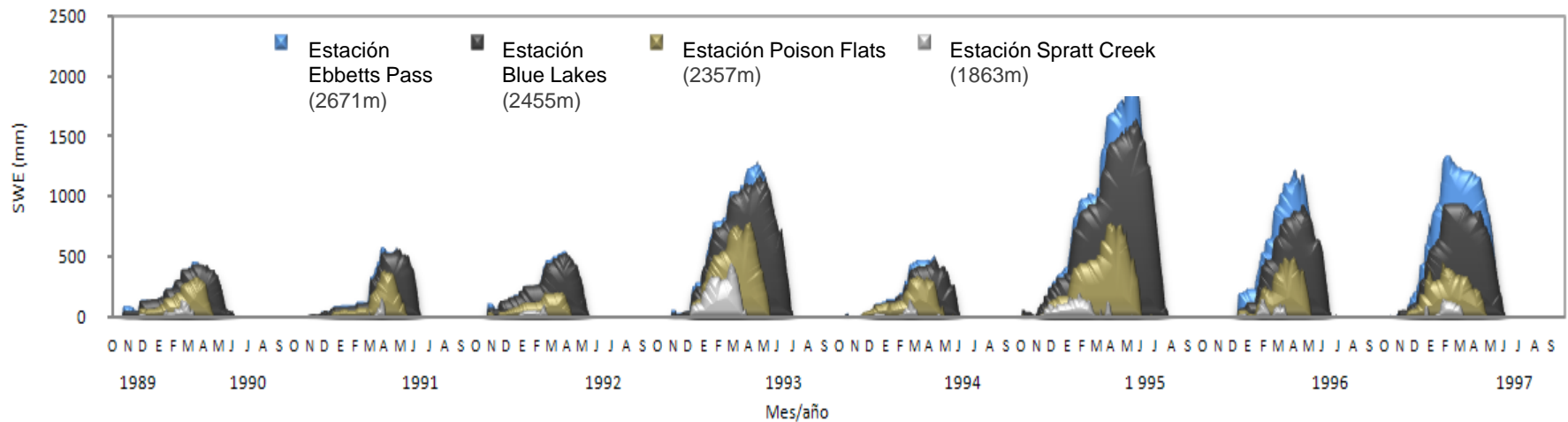
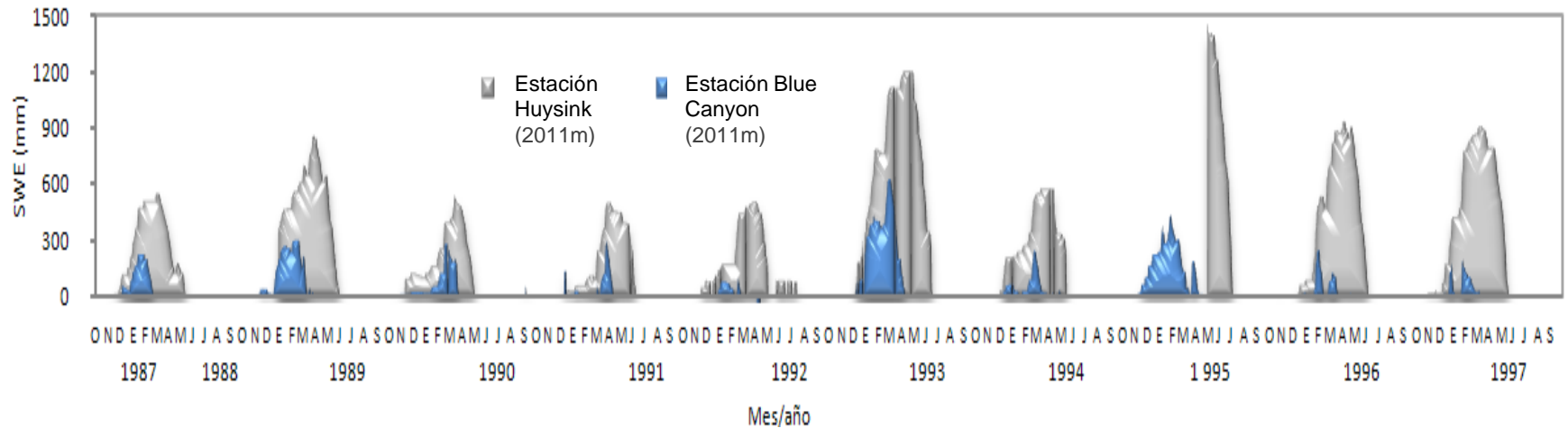
## ➤ Inputs

- Precipitación
  - 1987-2002 (horarios)
  - 140.256 *ascii*
  - 902,6 mm (*Carson*)
  - 1378 mm (*American*)
- Temperaturas
- Evapotranspiración potencial
- *SWE* (estaciones puntuales *SNOTEL*)
  - 1987-1997 (*American*)
  - 1989-1997 (*Carson*)



# FASES INICIALES DE IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

## ➤ Distribución temporal y espacial de la nieve en estaciones puntuales



# CALIBRACIÓN

## ➤ Modelo TETIS

- Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA)
- Nueve  $FC_s$  y cuatro variables de estado inicial

- Nash y Sutcliffe 
$$NSE = 1 - \sum_{t=1}^T \frac{Q_{t,sim} - Q_{t,obs}}{Q_{t,obs} - \bar{Q}}^2$$

## ➤ Propuestas por la NOAA/NWS

Parámetros	
Almacenamiento estático máximo	$H_u^* = FC_1 H_u$
Índice de cobertura vegetal	$\lambda^* = FC_2 \lambda$
Capacidad de infiltración	$k_s^* = FC_3 k_s$
Velocidad de escurrimiento superficial	$u^* = FC_4 u$
Capacidad de percolación	$K_p^* = FC_5 k_p$
Velocidad del interflujo	$k_{ss}^* = FC_6 k_s$
Capacidad de salida de flujo al acuífero	$k_{pp}^* = FC_7 k_p$
Velocidad del flujo base	$k_b^* = FC_8 k_p$
Velocidad en el cauce	$V^* = FC_9 V$

Subcuenca	Calentamiento	Calibración	Validación
Río <i>American</i>	01/oct/1987-30/sep/1988	01/oct/1988-30/sep/1997	01/oct/1997-31 /dic/2002
Río <i>Carson</i>	01/oct/1989-30/sep/1990	01/oct/1990-30/sep/1997	01/oct/1997-31/ dic/2002

### ▪ Calibración

- 01/feb/1989-31/jul/1993 (**American**)
- 01/oct/1990-31/jul/1993 (**Carson**)

### ▪ Validación

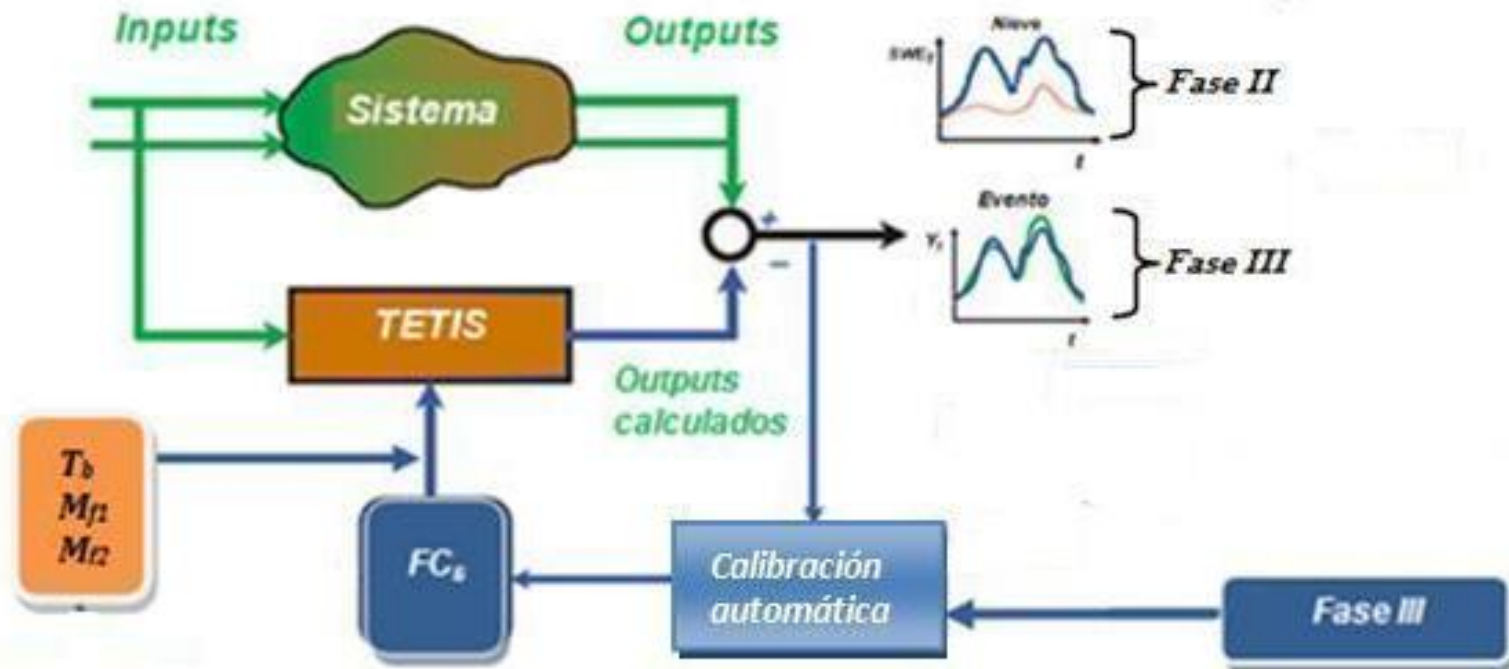
- 01/oct/1994-30/sep/1997 (**American**)
- 01/oct/1994-30/sep/1996 (**Carson**)



