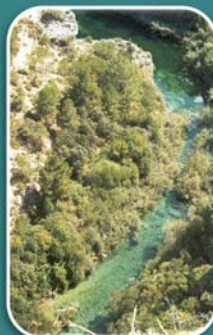


## Tesis Doctoral

# Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida

Candidata a doctor: Lia Ramos Fernández

Director: Félix Francés García



Valencia, 15 de Febrero del 2013



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación



Índice

- 1. Introducción
- 2. Estado del conocimiento
- 3. Caso de estudio
- 4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
- 5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
- 7. Conclusiones
- 8. Futuras líneas de investigación

Siendo la lluvia un componente vital del ciclo hidrológico en la tierra, es fundamental una mejor comprensión de su **variabilidad espacio temporal** => requiere datos con precisión suficiente para permitir su aplicación hidrológica

Pluviómetros

- ✓ Medición directa y puntual
- ✓ Buena estimación cuantitativa, pero pobre descripción espacial
- ✓ Error: viento, humedecimiento, evaporación, salpicaduras, nieve

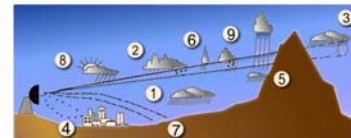
$$P_k = k(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \pm \Delta P_4 - \Delta P_5)$$

(OMM, 2011)



Radars

- ✓ Estimación indirecta
- ✓ Buena descripción espacial pero estimación cuantitativa con errores
- ✓ Error: clutters, atenuación, bloqueo del haz, banda brillante



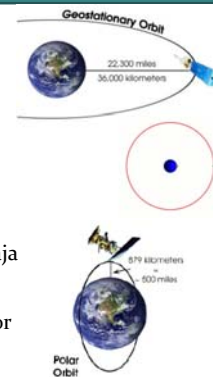
Restringido a zonas pobladas

Índice

- 1. Introducción
- 2. Estado del conocimiento
- 3. Caso de estudio
- 4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
- 5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
- 7. Conclusiones
- 8. Futuras líneas de investigación

Sensores de Satélites

- ✓ Estimación indirecta
  - Sensores de satélite que operan en longitudes de onda del IR: la lluvia se estima a partir de la radiación reflejada en el tope de la nube, con alta frecuencia de muestreo (satélite geoestacionario, altitud 36000 Km)
  - Sensores de microondas pasivos (PMW), comúnmente instalados en satélites polares de baja órbita, reflejan distribución vertical de lluvia en la nube pero tienen baja frecuencia espacio temporal
  - Técnicas mixtas: combinan mejor lluvia identificada por sensores MWP con la mayor frecuencia espacio temporal de sensores de IR



- ✓ Permite disponer datos a escala global y tiempo real
- ✓ Ajustan a la necesidad particularmente de los modelos hidrológicos distribuidos
- ✓ Información en regiones inaccesibles para otros sistemas de observación



Errores: instrumentales, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, relación no lineal entre la variable observada y lluvia, otros.

Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

- 1980 GPCP: técnicas mixta (IR, MWP, +6000 pluvió), (diaria, 1° . mensual, 2.5°)
- 1997 Satélite TRMM: baja órbita no polar concentrada en trópicos, MWP, MWA, sensor relámpagos (3h, 0.25°)
- 1999 Satélite Aqua: órbita heliosincrónica, sup terrestre misma iluminación solar (imágenes espectro misma condición). sensor MWP
- 2000 PERSIANN: IRGeo, TRMM, ajustan con GPCP, (diaria-6h, 0.25°, 2000)
- 2004 CMORPH: técnica combina MW (TRMM, Aqua, otros ), (8 km, 30')
- 2004 Satélite MSG: geoestacionarios
- 2006 Satélite Metop-A: órbita polar (800 Km)
- 2010 PERSIANN-CCS: sistema de categorización de nubes, (diaria, 3h, 0.04°, 2003)
- 2012 Satélite Metop-B
- 2013 Satélite GPM: satélite núcleo y constelación de satélites MW
- 2016 Satélite Metop-C, MTG



Avances: evaluación cuantitativa de patrones de lluvia, resolución del sensor, frecuencia de muestreo => abre nuevos horizontes en aplicaciones hidrológicas a escala global

Comunidad científica

- ❖ Evaluar error en diferentes regiones climáticas, regímenes pluviales, estaciones del año, altitud.
- ❖ Evaluar y cuantificar la incertidumbre en aplicaciones hidrológicas.

Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

Aprovechar la información de lluvia estimada de satélite en aplicaciones hidrológicas en regiones inaccesibles para otros sistemas de observación

Tareas

Revisión de estado del conocimiento

Procesado de datos hidrometeorológicos con base en tierra y satélite

Evaluar error de la lluvia:

Objetivos Específicos

- ✓ Comparación de dos productos de satélite con información de pluviómetros
- ✓ Desempeño en la modelación hidrológica distribuida
- ✓ Combinación pluviómetros + producto satélite

Discusión de resultados y extracción de conclusiones

Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

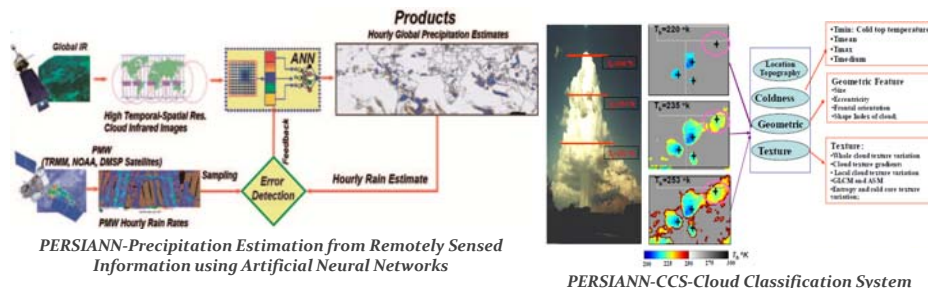
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

1. Productos de lluvia estimada de satélite PERSIANN y PERSIANN-CCS. Centro para la Hidrometeorología y Sensores Remotos de la Universidad de California en Irvine (CHRS-UCI) (Sorooshian et al, 2000; Kuo-lin et al, 2010)



2. Modelo hidrológico distribuido TETIS con parámetros físicamente basados, estructura separada del parámetro efectivo (Francés et al, 2002; Francés et al, 2007; Vélez y Francés, 2008, Vélez et al, 2009)
3. Modelo Bayesiano
  - ✓ 2004, Proy Europeo MUSIC “Multi-Sensor precipitation measurements Integration, Calibration and flood forecasting”, Universidad de Boloña (Todini, 2001; Mazzetti y Todini, 2004)
  - ✓ Técnica Bayesiana para combinar pluviómetros, radares y satélites
  - ✓ Interpolación de pluviómetros por “block kriging” (regionalizar datos pluviométricos) y combinación a través de un filtro de Kalman

Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

**Error en diferentes regiones climáticas, regímenes pluviales, condiciones superficiales, estaciones del año y altitud**

PERSIANN :

- Sudamérica, subestima zonas sin lluvia, sobrestima zonas con lluvia ligera (Goncalves et al, 2006)
- Brasil, sobrestima lluvia máxima (Sorooshian et al, 2002)
- Indonesia, sobrestima lluvia anual y subestima en verano (Vernimmen et al, 2011)
- Sudáfrica, requiere corrección local (Hughes, 2006)
- Lago Victoria, afluyente del Nilo, sobrestima 33% y 85% con TRMM y PERSIANN (Kizza et al, 2012)

PERSIANN-CCS y CMORPH

- Etiopía, topografía compleja, clima semihúmedo, subestima lluvias intensas, mejor con CMORPH. PERSIANN-CCS tiene dificultad en detectar lluvias ligeras. (Bitew y Gebremichael, 2010)

PERSIANN y PERSIANN-CCS:

- USA, verano 2009-2011, PERSIANN mejor correlación y detección de lluvia pero mayor número de falsas alarmas (Behrangi et al, 2012)

### Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

IPWG “International Precipitation Working Group” publica la validación de productos satélite en Australia, USA y Noreste de Europa (*Ebert et al, 2007*):

- Rendimiento altamente dependiente del régimen de lluvia
- IR-PMW se desempeñan casi tan bien como radar en términos de sesgo y frecuencia de lluvia diaria.
- Sobreestima en regiones cubiertas de nieve
- Subestima lluvia ligera pero sobreestima lluvias intensas; mejor rendimiento en verano y peor en invierno.
- Australia: sensores del infrarrojo, MW y combinación de ambas, rendimiento similar con lluvias intensas.

#### TRMM

- Malasia, sesgo de  $\pm 15\%$  (*Semire et al, 2012*)
- Nepal, sesgo en detección de eventos extremos (*Duncan y Biggs, 2012*)
- Filipinas, sesgo lluvia diaria y lluvias ligeras, mejor CMORPH en eventos extremos a intensidades  $> 100$  mm/d. (*Jamandre y Narisma, 2012*)
- Etiopía y Colombia, correlación baja, subestiman presencia y cantidad de lluvia debido a orografía y lluvia cálida (*Dinku et al, 2010*)
- Nilo, sobreestima en lagos, islas y costa, subestima en montaña y mejor detección de lluvia en áreas cercanas al Ecuador (*Haile et al, 2013*)

### Índice

1. Introducción

2. Estado del conocimiento

3. Caso de estudio

4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite

5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite

6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite

7. Conclusiones

8. Futuras líneas de investigación

#### USA

Río Leaf, 1949 km<sup>2</sup>, Missisipi {
 

- PERSIANN, SAC-SMA, alta incertidumbre en Q<sub>máx</sub> (*Hsu et al, 2002*)
- PERSIANN-CCS, HyMOD, amplio margen de incertidumbre en Q<sub>sim</sub> (*Moradkhani, 2006; Moradkhani y Meskele, 2010*)

Río Mimbres, 477 km<sup>2</sup> {
 

- PERSIANN, SWAT, E de 0.19 en calibración (*El-Sadek et al, 2011*)

Río Colorado, 4 cuencas de 35 a 350 km<sup>2</sup> {
 

- PERSIANN, tRIBS, subestima lluvia, pobre Q<sub>sim</sub>
- Para satisfacer subestimación de volumen de lluvia, el modelo disminuye la evapotranspiración en balance hídrico (*Moreno et al, 2012*)

#### Sudamérica

Río La Plata, 3.2x10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, PERSIANN {
 

- Subestima lluvia media y sobrestima áreas de lluvia
- Modelo VIC, río Iguazú (70000 km<sup>2</sup>), disminuye efecto del error de PERSIANN en la localización para lluvias convectivas  $> 30$  mm/d (*Demaria et al, 2011*)

Río Negro, 712000 km<sup>2</sup>, Amazonas, GPCP y TMPA {
 

- TMPA mayor correlación y probabilidad de detección
- Modelo MGB-IPH, E de -0.24 a 0.79 y -0.38 a 0.61 para GPCP y TMPA (*Getirana et al, 2011*)

### Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

### África

Río Senegal,  
350000 km<sup>2</sup>

- TAMSAT-CCD, **MIKE SHE**, error en balance hídrico en calibración y validación (*Stisen et al, 2008*)
- CMORPH, TRMM, PERSIANN y específicos para África (CPC-FEWS y TAMSAT-CCD), **MIKE SHE**, menor sesgo con CPC-FEWS y TAMSAT-CCD seguido de TRMM (*Stisen y Sandholt, 2010*)

Río Gilgel Abay,  
1656 km<sup>2</sup> y Koga,  
299 km<sup>2</sup>; Etiopía

- PERSIANN, **SWAT** y **MIKE SHE**, pobre rendimiento de Qsim, peor con Gilgel (*Bitew y Gebremichael, 2011*)

Río Veneto, 1200 km<sup>2</sup>, Italia

- TRMM, KIDD (25 y 4 km, a 0.5 horas), calibra **tRIBS**, evalúa la propagación error de lluvia a Qsim a diferentes escalas de cuenca (entre 100 y 1200 km<sup>2</sup>)
- Subestima lluvia areal, error lluvia resultó en un Qsim con error del mismo orden de magnitud
- Rendimiento con mejor resolución (KIDD-4 km) tiene mayor rendimiento que con peor resolución (KIDD-25 km, TRMM-0.25°) (*Nikolopoulos et al, 2010*)

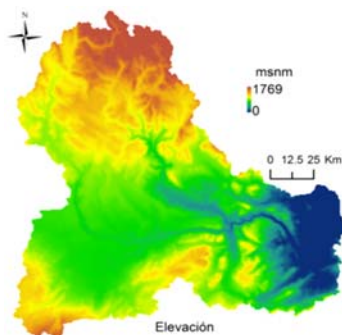
Río Yangtze, 1550 km<sup>2</sup>, China

- TRMM, **WATLAC**, subestima lluvia. Qsim con calibración del modelo obtiene E de 0.71 y 0.86 a escala diaria y mensual (*Li et al, 2012b*)

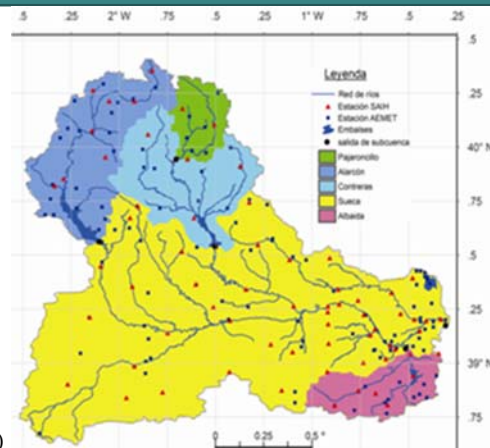
### Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

• Área de 21500 km<sup>2</sup>



cadenas de montañas del sistema Ibérico, meseta continental y llanura costera (plataforma aluvial)



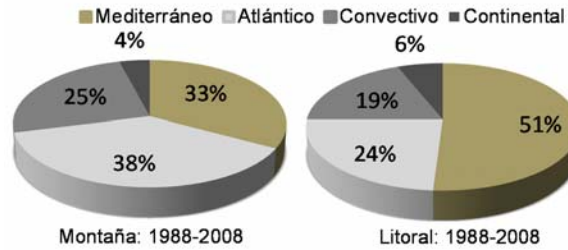
- Uso intenso: riego, abastecimiento agua potable, embalses, pesca fluvial y deportiva, turismo. Además bombeos masivos (acuífero la Mancha Oriental, *Gil, 2006*) -> intensifica competencia por el recurso hídrico
- Uso suelo: bosques, área natural (>50%), agrícola secano (36%), agrícola cultivada (10%) (*CHJ, 2007*)
- 54% presencia exclusiva rocas carbonatadas, 45% rocas carbonatas con materiales de carácter sedimentario o evaporítico (*Robles et al., 2002*)

Índice

1. Introducció
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterizaci3n del error de la lluvia estimada de sat3lite
5. Modelaci3n hidrol3gica con la lluvia estimada de sat3lite
6. Combinaci3n de pluvi3metros y lluvia estimada de sat3lite
7. Conclusiones
8. Futuras l3neas de investigaci3n

- Clima mediterr3neo con marcado contraste entre 3poca m3s h3meda (primavera y otoño) y la m3s seca y calurosa (verano) (Robles et al., 2002)

- **Lluvia anual** → proceso meteorol3gico que las origina (Mir3 et al. 2009)

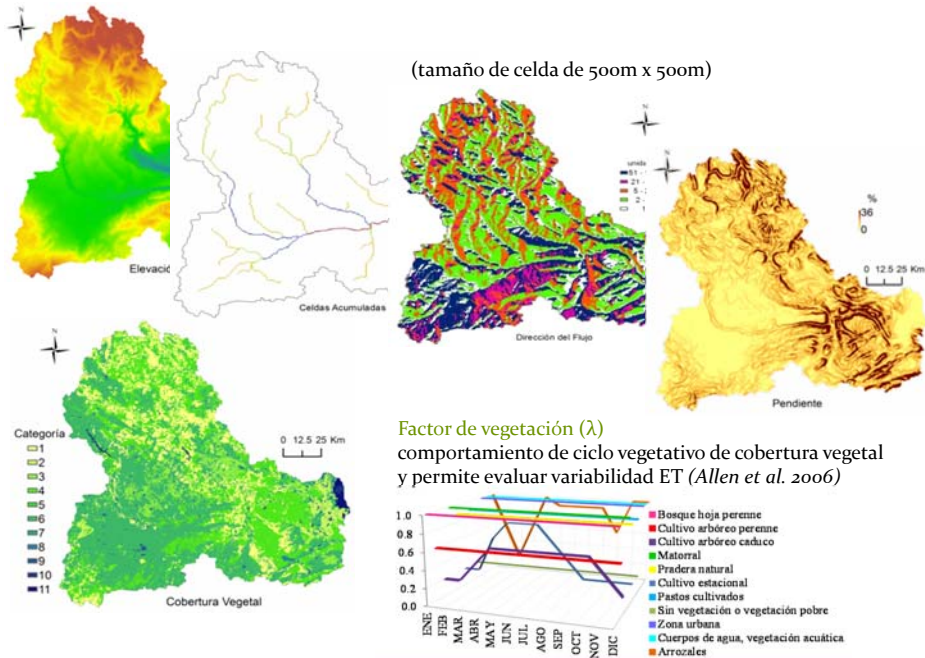


influenciadas por clima y orograf3a, destaca efecto del sistema Ib3rico y altas temperaturas que inducen mayor evapotranspiraci3n (Quereda et al., 2011; Lorenzo-Lacruz et al., 2012).