# CALIBRACIÓN

## ➤ Etapas de la calibración

- **Fase I**
  - $SWE=0$
- **Fase II**
  - $SWE \neq 0$
  - $M_{f1}$ ,  $M_{f2}$  y  $T_b$
- **Fase III**
  - *Tres episodios*



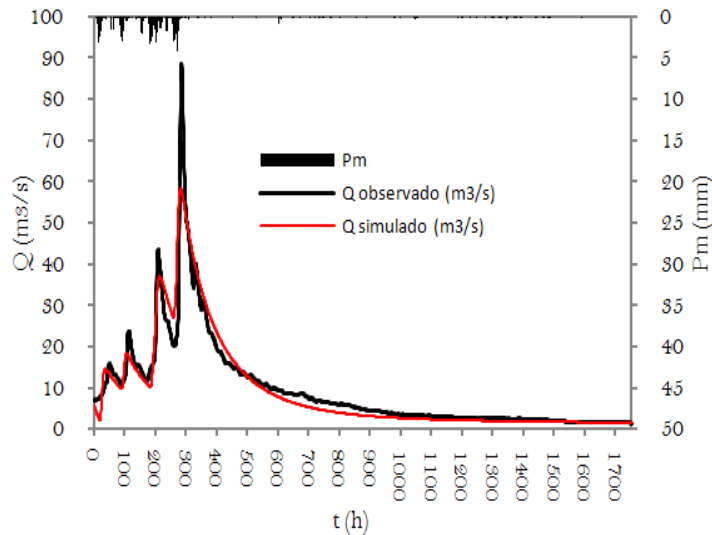
- E. *Clementine* (American)
- Episodio ( $SWE=0$ )
  - 20/may/1990-31/jul/1990
- Manual y automática
- Iteraciones *SCE-UA*
  - 950
- $NSE=0,92$

### FACTORES CORRECTORES VARIABLES DE ESTADO INICIAL

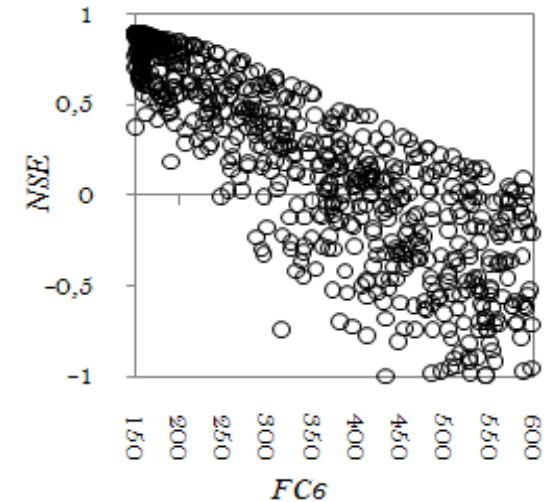
- [H1] Almacenamiento estático=92,52078
- [H2] Agua en la superficie=0,0
- [H3] Almacenamiento gravitacional=0,0
- [H4] Nivel del acuífero=78,86497

### ESTADÍSTICOS

- Caudal máximo obs. ( $m^3/s$ )=88,58
- Caudal máximo sim ( $m^3/s$ )=53,849
- Tiempo al pico observado =286,0
- Tiempo al pico simulado=284,0
- Error en tiempo al pico (%)=0,699
- Volumen observado ( $Hm^3$ )=59,471
- Volumen simulado ( $Hm^3$ )=59,541
- Error en volumen (%)=0,9227
- Índice de *Nash-Sutcliffe*=0,9227

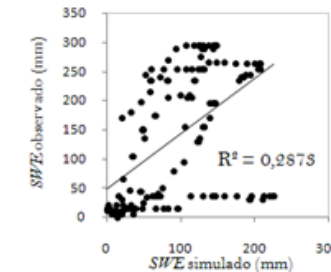
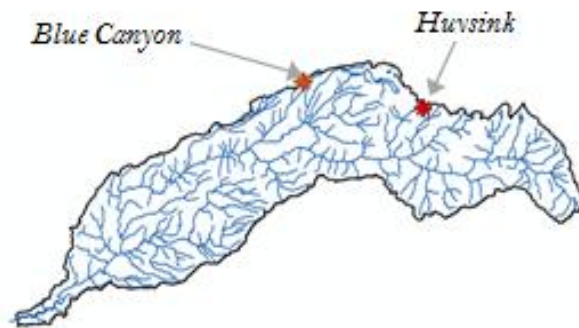


FCs	Optimo	L. inf.	L. sup.
FC1	0,71466	0,5	1,9
FC2	1,39977	0,8	1,5
FC3	0,99550	0,1	1,0
FC4	7,04116		
FC5	0,92905	0,1	1,0
FC6	246,2695	100,0	600,0
FC7	0,0		
FC8	8,07857		
FC9	0,50031	0,5	2,9
H1	92,52078	0,0	100,0
H2	0,00		
H3	0,00	0,0	3,0
H4	78,86497	0,0	100,0

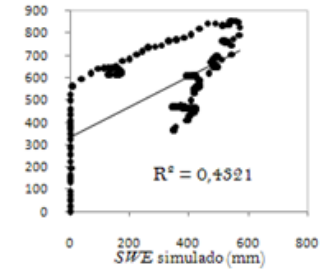


### ➤ Subcuenca del río *American*

- 01/oct/1988-30/jun/1989 (**Media**)
- 27/agos/1989-31/may/1990 (**Baja**)
- 01/nov/1992-31/jul/1993 (**Alta**)

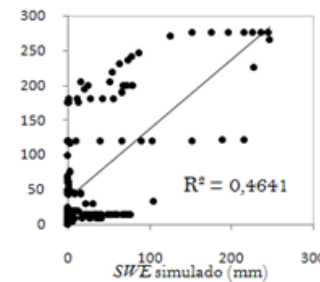


Estación SNOTEL *Blue Canyon*  
(NSE=0,6235)

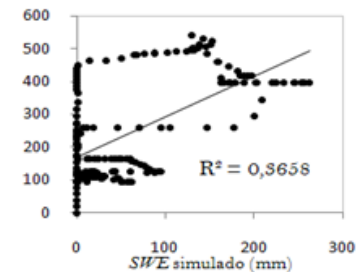


Estación SNOTEL *Huvsink*  
(NSE=0,5647)

A) 01/oct/1988-30/jun/1989 (**Media**)

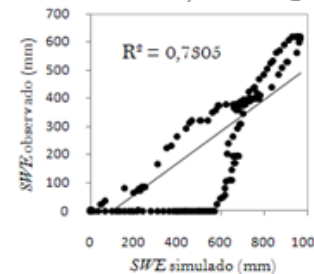


Estación SNOTEL *Blue Canyon*  
(NSE= 0,7675)

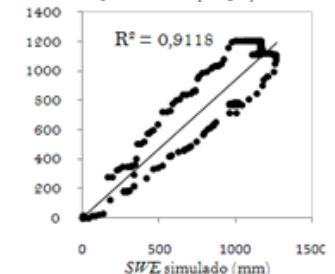


Estación SNOTEL *Huvsink*  
(NSE= -0,1759)