Índice

1. Introducció
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterizaci3n del error de la lluvia estimada de sat3lite
5. Modelaci3n hidrol3gica con la lluvia estimada de sat3lite
6. Combinaci3n de pluvi3metros y lluvia estimada de sat3lite
7. Conclusiones
8. Futuras l3neas de investigaci3n

Cartograf3a



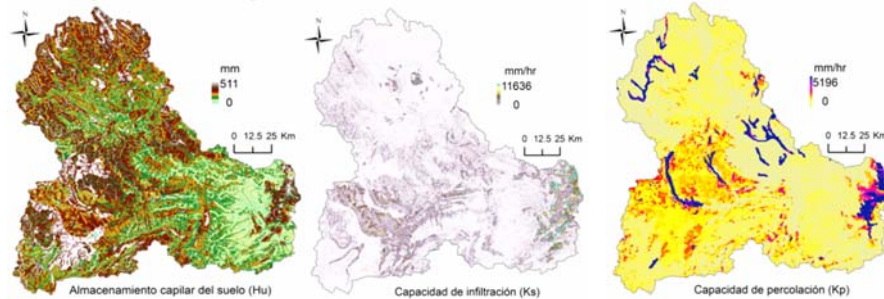
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Parámetros

- Hidrológicos: Hu, Ks, Kp (DIHMA, 2002)

(tamaño de celda de 500m x 500m)



- Geomorfológicos: caracterizan geometría y resistencia al flujo en la red de cauces

Río Tajo (DIHMA, 2001), semejanza de zonas geomorfológicas

Relaciones geomorfológicas de tipo potencial	Y = Coeficiente X <sup>Exponente</sup>	Coeficiente	Exponente
Área acumulada (A) y flujo a sección llena (Qb)	$A = \kappa Q_b^\phi$	1.2968	0.7571
Ancho de sección transversal llena (wb) y flujo a sección llena (Qb)	$w_b = \alpha Q_b^{\alpha 1}$	3.1301	0.5088
Ancho de sección transversal (w) y flujo (Q)	$w = Q^{\alpha 2}$		0.3253
Diámetro del sedimento (d), pendiente (So) y profundidad del flujo (y)	$d = C\alpha (y s\alpha)^\theta$	6.5156	0.6548
Coefficiente de rugosidad (n) y diámetro del sedimento (d)	$n = C\alpha d^\xi$	0.047	0.1667

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Lluvia

Variable	Fuente	Archivo	Resolución Temporal	Sistema de Coordenadas	Hora
Lluvia, caudal y volumen en embalses	SAIH	ASCII	Cinco minutal	UTM Zona 30N	Local
Lluvia	AEMET	CSV	Diario	WGS 1984	GMT 07-07 del día siguiente

- ✓ 186 estaciones pluviómetros (115 AEMET, 71 SAIH)
- ✓ cuenca de 21,500 km<sup>2</sup>: densidad 1 pluviómetro/ 116 km<sup>2</sup>
- ✓ (densidad costa: 1 pluviómetro/ 46 km<sup>2</sup>)

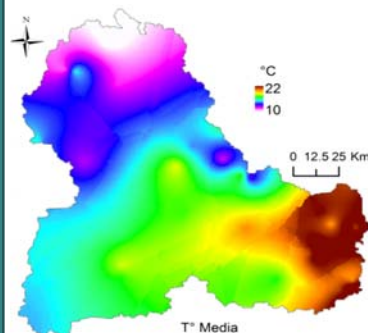


AEMET



SAIH

Temperatura



Fuente	Archivo	Resolución Temporal	Sistema de Coordenadas	Hora
AEMET	CSV	Diario	WGS 1984	GMT 08-08 del día anterior hasta la fecha marcada

- ✓ 47 estaciones termométricas AEMET
- ✓ T° diaria máx, mín
- ✓ Series diarias: 01 Mar 2000-31 Oct 2009



Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Evapotranspiración

Hargreaves (Allen et al. 2006)

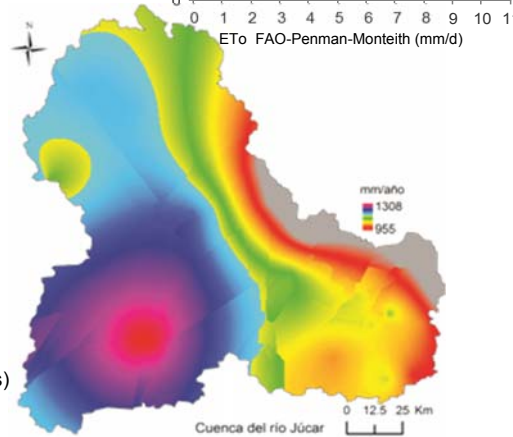
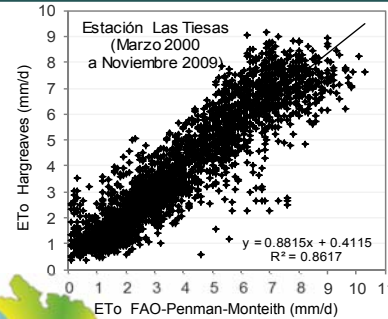
$$ET_o = C(t_{med} + 17.78)R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

R<sub>o</sub> – rad solar extraterrestre (mes, latitud- tablas)

C -> FAO-Penman-Monteith

Estación	Provincia	Calibración	
		R <sup>2</sup>	Constante (C)
Las Tiesas	Albacete	0.86	0.0023679
Requena Cerrito	Valencia	0.90	0.0020617
Bolbaite	Valencia	0.89	0.0020366
Villanueva-Castellón	Valencia	0.88	0.0020617

Series diarias  
01 Mar 2000-31 Oct 2009  
(47 estaciones termométricas)

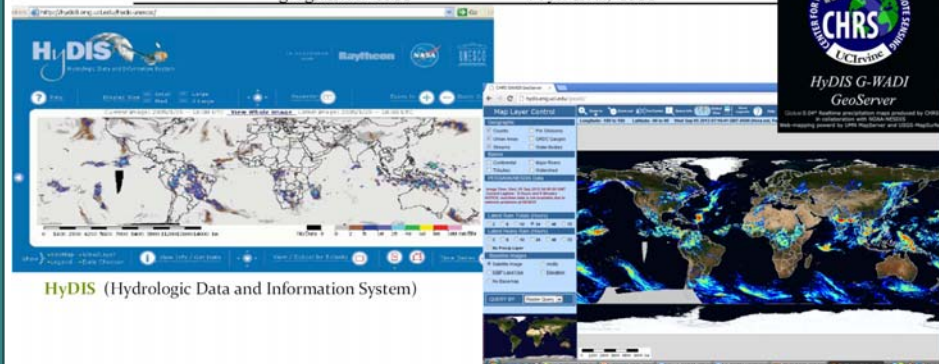


Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Centro para la Hidrometeorología y Sensores Remotos de la Universidad de California en Irvine (CHRS-UCI)

	PERSIANN	PERSIANN-CCS
Escala espacial	0.25° (aprox. 28 km)	0.04° (aprox. 4 km)
Escala temporal	6 h, diario	diario
Unidades	mm/d	mm/d
Disponible desde	01/03/2000	01/01/2003
Fuente	Web HyDIS	CHRS-Universidad de California en Irvine
Cobertura espacial	50° S - 50° N, 0-360° longitud	60° S - 60° N, 0-360° longitud
Geometría	400 filas x 1440 columnas	3000 filas x 9000 columnas
Formato original	GRID ASCII en coordenadas geográficas. GMT	Binario big endian, row centric, 4 byte float. GMT

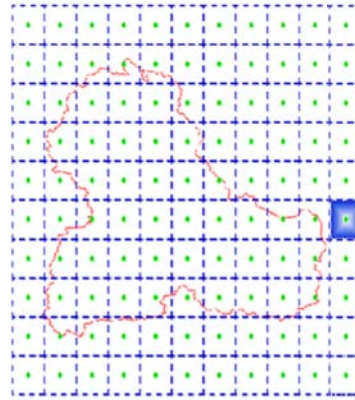


HyDIS G-WADI (Water and Development Information for Arid Lands – A Global Network)

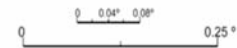
## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

**PERSIANN**  
 Header File: n cols 11  
 n rows 10  
 xllcorner -2.6250°  
 yllcorner 36.875°  
 cell size 0.25°



**Legenda**  
 ● Centroides del grid PERSIANN  
 ● Centroides del grid PERSIANN-CCS  
 [Grid PERSIANN]  
 [Grid PERSIANN-CCS]  
 [Divisoria de aguas]



Formato binario a GRID ASCII y recortar a tamaño de cuenca

**PERSIANN-CCS**  
 Header File: n cols 74  
 n rows 62  
 xllcorner -3.24°  
 yllcorner 38.38°  
 cell size 0.04°

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Enfoque: comparación de los productos de satélite con una “lluvia de referencia” (pluviómetros)

• **Lluvia distribuida:**

- ✓ Coeficiente de correlación de Pearson y Kendall (grado de dependencia) (Hirsh et al., 1992)  $r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$   $\tau = \frac{S}{n(n-1)/2}$
- ✓ Técnicas gráficas (diagrama de dispersión, “box plot” y mapas)

• **Lluvia agregada:**

- ✓ Estadísticos de detección:

	Referencia en tierra		
	si	no	
Estimación de satélite	si	a (acierto)	b (falsa alarma)
	no	c (pérdida)	d (no evento)
		si = lluvia ≥ umbral	a+b+c+d=1
		si = lluvia < umbral	

Estadísticos	Ecuación	Rango	Óptimo
Probabilidad de detección	$POD = \frac{a}{a+c}$	0 - 1	1
Ratio de falsas alarmas	$FAR = \frac{b}{a+b}$	0 - 1	0
Índice de éxito crítico	$CSI = \frac{a}{a+b+c}$	0 - 1	1
Porcentaje de estimaciones correctas	$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d}$	0 - 1	1
Puntuación de habilidad Heidke	$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)}$	-∞ - 1	1
Índice de frecuencia del sesgo	$FBIAS = \frac{a+b}{a+c}$	0 - ∞	1

“Working Group on Numerical Experimentation del World Weather Research Programme”

### Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

#### ..... Lluvia agregada:

- ✓ Curva doble masa
- ✓ Índices de eficiencia: Nash–Sutcliffe (E), índice RSR, error en volumen (Ev)
- ✓ Técnicas gráficas (diagrama de dispersión y “box plot”)

Nash–Sutcliffe ó puntuación de habilidad “skill score”

$$E = 1 - \frac{MSE^{sim}}{MSE^{obs}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{promedio})^2}$$

$$RSR = \sqrt{1 - E}$$

Moriasi et al. (2007) E y RSR criterios en modelación hidrológica

Ratio de la raíz del RMSE y desviación estándar de observ

$$RSR = \frac{RMSE^{sim}}{STDEV^{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y^{promedio})^2}}$$

$$Ev = \frac{V^{obs} - V^{sim}}{V^{sim}} * 100$$

### Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- Periodo diario: 01 Enero 2003 al 31 Octubre 2009 (2496 días)
- Satélite: reprojectó con el método del vecino más cercano (Ebert, 2007), a proyección UTM (Zona 30N, datum WGS-84) y celda de 3484 m
- Pluviómetros: interpolar IDW (Jiang et al, 2012; Kizza et al, 2012; Tang y Hossain, 2012) -> campos de lluvia
- Lluvia distribuida: automatizar MATLAB y ArcGIS-Toolbox
- Lluvia areal: interpoló IDW como output del modelo TETIS a diferentes escalas de agregación de cuenca

**T1:** comparar lluvia PERSIANN con lluvia de pluviómetros

**T2:** comparar lluvia PERSIANN-CCS con pluviómetros

Notación	Lluvia	Resolución espacial
So	Pluviómetros	valor puntual
S1	PERSIANN	0.025°
S2	PERSIANN-CCS	0.04°

Notación	Escala de agregación de cuenca (km <sup>2</sup> )	Rango de altitud (msnm)	Nombre
E1	861	1009 – 1726	Pajaroncillo
E2	1,301	40 – 600	Albaida
E3	2,883	799 – 1726	Alarcón
E4	3,427	630 – 1726	Contreras
E5	21,500	0 - 1726	Sueca

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

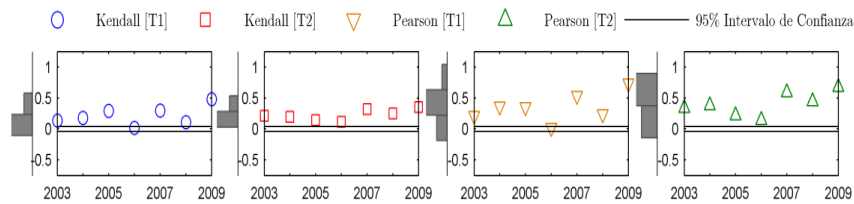
Correlación anual entre productos de satélite y pluviómetros

2003 - 2009

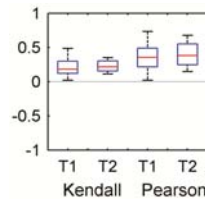
1811 celdas en la cuenca:

- ✓ t-Student -> Pearson
- ✓ "suma de orden" -> Kendall (Hirsh et al., 1992)

Series temporales



Boxplot

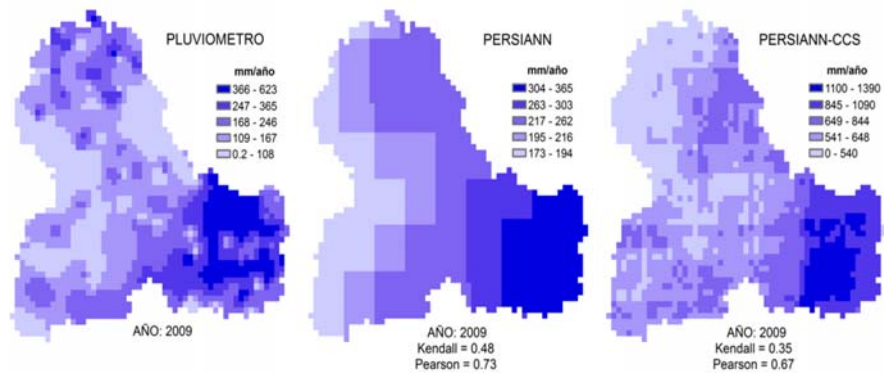


mediana: línea roja  
cuartiles 25% y 75%: caja  
máximo y mínimo : línea de color negro

- Valores más altos de Pearson se ven influenciados por lluvias máximas y mínimas en algunas zonas de la cuenca. En cambio, Kendall resiste efecto de los valores extremos (Hirsh, 1992).

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación



- Zona costera: subestiman 28%/S1, sobreestiman 15%/S2
- Zona montañosa: subestiman 42 y 14% con S1 y S2

- ✓ Montañas con radiación muy variable que dificultan detección de satélites con MWP (Levizzani, 2008)
- ✓ TRMM y CMORPH: subestimación en zonas de montaña de cuenca del río Nilo (Haile et al, 2013)

Índice

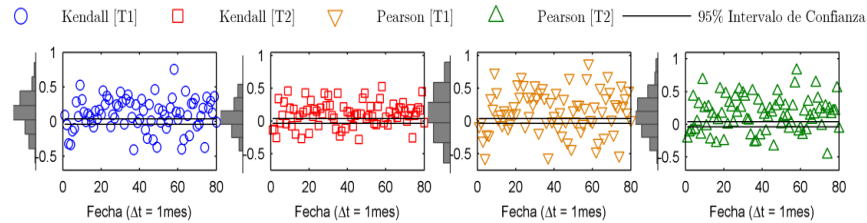
1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Correlación mensual entre productos de satélite y pluviómetros

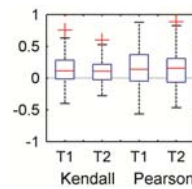
Enero 2003 a Octubre 2009

1811 celdas en la cuenca:  
 ✓ t-Student -> Pearson  
 ✓ "suma de orden" -> Kendall  
 (Hirsh et al., 1992)