B) 27/agos/1989-31/may/1990 (**Baja**)



Estación SNOTEL *Blue Canyon*  
(NSE= -0,8250)



Estación SNOTEL *Huvsink*  
(NSE= 0,8629)

C) 01/nov/1992-31/jul/1993 (**Alta**)

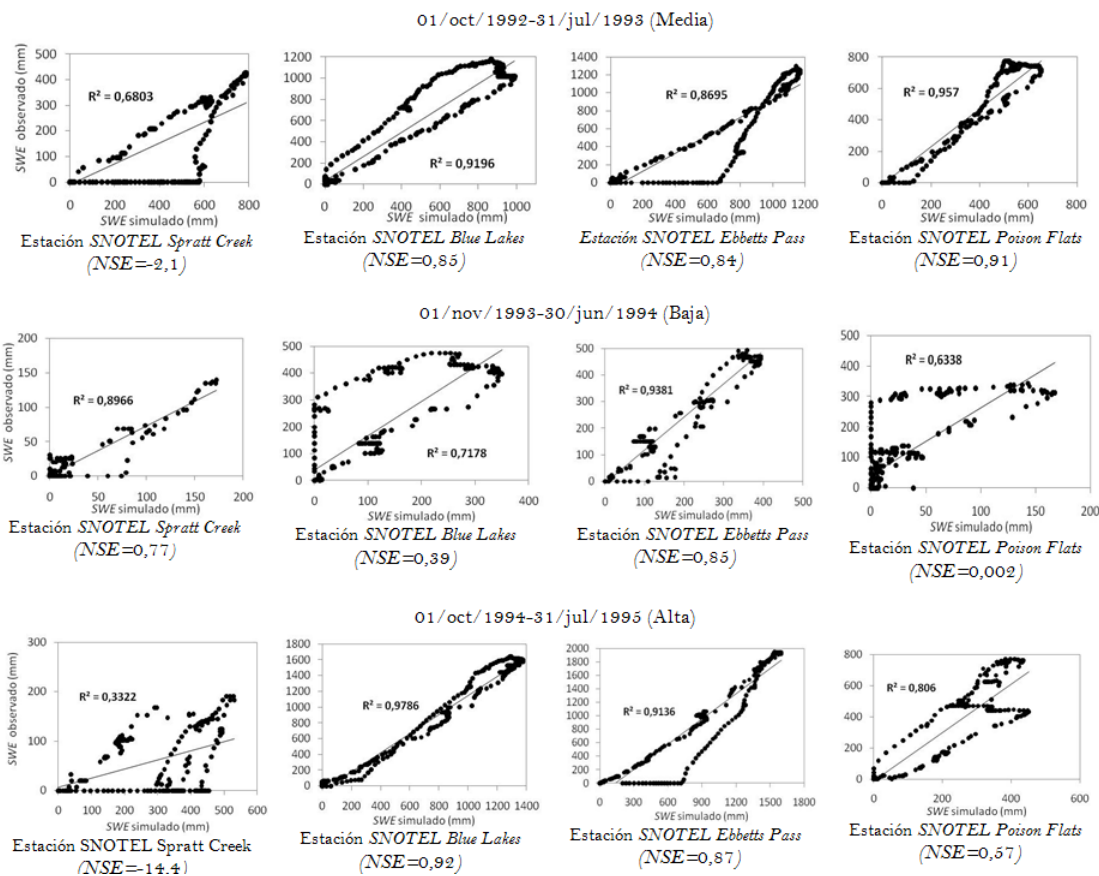
### ➤ Calibración manual

### ➤ Resultados

- $T_b = 2,8$
- $M_{f1} = 2,7$
- $M_{f2} = 5,0$
- $NSE = -0,82 ; 0,86$

## ➤ Subcuenca del río Carson

- 01/oct/1992-31/jul/1993 (Media)
- 01/nov/1993-30/jun/1994 (Baja)
- 01/oct/1994-31/jul/1995 (Alta)



## ➤ Resultados

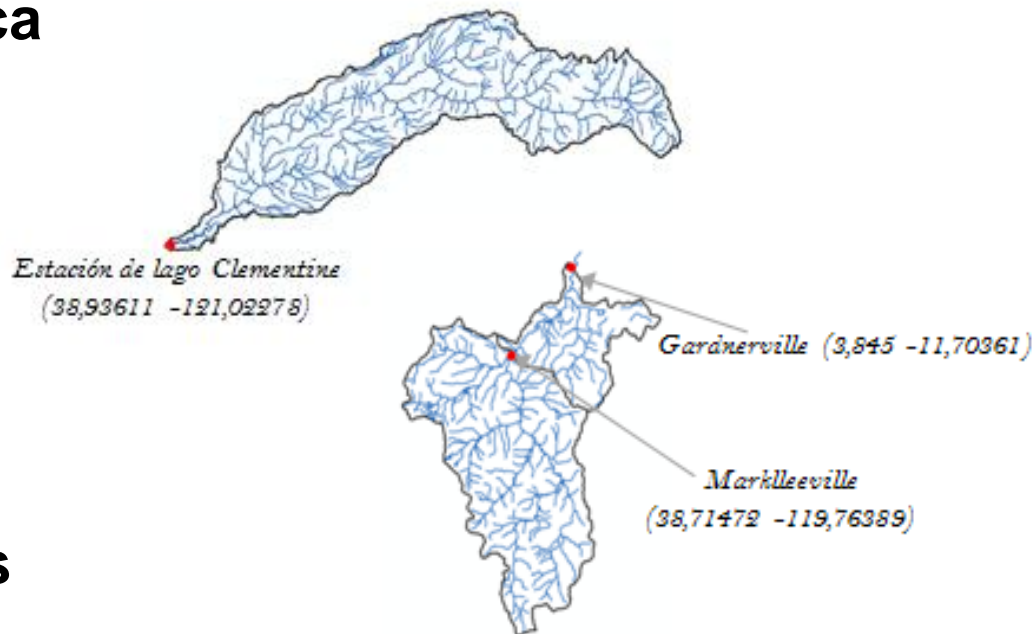
- $T_b = 2,5$
- $M_{f1} = 2,6$
- $M_{f2} = 3,8$
- $NSE = -14,4; 0,92$



## ➤ Calibración automática

## ➤ Serie de caudales

- E. *Clementine*
  - 01/10/1988-30/09/1997
- E. *Gardnerville*
  - 01/10/1990-30/09/1997

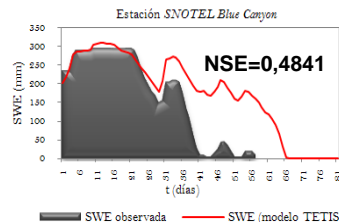
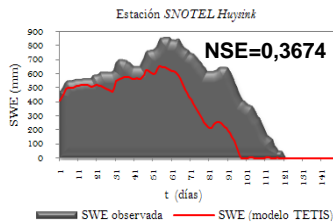
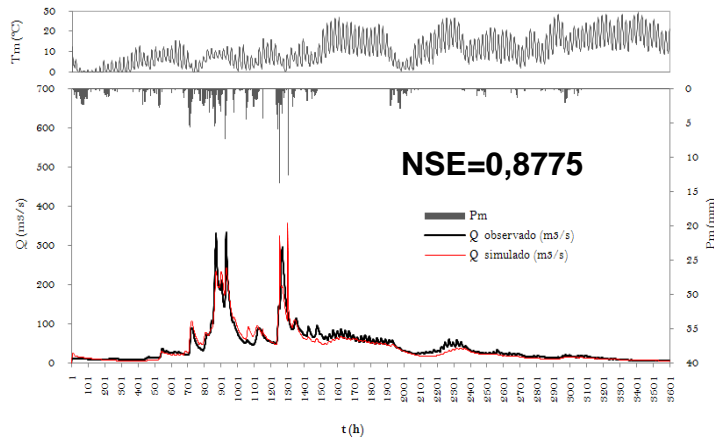