Series temporales



Boxplot



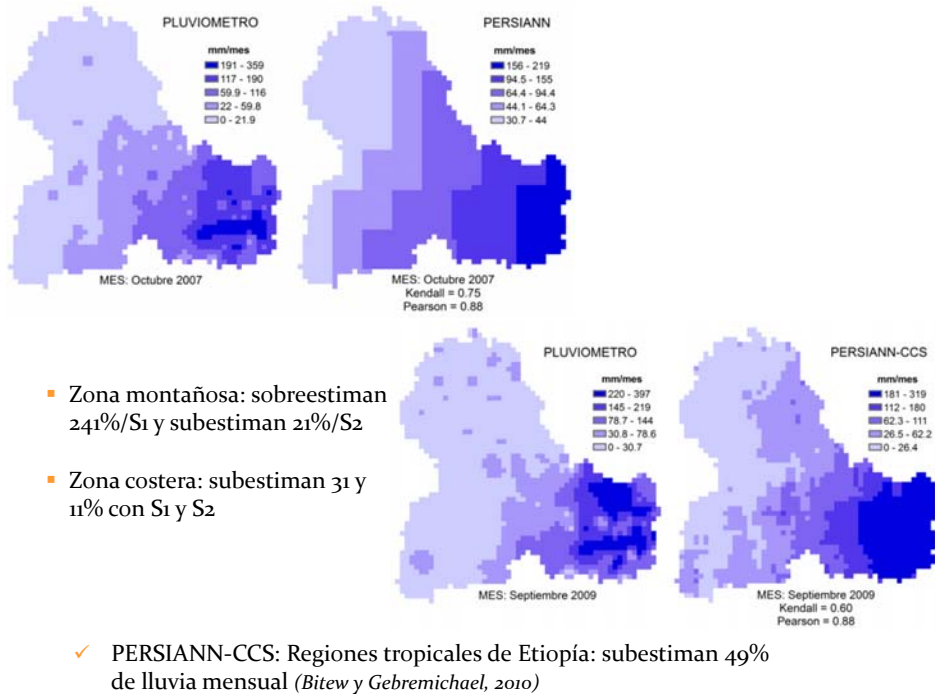
+ T1: 61% Pearson y 66% Kendall  
 T2: 65 y 70%  
 - T1: 27 y 22%  
 - T2: 27 y 23%

mediana: línea roja  
 cuartiles 25% y 75%: caja  
 máximo y mínimo : línea de color negro

- Valores más altos de Pearson se ven influenciados por meses sin lluvia (cero) y lluvias máximas en algunas zonas de la cuenca. (Hirsh et al, 1992)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación



- Zona montañosa: sobreestiman 241%/S1 y subestiman 21%/S2
- Zona costera: subestiman 31 y 11% con S1 y S2

- ✓ PERSIANN-CCS: Regiones tropicales de Etiopía: subestiman 49% de lluvia mensual (Bitey y Gebremichael, 2010)

Índice

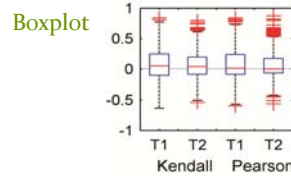
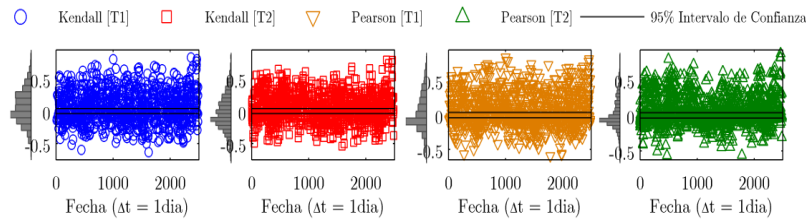
1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Correlación diaria entre productos de satélite y pluviómetros

01 Enero 2003 al 31 Octubre 2009

1811 celdas en la cuenca:  
 ✓ t-Student -> Pearson  
 ✓ "suma de orden" -> Kendall  
 (Hirsh et al., 1992)

Series temporales



mediana: línea roja  
 cuartiles 25% y 75%: caja  
 máximo y mínimo: línea de color negro  
 incremento valores "outliers": cruz roja

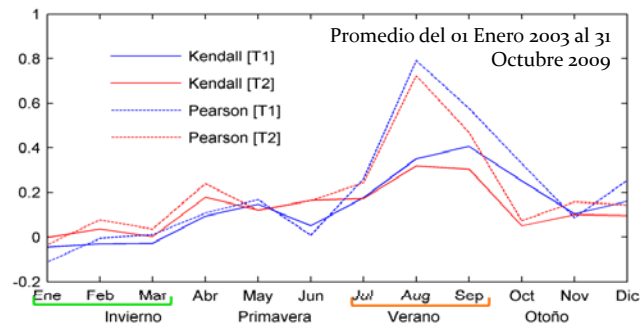
+ T1: 44% Pearson y 52% Kendall  
 T2: 40 y 51%  
 - T1: 35 y 37%  
 T2: 31 y 36%

- correlaciones bajas, mismo comportamiento con CMORPH y TRMM, atribuidas a efecto orográfico y lluvia cálida (Dinku et al, 2010)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Correlación diaria

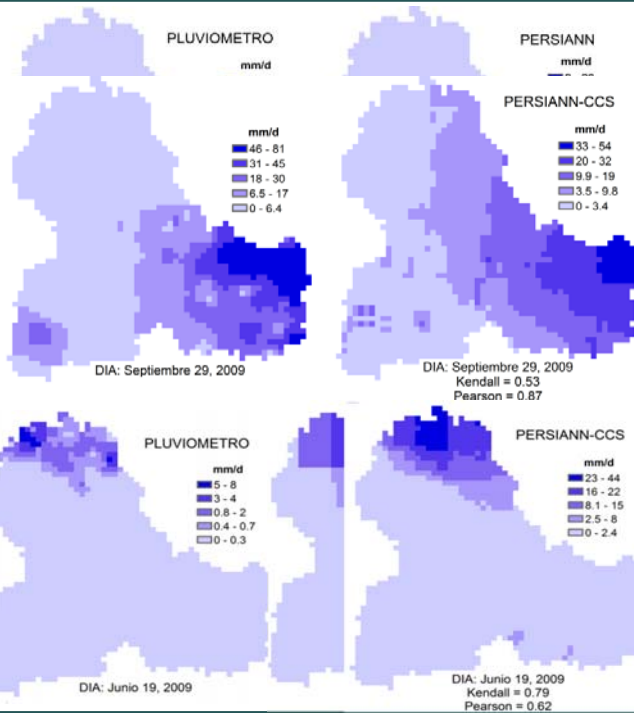


- **Invierno:** correlación es más débil, posiblemente como las lluvias se concentran mas en las zonas de montaña. Este efecto orográfico no está bien detectado por satélites
- **Verano:** alta correlación positiva significativa, por mayor presencia de días sin lluvia (valor cero). Reflejado en valores altos de Pearson. En cambio Kendall representa mejor estos casos, ya que resiste el efecto de valores extremos
- Primavera y otoño: correlación positiva significativa.
- ✓ Tres productos de satélite (MW y IR-MW) reportan mayor correlación en verano que en invierno (Labó, 2012)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- Mejor Pearson, un día de verano: días sin lluvia y tormentas convectivas en zona costera.
- Mejor Kendall, un día de primavera: menos eventos extremos pero mayor lluvia en zona montañosa
- ✓ Zona montaña: sobrestiman (*nubes cirros, Dinku, et al 2009*)
- ✓ Zona costera: subestiman (*lluvias cálidas, Dinku et al 2009*)

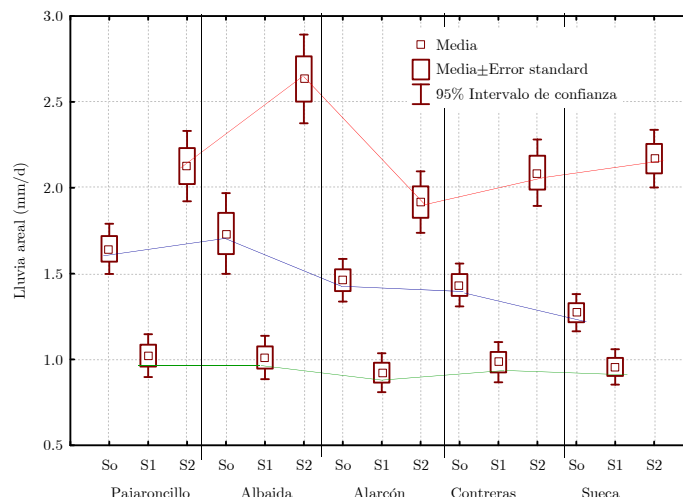


Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Correlación diaria entre productos de satélite y pluviómetros

01 Enero 2003 al 31 Octubre 2009

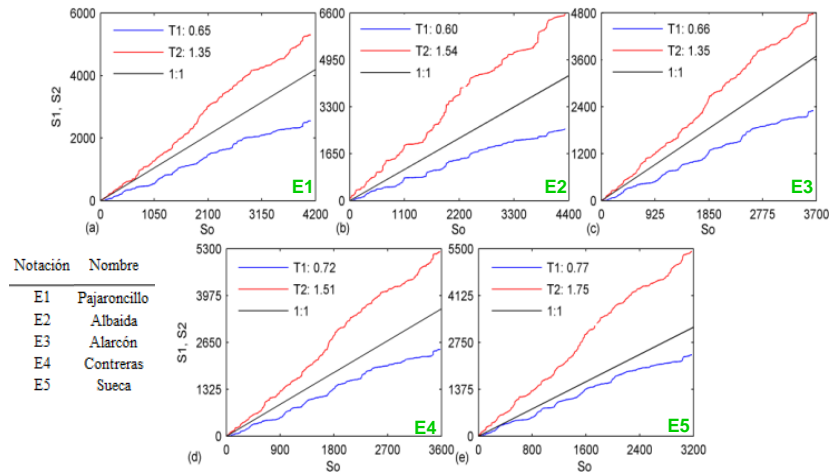


Área drenante (km <sup>2</sup> )	
Pajaroncillo	861
Albaida	1,301
Alarcón	2,883
Contreras	3,427
Sueca	21,500

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Curva doble masa

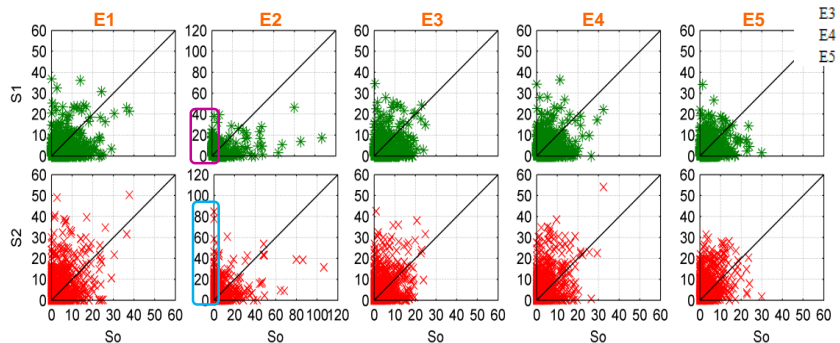


- Subestimación con tres productos de satélite (3B42V6, 3B42RT y CMORPH) en río Mishui (9972 km<sup>2</sup>), China, topografía compleja, clima subtropical húmedo (*Jiang et al, 2012*)
- Reportan que no estiman bien eventos extremos: PERSIANN-CCS en Etiopía (*Bitew y Gebremichael, 2010*); CMORPH, PERSIANN, TRMM-3B42 en Sicilia (*Conti et al, 2011*); CMORPH, PERSIANN, TMPART, TMPAV6 en USA (*AghaKouchak et al, 2011*)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Diagrama de dispersión



- Dificultad en detectar lluvias ligeras menores a 1 mm/d, que el satélite sobreestima con valores de:
  - Albaida: hasta 85 mm/d con PERSIANN-CCS hasta 40 mm/d con PERSIANN



## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

## Estadísticos de detección

PERSIANN	Área (km <sup>2</sup> )	POD	FAR	CSI	PC	HSS	FBIAS
Pajaroncillo	861	0.69	0.52	0.39	0.75	0.40	1.43
Albaida	1,301	0.53	0.53	0.34	0.75	0.34	1.12
Alarcón	2,883	0.72	0.53	0.40	0.76	0.41	1.52
Contreras	3,427	0.71	0.51	0.40	0.76	0.42	1.45
Sueca	21,500	0.69	0.49	0.42	0.75	0.41	1.35

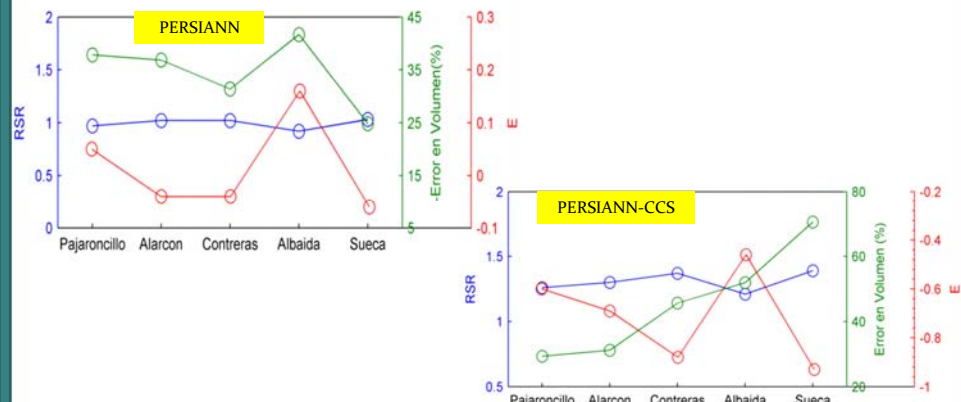
PERSIANN-CCS	Área (km <sup>2</sup> )	POD	FAR	CSI	PC	HSS	FBIAS
Pajaroncillo	861	0.61	0.39	0.44	0.74	0.42	1.00
Albaida	1,301	0.47	0.33	0.38	0.72	0.35	0.70
Alarcón	2,883	0.61	0.37	0.45	0.74	0.42	0.96
Contreras	3,427	0.60	0.34	0.46	0.74	0.44	0.91
Sueca	21,500	0.58	0.25	0.49	0.73	0.44	0.78

- Para umbral 0.5 mm/d:
  - Contreras: 71 y 60% de probabilidad de detectar lluvias > 0.5 mm/d con PERSIANN y PERSIANN-CCS
- PERSIANN: incrementa la probabilidad de detección y aumenta las falsas alarmas
- La probabilidad de detección es menor en Albaida con los dos productos de satélite

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

## Índices de Eficiencia



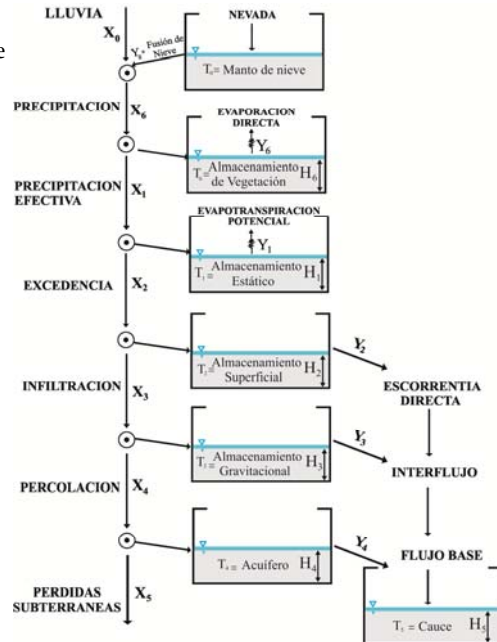
- E(-) con PERSIANN-CCS, Ev subestima con PERSIANN y sobrestima con PERSIANN-CCS
- Cuencas más pequeña mejor E y Ev con PERSIANN-CCS, excepto Albaida (efecto lluvias torrenciales y probables SCM en otoño -> dificultan detección)
- ✓ Resultados influenciados por factores locales (orografía, situación relativa respecto a la costa) (Álvarez, 2011)
- ✓ PERSIANN, TMPA-RT y CMORPH, reportan que cuanto más convectivo sea régimen de lluvia, más preciso el producto de satélite (Ebert et al, 2007)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- Desarrollado en el DIHMA-UPV desde 1994
- Modelo conceptual con base física
- Escorrentía se modela utilizando 7 tanques conectados
- Describe interacciones atmósfera-vegetación-suelo-acuífero

Parámetro del modelo	Símbolo
Almacenamiento capilar del suelo	Hu
Factor de vegetación	$\lambda$
Capacidad de infiltración	Ks
Velocidad en ladera	$\mu$
Capacidad de percolación	Kp
Conductividad hidráulica del interflujos	Kss
Capacidad de pérdidas del acuífero	Kps
Conductividad hidráulica del acuífero	Ksa
Velocidad en los cauces	v