## ➤ Episodios propuestos

Subcuenca	No. Episodio	Calentamiento	Calibración
<i>American</i>	<i>Episodio I</i>	01/dic/1988-01/feb/1989	01/feb/1989-30/jun/1989
	<i>Episodio II</i>	01/nov/1990-01/feb/1991	01/feb/1991-31/jul/1991
	<i>Episodio III</i>	01/ago/1992-01/nov/1992	01/nov/1992-31/jul/1993
<i>Carson</i>	<i>Episodio I</i>	01/ago/1990-01/oct/1990	01/oct/1990-31/jul/1991
	<i>Episodio II</i>	01/ago/1991-01/oct/1991	01/oct/1991-31/jul/1992
	<i>Episodio III</i>	01/ago/1992-01/oct/1992	01/oct/1992-31/jul/1993

## Subcuenca del río American

### ➤ Episodio I (01/feb/1989-30/jun/1989)



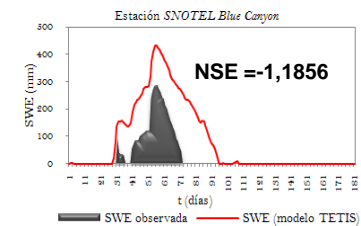
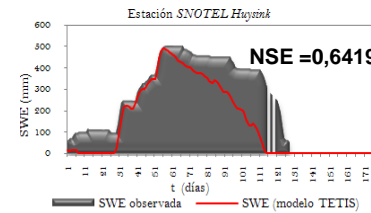
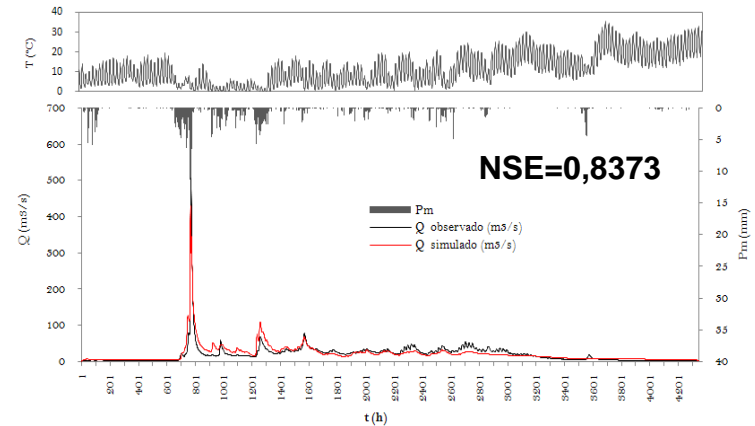
#### FACTORES CORRECTORES

- [FC1] Almacenamiento estático=1,4028
- [FC2] Evapotranspiración=1,2069
- [FC3] Infiltración=0,9995
- [FC4] Escorrentía directa=8,00
- [FC5] Percolación=0,5807
- [FC6] Interflujo=260,98
- [FC7] Pérdidas subterráneas=0,00
- [FC8] Flujo base=38,17
- [FC9] Velocidad del cauce=0,5004

#### ESTADÍSTICOS

- Caudal máximo obs. ( $m^3/s$ )=333,94
- Caudal máximo sim ( $m^3/s$ )=355,489
- RMSE=15,6710
- Tiempo al pico observado =930,00
- Tiempo al pico simulado=1300,00
- Error en tiempo al pico (%)=-39,785
- Volumen observado ( $Hm^3$ )=536,30
- Volumen simulado ( $Hm^3$ )=497,359
- Error en volumen (%)=7,261

### ➤ Episodio II (01/feb/1991-31/jul/1991)



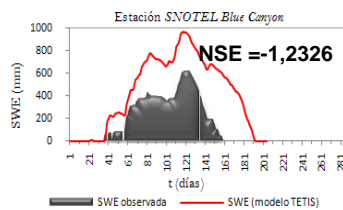
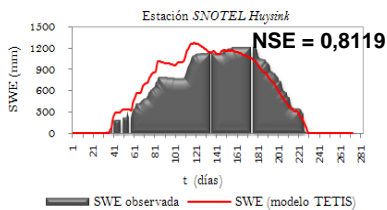
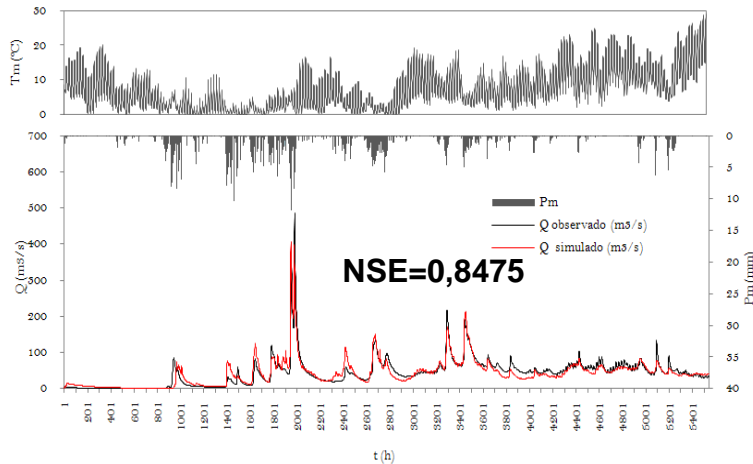
#### FACTORES CORRECTORES

- [FC1] =1,47139
- [FC2] =1,12765
- [FC3] =0,73835
- [FC4] =8,00
- [FC5] =0,90129
- [FC6] =290,81436
- [FC7] =0,00
- [FC8] =29,85390
- [FC9] =0,59553

#### ESTADÍSTICOS

- Caudal máximo obs. ( $m^3/s$ )=506,57
- Caudal máximo sim ( $m^3/s$ )=428,698
- RMSE=11,223
- Tiempo al pico observado =769,00
- Tiempo al pico simulado=767,00
- Error en tiempo al pico (%)=0,26
- Volumen observado ( $Hm^3$ )=308,26
- Volumen simulado ( $Hm^3$ )=324,719
- Error en volumen (%)=5,3400

## ➤ Episodio III (01/nov/1992-31/jul/1993)



### FACTORES CORRECTORES

- [FC1] Almacenamiento estático=1,3
- [FC2] Evapotranspiración=1,0598
- [FC3] Infiltración=0,9285
- [FC4] Escorrentía directa=5,0
- [FC5] Percolación=0,7753
- [FC6] Interflujo=305,11
- [FC7] Pérdidas subterráneas=0,0
- [FC8] Flujo base=57,17
- [FC9] Velocidad del cauce=0,5004

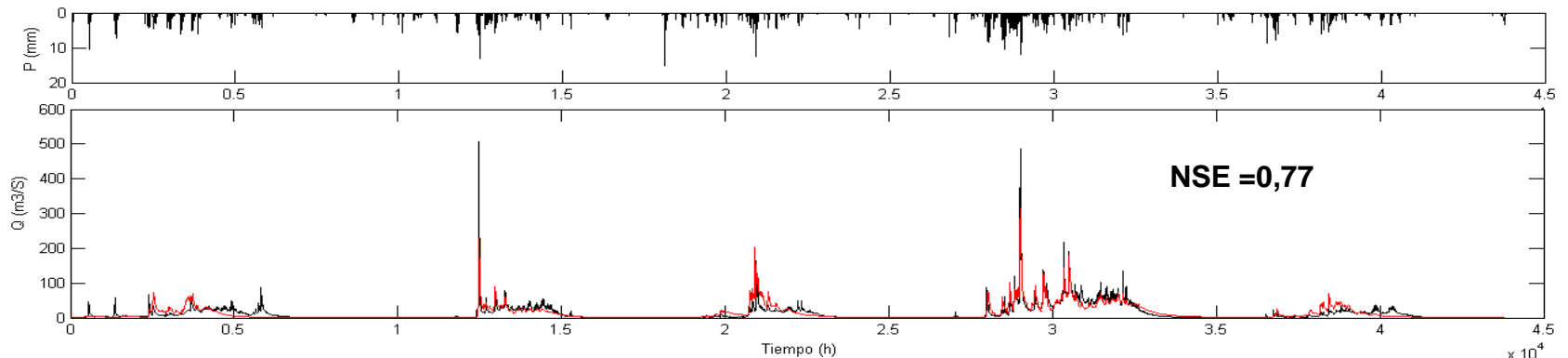
### ESTADÍSTICOS

- Caudal máximo obs. (m<sup>3</sup>/s)=486,76
- Caudal máximo sim (m<sup>3</sup>/s)=406,471
- RMSE=15,1180
- Tiempo al pico observado =1980,0
- Tiempo al pico simulado=1948,0
- Error en tiempo al pico (%)=1,6160
- Volumen observado (Hm<sup>3</sup>)=908,989
- Volumen simulado (Hm<sup>3</sup>)=913,949
- Error en volumen (%)=0,5460