(Francés et al, 2002; Francés et al, 2007; Vélez y Francés, 2008, Vélez et al, 2009)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Problema con los parámetros en la mayoría de modelos distribuidos:

- Calibración de elevado número de parámetros en cada celda a partir del hidrograma en la salida de la cuenca.
- **Solución adoptada:** estructura separada del parámetro efectivo:
  - Primera fase: estimación “a priori” a partir de información física y ambiental disponible

$$H_u(i)$$

- Segunda fase: Factor corrector global

$$H_u(i) \cdot FC_i \rightarrow \text{Calibración}$$

manual, automática de FCs (algoritmo SCE-UA)

Factor corrector	Parámetro del modelo	Símbolo
FC1	Almacenamiento capilar del suelo	Hu
FC2	Factor de vegetación	$\lambda$
FC3	Capacidad de infiltración	Ks
FC4	Velocidad en ladera	$\mu$
FC5	Capacidad de percolación	Kp
FC6	Conductividad hidráulica del interflujos	Kss
FC7	Capacidad de pérdidas del acuífero	Kps
FC8	Conductividad hidráulica del acuífero	Ksa
FC9	Velocidad en los cauces	v

- FCs: efectos de escala espacial y temporal, errores en inputs, parámetros a priori y asociados a la estructura de los parámetros, otros
- Mapas de parámetros hidrológicos se terminan de calibrar con FC (cambian valores medios pero mantienen estructura espacial)

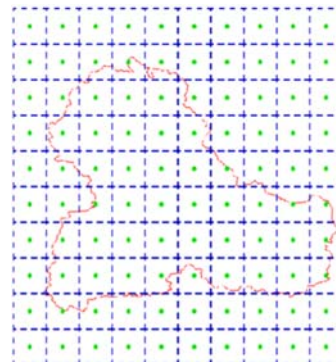
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- $\Delta t = 1$  día, escala espacial 500 m x 500 m
- Período: 01 enero 2003 al 31 Octubre 2009
- Información hidrometeorológica con base en tierra (series temporales de lluvia, Q y evapotranspiración) requirió codificación en formato CEDEX en fila

- Lluvia de satélite interpretados en el modelo como estaciones virtuales localizadas en el centroide de cada celda de la malla del satélite:

110 estaciones: PERSIANN  
4588 estaciones: PERSIANN-CCS



Legenda  
● Centroides del grid PERSIANN

- Información espacial de la cuenca en formato GRID ASCII (MED, celdas acumuladas, direcciones de flujo, pendientes, velocidad en ladera, cobertura vegetal, mapas de parámetros hidrológicos

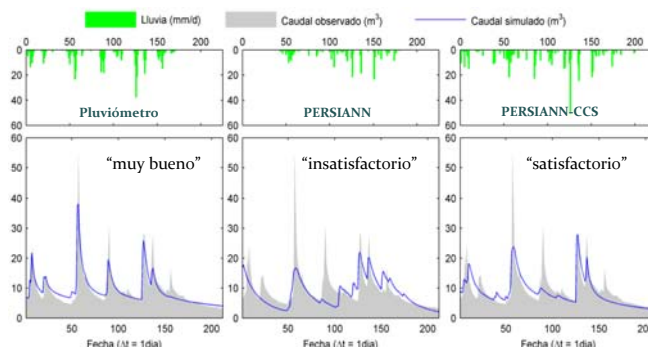
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- punto de calibración: Pajaroncillo
- periodo: 01 enero a 31 julio 2003

Índices de eficiencia	So	S1	S2
Nash-Stucliffe (E)	0.80	0.27	0.51
RMSE estandarizado (RSR)	0.45	0.85	0.70
Error en volumen en % (Ev)	0.06	-10.48	-7.55

Factores correctores	So	S1	S2
FC-1 Almacenamiento estático	0.897	0.704	0.870
FC-2 Evapotranspiración	0.648	0.186	0.853
FC-3 Infiltración	0.925	0.558	0.726
FC-4 Escorrentía directa	0.004	0.001	0.003
FC-5 Percolación	0.114	0.016	0.024
FC-6 Interflujo	494.897	113.524	118.891
FC-7 Pérdidas subterráneas	0.000	0.000	0.000
FC-8 Flujo base	2.002	9.594	2.985
FC-9 Velocidad en los cauces	0.834	0.621	0.537



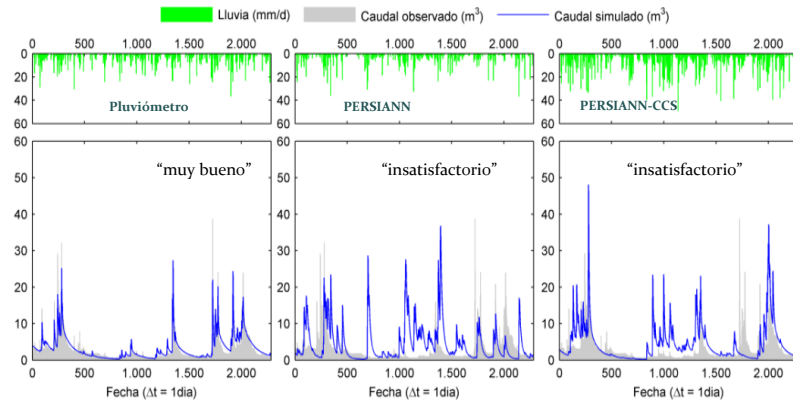
Calibración de los parámetros en la modelación hidrológica pueden corregir errores de satélite (Stisen y Sandholt, 2010; Bitew y Gebremichael, 2011; Bitew, 2011; Moreno, 2012)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

▪ periodo: 01 Agosto 2003 al 31 Octubre 2009

Índices de eficiencia	So	S1	S2
Nash-Stucliffé (E)	0.79	-2.02	-0.90
RMSE estandarizado (RSR)	0.46	1.74	1.38
Error en volumen en % (Ev)	13.87	54.08	53.93



Índice

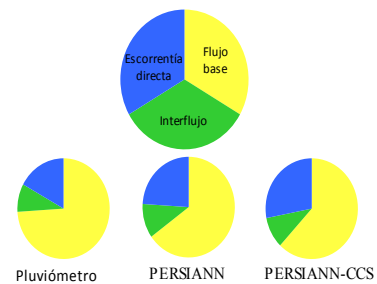
1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

▪ subcuenca de Pajaroncillo

▪ Periodo: 01 enero 2003 al 31 octubre 2009

Balance hídrico	So	S1	S2
Lluvia (mm/d)	1.64	1.02	2.13
Evapotranspiración real (mm/d)	1.32	0.58	1.71
Pérdidas subterráneas (mm/d)	0.00	0.00	0.00
Caudal observado (mm/d)	0.34	0.34	0.34
Caudal simulado (mm/d)	0.38	0.47	0.47
Almacenamiento estático (mm)	59	89	59
Almacenamiento superficial (mm)	0.3	2	1
Almacenamiento gravitacional (mm)	2	8	7
Almacenamiento en el acuífero (mm)	82	35	67
Flujo superficial (%)	17	24	28
Interflujo (%)	9	11	10
Flujo base (%)	74	65	62

▪ Sobreestimación y subestimación lluvia, influye en reparto de flujos en hidrograma simulado:



▪ 30% más lluvia con PERSIANN-CCS y 38% menos con PERSIANN

▪ ET se reduce 56% con PERSIANN y aumenta 30% con PERSIANN-CCS (estrategia de calibración -> FC evap se reduce con PERSIANN e incrementa con PERSIANN-CCS)

▪ Similar comportamiento es reportado en evapotranspiración con PERSIANN (Bitew y Gebremichael, 2011; Moreno, 2012).