## ➤ FC<sub>s</sub> resultados de las calibraciones

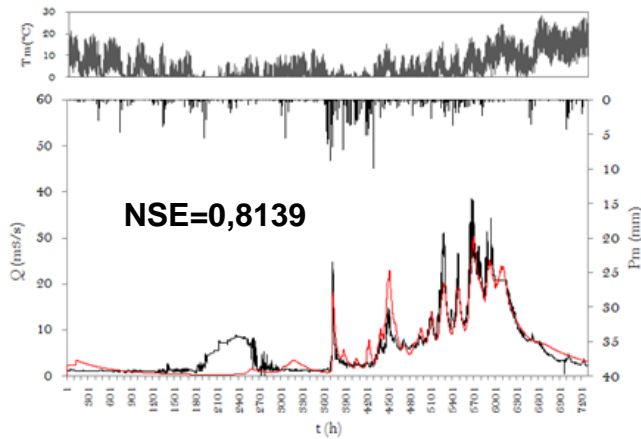
Episodio	FC <sub>1</sub>	FC <sub>2</sub>	FC <sub>3</sub>	FC <sub>4</sub>	FC <sub>5</sub>	FC <sub>6</sub>	FC <sub>7</sub>	FC <sub>8</sub>	FC <sub>9</sub>	NSE
I	1,4028	1,2069	0,9995	8,00	0,5807	260,9800	0	38,170	0,5004	<b>0,74</b>
II	1,4713	1,1276	0,7383	8,00	0,9013	290,8143	0	29,853	0,5955	<b>0,77</b>
III	1,3000	1,0598	0,9285	5,00	0,7753	305,1100	0	57,170	0,5004	<b>0,73</b>

## (01/oct/1989-30/sep/1994)

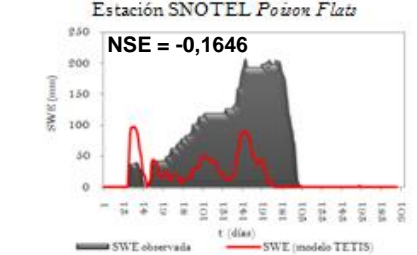
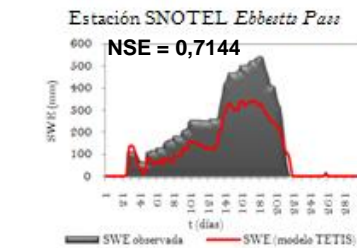
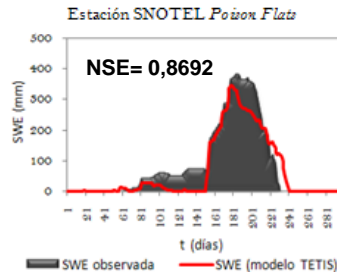
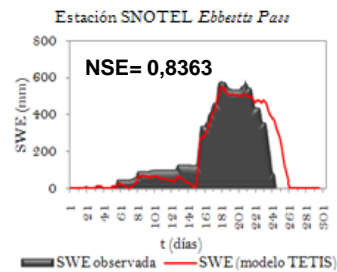
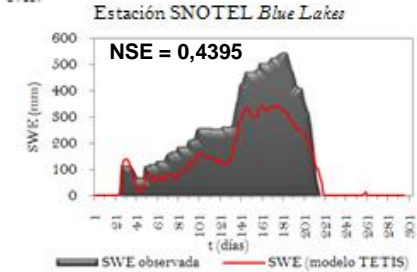
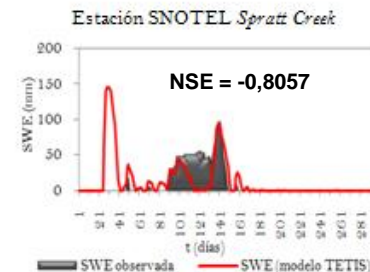
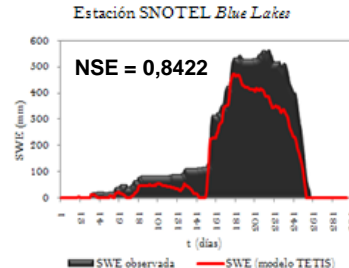
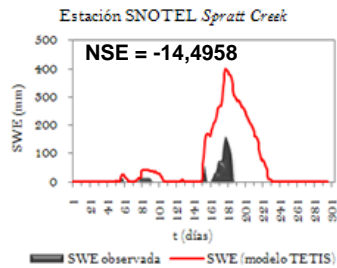
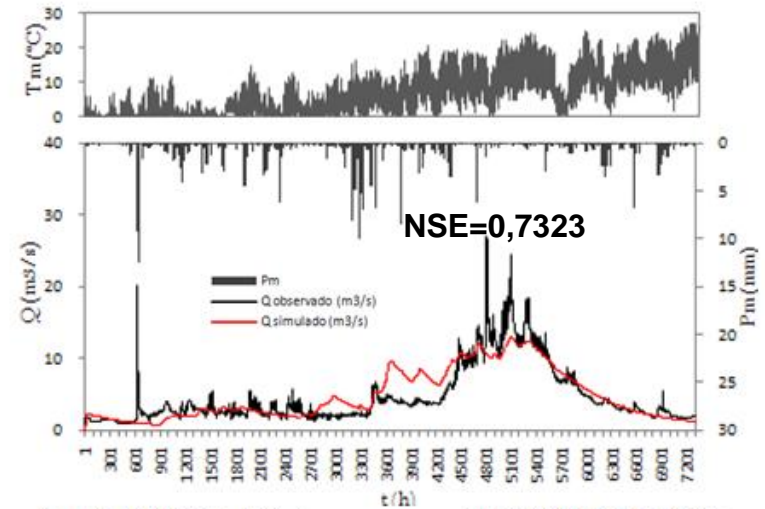


## Subcuenca del río Carson

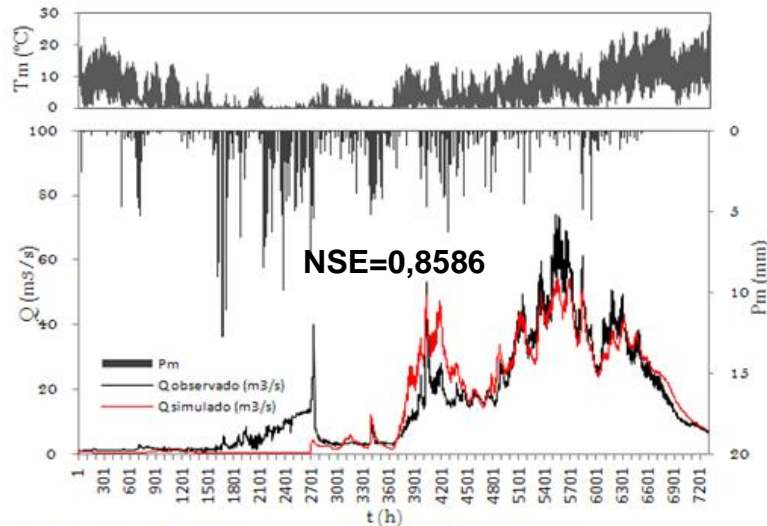
### ➤ Episodio I (01/oct/1990-31/jul/1991)



### ➤ Episodio II (01/oct/1991-31/jul/1992)



## ➤ Episodio III (01/oct/1992-31/jul/1993)



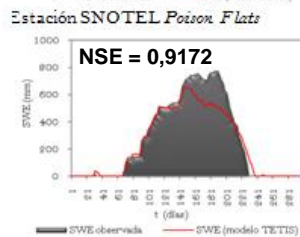
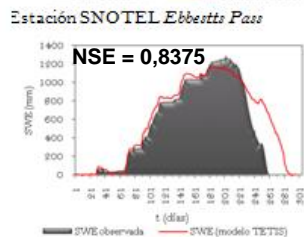
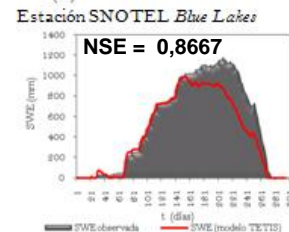
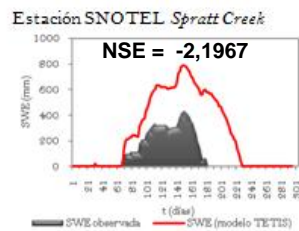
### FACTORES CORRECTORES

- [FC1] Almacenamiento estático=1,4676
- [FC2] Evapotranspiración=0,5309
- [FC3] Infiltración=0,5709
- [FC4] Escorrentía directa=8,0
- [FC5] Percolación=0,4
- [FC6] Interflujo=75,89621
- [FC7] Pérdidas subterráneas=0,2210
- [FC8] Flujo base=45,1838
- [FC9] Velocidad del cauce=1,1633

### ESTADÍSTICOS

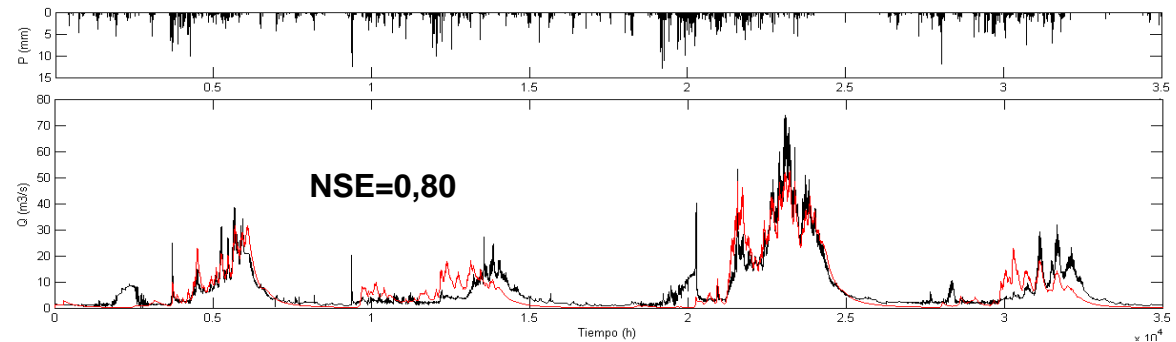
- Caudal máximo obs. (m<sup>3</sup>/s)=73,92
- Caudal máximo sim (m<sup>3</sup>/s)=54,28
- RMSE=6,04
- Tiempo al pico observado =5531,0
- Tiempo al pico simulado=5693,0
- Error en tiempo al pico (%)=-2,93
- Volumen observado (Hm<sup>3</sup>)=402,73
- Volumen simulado (Hm<sup>3</sup>)=385,65
- Error en volumen (%)=4,24

## ➤ FC<sub>s</sub> resultados de las calibraciones



Epis.	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	NSE
I	1,19626	0,60933	0,7506	13,70647	0,46503	41,3997	0,2441	22,9008	0,5549	<b>0,75</b>
II	1,49986	1,3311	0,35534	13,70647	0,7679	526,0103	0,0001	19,0384	0,5282	<b>0,56</b>
III	1,4676	0,5309	0,5709	8,0	0,4	75,8962	0,2210	45,184	1,1633	<b>0,80</b>

### (01/oct/1990-30/sep/1994)



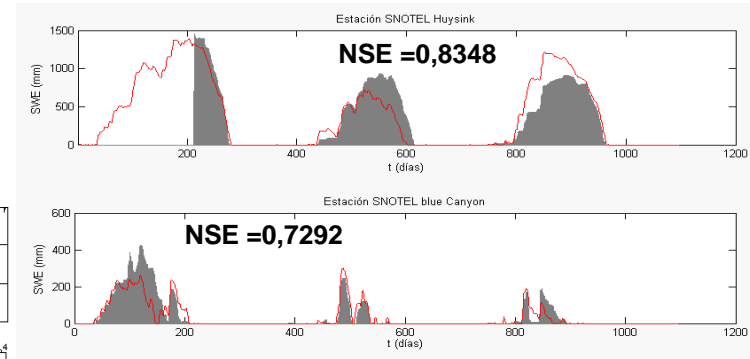
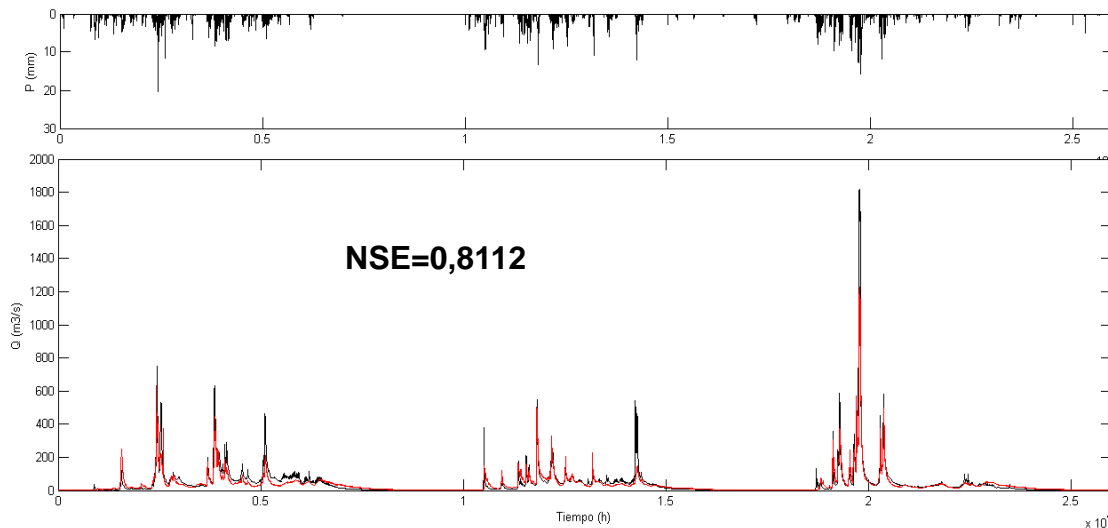
# VALIDACIÓN

## ➤ NOAA/NWS (01/oct/1997-31 /dic/2002)

Subcuenca			Validación	
	E.Aforo	Temporal	Espacio/temporal	Espacial
<i>R. American</i>	<i>E. Clementine</i>	01/oct/1994-30/sep/1997		
<i>R. Carson</i>	<i>E. Gardnerville</i>	01/oct/1994-30/sep/1996	01/oct/1994-30/sep/1996	01/oct/1990-30/sep/1994
	<i>E. Marklleeville</i>			

## ➤ Temporal

### ■ Subcuenca del río *American* (01/oct/1994-30/sep/1997)



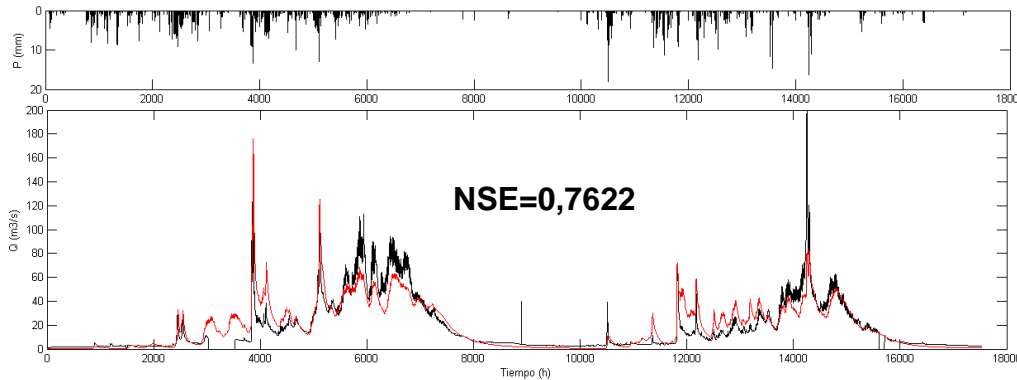
### ESTADÍSTICOS

Caudal máximo obs. ( $m^3/s$ )=1817,75  
 Caudal máximo sim. ( $m^3/s$ )=1190,21  
 RMSE=38,5  
 Tiempo al pico observado =19775  
 Tiempo al pico simulado=19792  
 Error en tiempo al pico (%)=-0,09  
 Volumen observado ( $Hm^3$ )=3831,82  
 Volumen simulado ( $Hm^3$ )=3476,87  
 Error en volumen (%)=9,2.

# VALIDACIÓN

## ➤ Temporal (01/oct/1994-30/sep/1996)

### ▪ Subcuenca del río Carson

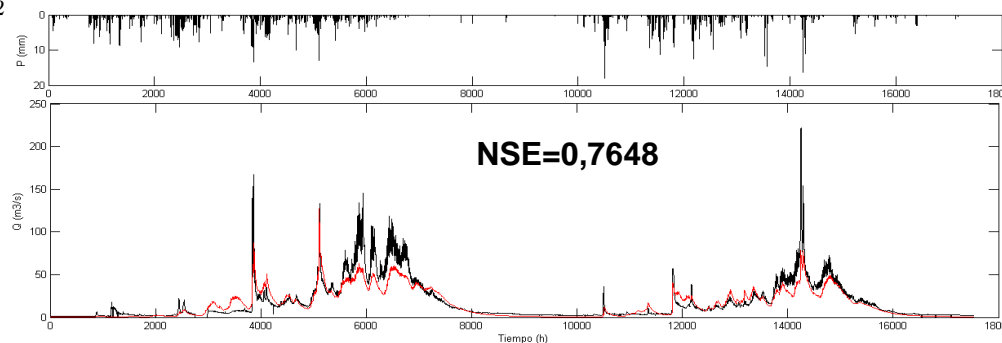


#### ESTADÍSTICOS

Caudal máximo obs. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=199,94  
 Caudal máximo sim. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=176,33  
 RMSE=10,53  
 Tiempo al pico observado =14252,0  
 Tiempo al pico simulado=3869,0  
 Error en tiempo al pico (%)=72,85  
 Volumen observado ( $\text{Hm}^3$ )=1105,32  
 Volumen simulado ( $\text{Hm}^3$ )=1147,29  
 Error en volumen (%)=-3,797

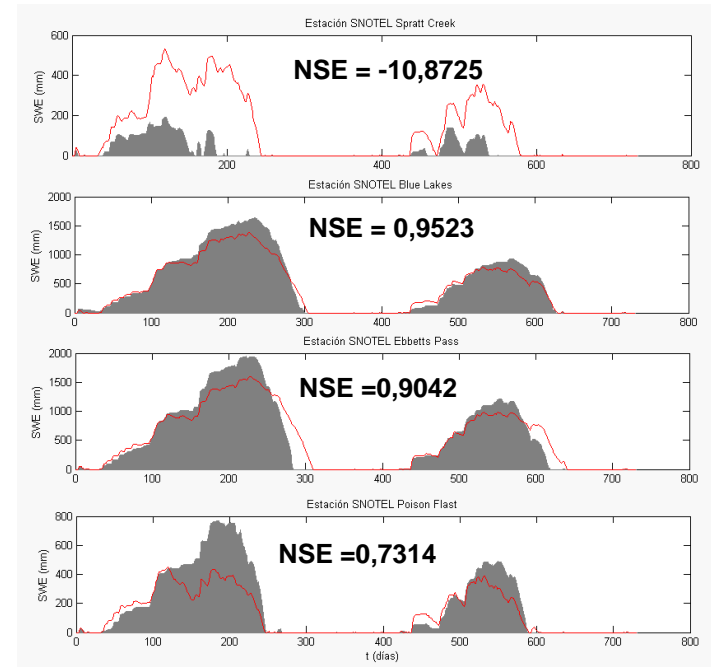
## ➤ Espacio-temporal (01/oct/1994-30/sep/1996)

### ▪ E. Marklleeville



#### ESTADÍSTICOS

Caudal máximo obs. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=221,46  
 Caudal máximo sim. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=127,03  
 RMSE=11,09  
 Tiempo al pico observado =14252,0  
 Tiempo al pico simulado=5110,0  
 Error en tiempo al pico (%)=64,15  
 Volumen observado  
 ( $\text{Hm}^3$ )=1116,47  
 Volumen simulado ( $\text{Hm}^3$ )=952,65  
 Error en volumen (%)=14,67



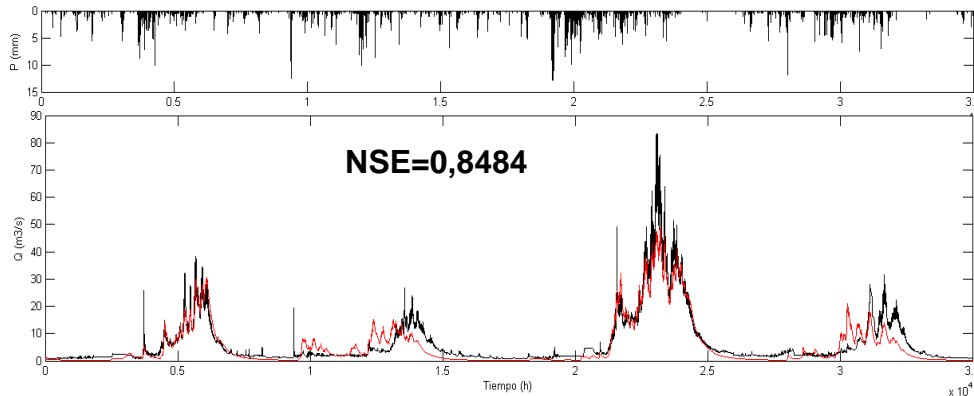
# VALIDACIÓN

## ➤ Espacial

### ▪ Subcuenca del río *Carson*

#### • *E. Marklleeville*

(01/oct/1990-30/sep/1994)



#### ESTADÍSTICOS

Caudal máximo obs. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=83,54

Caudal máximo sim. ( $\text{m}^3/\text{s}$ )=48,73

RMSE=3,78

Tiempo al pico observado =23097,0

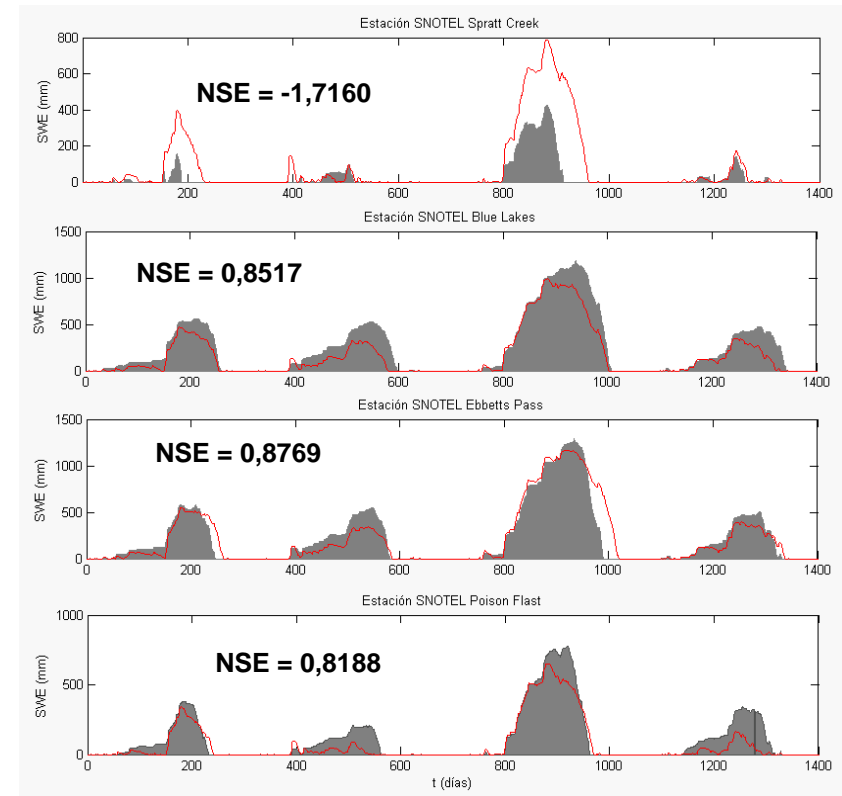
Tiempo al pico simulado=23236,0

Error en tiempo al pico (%)=0,60

Volumen observado ( $\text{Hm}^3$ )=818,42

Volumen simulado ( $\text{Hm}^3$ )=681,19

Error en volumen (%)=16,77

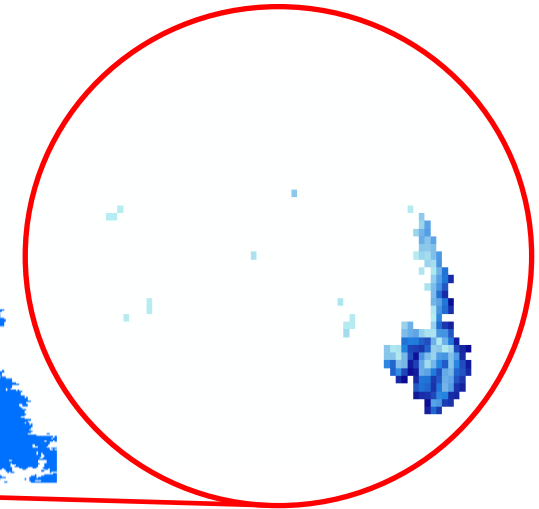
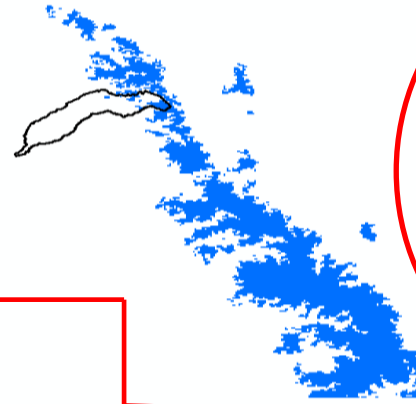




### ■ Análisis de la distribución espacial de la cubierta de nieve

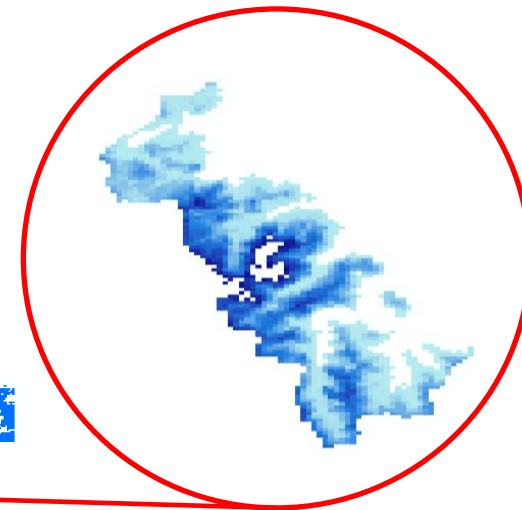
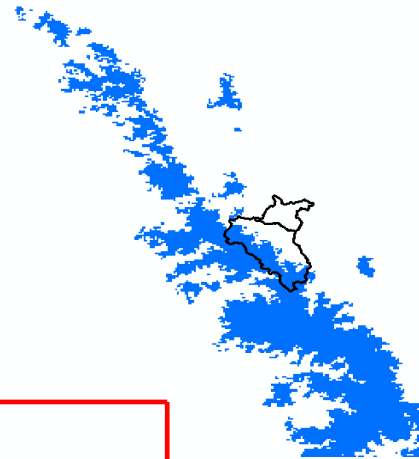
#### ➤ Subcuenca del río *American*

- 01/mayo/1994
- 7,14% (imagen NOAA/NWS)
- 3,8% (TETIS)



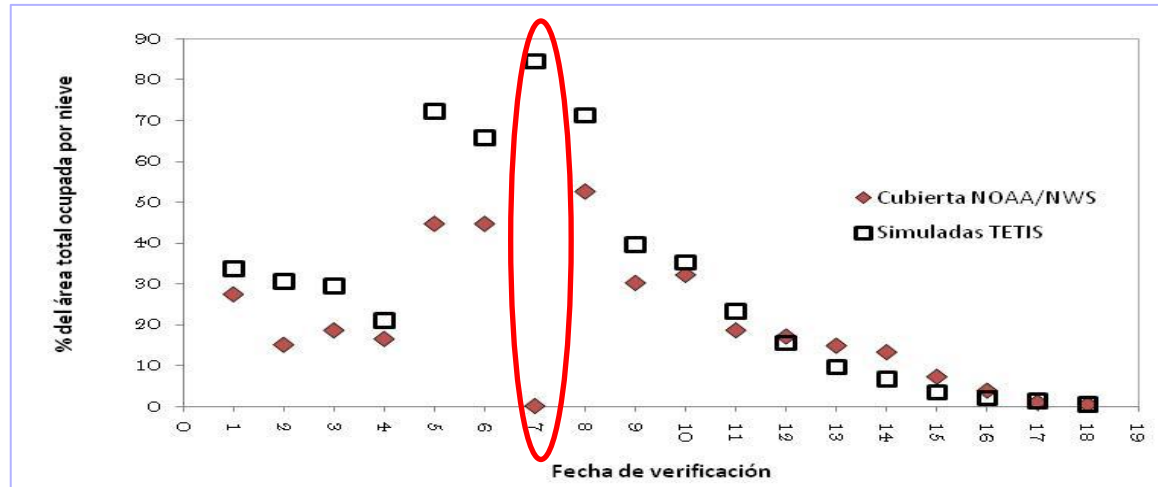
#### ➤ Subcuenca del río *Carson*

- 01/mayo/1994
- 40,6% (imagen NOAA/NWS)
- 43 % (TETIS)

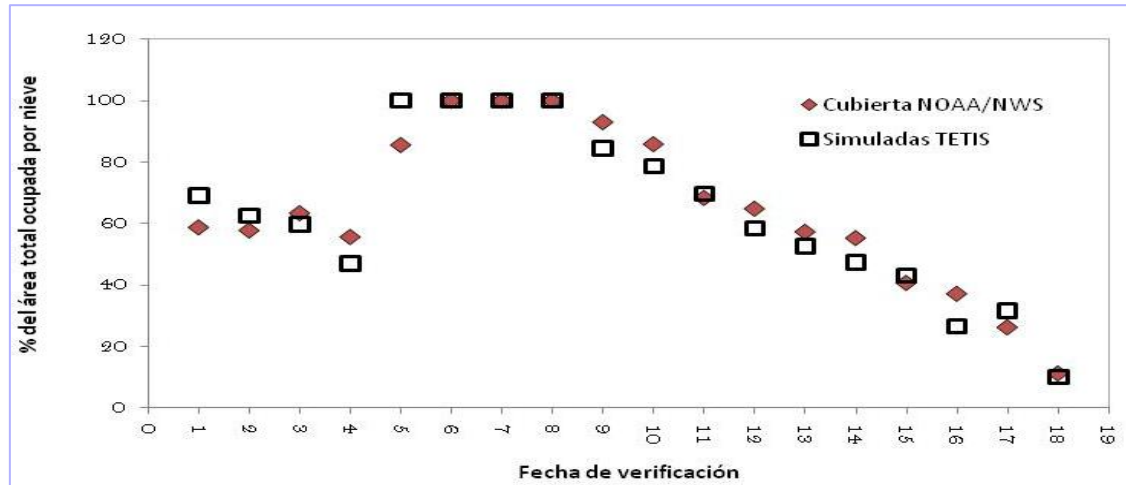


## ■ Análisis temporal de la distribución espacial de la cubierta de nieve

Subcuenca del río *American*



Subcuenca del río *Carson*



1	05-ene-94
2	10-ene-94
3	12-ene-94
4	18-ene-94
5	27-ene-94
6	12-feb-94
7	21-feb-94
8	24-feb-94
9	07-mar-94
10	12-mar-94
11	27-mar-94
12	01-abr-94
13	12-abr-94
14	15-abr-94
15	01-may-94
16	10-may-94
17	22-may-94
18	29-may-94

## CONCLUSIONES

---

- Esta metodología de calibración evitó enmascarar los resultados y por consecuencia la representación adecuada del sistema.
- Los resultados obtenidos con los modelos calibrados son excelentes.
- Los resultados que se obtuvieron en el proceso de validación para ambos casos de estudio son excelentes.
- En ambas subcuencas, se observó una baja e incluso nula aportación por escorrentía directa.

## CONCLUSIONES

---

- Los resultados obtenidos en la reproducción del proceso de fusión, son muy buenos tratándose de un submodelo tan sencillo que usa el método *grado-día* (Shamir y Georgakakos, 2006).
- En el análisis de distribución espacial y temporal de la capa de nieve realizado, se observó una buena representación de la cubierta de nieve.
- El modelo es incapaz de reproducir las variaciones diurnas del proceso de fusión.

## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

- Los resultados obtenidos, apuntan a que una distribución espacial y temporal de los parámetros de fusión (factores de fusión) a nivel de celda, mejorarían los procesos de acumulación y fusión en zonas de menor elevación donde las condiciones climáticas no son tan estables.
- Se plantea una modificación de la ecuación del método grado-día incorporando la variabilidad espacial de inputs como la radiación, albedo y los efectos de la cobertura vegetal (como lo proponen Martinec y Quervain, 1975; Brubaker et al., 1996 y Hamlin et al., 1998).

---

Gracias por su atención