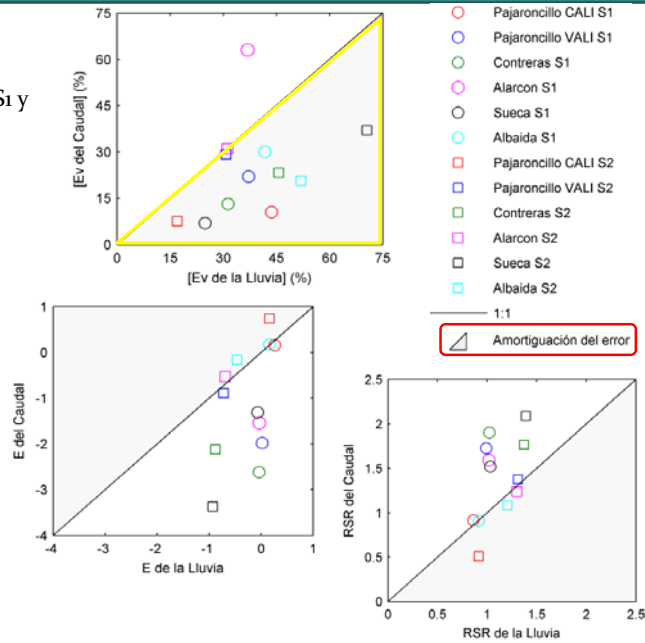
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Ev lluvia se amortigua a través de modelación con S1 y S2

Error en términos de E y RSR, empeoran con modelación, excepto en cuencas más pequeñas como Pajaroncillo (861 km²) y Albaida (1301 km²)

Propagación del error depende de tamaño de cuenca: cuencas <400 km² tienen mayor capacidad de amortiguación de error lluvia al Qsim. (Nikolopoulos et al, 2010)



Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- Combinar pluviómetros + lluvia estimada de satélite: (Todini, 2001; Mazzetti y Todini, 2004)
  - interpolación de pluviómetros por “block kriging” (regionaliza datos pluviométricos)
  - combinación con lluvia satélite con ayuda del filtro de Kalman
- Parámetros del semivariograma Gaussiano isotrópico, se actualizan en cada paso temporal
- Actualización del filtro de Kalman:
 
$$v_t = z_t - H \cdot x_t$$

$$K_t = P_t' (P_t' + R_t)^{-1} \quad \text{ganancia de Kalman}$$

$$x_t^* = x_t + K_t v_t \quad \text{actualización del estado}$$

$$P_t^* = P_t - K_t P_t' \quad \text{actualización de la covarianza del error}$$

Zt, vector del “block kriging” de pluviómetros  
 H, matriz identidad  
 vt, error  
 xt', estimación a priori del campo de lluvia de satélite  
 xt, estimación a posteriori  
 Kt, ganancia de Kalman  
 Rt, matriz de covarianza del error obtenido del “block kriging”  
 Pt', matriz de covarianza de la estimación a priori  
 Pt, matriz de covarianza de los errores de la estimación a posteriori

**Rainmusic: software**  
 (Mazzetti y Todini, 2007)

Índice

- 1. Introducción
- 2. Estado del conocimiento
- 3. Caso de estudio
- 4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
- 5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
- 7. Conclusiones
- 8. Futuras líneas de investigación

- Subcuenca: Pajaroncillo (19 estaciones) 45 km<sup>2</sup>/pluviómetro
  - 01 enero al 31 julio 2003
  - S<sub>3</sub> [Pluviómetro + PERSIANN-CCS]
    - So                      S2
- ✓ densidades elegidas se corresponden a 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 19 pluv  
 ✓ resultados podrían ser sensibles a elección de pluviómetros =>  
     ✓ 1S<sub>3</sub>: centro y salida de la subcuenca  
     ✓ 2S<sub>3</sub>: se probaron cinco opciones

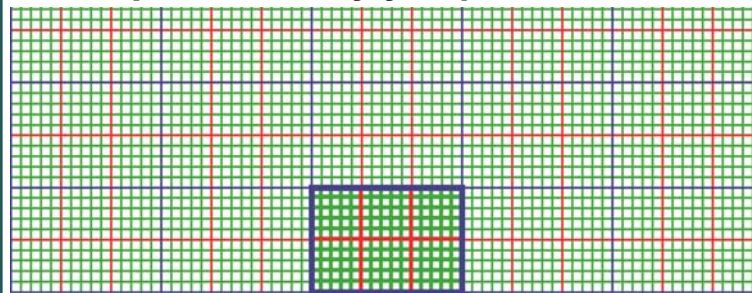
Notación

Notación	Lluvia	Densidad (km <sup>2</sup> /pluviómetros)	Notación	Tratamiento
19So	Pluviómetros	45		
S2	PERSIANN-CCS		T2	S2 con 19So
	<u>Lluvia combinada:</u>			<u>Lluvia combinada:</u>
1S3	1So+S2	861	1T3	1S3 con 19So
2S3	2So+S2	431	2T3	2S3 con 19So
4S3	4So+S2	215	4T3	4S3 con 19So
5S3	5So+S2	172	5T3	5S3 con 19So
6S3	6So+S2	144	6T3	6S3 con 19So
8S3	8So+S2	108	8T3	8S3 con 19So
10S3	10So+S2	86	10T3	10S3 con 19So
12S3	12So+S2	72	12T3	12S3 con 19So
14S3	14So+S2	62	14T3	14S3 con 19So
16S3	16So+S2	54	16T3	16S3 con 19So
18S3	18So+S2	48	18T3	18S3 con 19So
19S3	19So+S2	45	19T3	19S3 con 19So

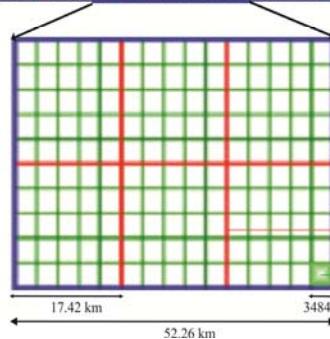
Índice

- 1. Introducción
- 2. Estado del conocimiento
- 3. Caso de estudio
- 4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
- 5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
- 7. Conclusiones
- 8. Futuras líneas de investigación

- Área computacional: “block kriging”, “bloque”, macroáreas”



Interpolación del semivariograma en la macroárea



PERSIANN-CCS  
 Header File: n cols 75  
 n rows 80  
 xllcorner 77284.71  
 yllcorner 4245784.65  
 cell size 3484

→ Macroárea  
 → Bloque  
 → Celda del grid PERSIANN-CCS (block kriging)

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

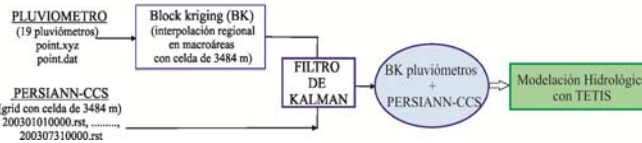
▪ Archivo "point.xyz"

CODE	X	Y	Z	NAME
1	601142	4458959	1315	HUELAMO
2	591389	4452945	1154	PANTANO DE LA TOBA
3	581917	4445774	1157	VALDECABRAS
4	581080	4435590	1071	PALOMERA
5	583079	4426052	1100	FUENTES LAS ZOMAS
6	590422	4386667	911	GABALDON
7	583995	4385670	880	VALVERDEJO
8	593863	4397809	993	ALMODOVAR PINAR, CHJ.
9	628585	4456602	1490	TORIL
10	623890	4425682	1158	CAMPILLOS (PARAVIENTOS)
11	617704	4426817	1026	BONICHES
12	623201	4438932	1155	SALINAS DEL MANZANO
13	616253	4444374	1234	TEJADILLOS
14	615234	4433256	1070	CAÑETE, CHJ.
15	595876	4427128	1032	CAÑADA DEL HOYO
16	596467	4417884	1022	REILLO
17	603874	4397013	968	PARACUELLOS DE LA VEGA
18	622146	4416093	1207	SAN MARTIN DE BONICHES
19	633875	4397477	834	MIRA

formato ASCII-Tabla  
(preprocesamiento y codificación)

▪ Archivos "point.dat"

Fecha (año/mes/día/ hora/minutos)	Estación 1	Estación 2	Estación 3	Estación 4	Estación 5	Estación 6	Estación 7	Estación 8	Estación 9	Estación 10	Estación 11	Estación 12	Estación 13
2003 1 1 0 0	2.2	1.7	4	2.5	2.6	1	0.8	0	0	2.5	5	0	
2003 1 2 0 0	22	16.1	7	4.5	0	0	0	4	3.4	1	0	6	10
2003 1 3 0 0	1.5	2.2	8	0	0	0	0.8	0	0	1.4	0	0	
2003 1 4 0 0	2.7	2.6	0	3.5	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0
2003 1 5 0 0	21.5	21	20	14	23.2	8	5.6	17.5	2.1	13.2	22	20	
2003 1 6 0 0	6.8	8.6	3	3	0	1	1.2	0	0.7	1.3	1.5	1	1
2003 1 7 0 0	23.5	26	24	19.5	0	14.5	8	18.5	7.2	18.4	26	15	12
2003 1 8 0 0	0	2.9	0	3	2.3	3.5	1.7	2	4.3	0	0	0	1
2003 1 9 0 0	0	6.2	9	0	0	6	5	0	2.3	0	0	0	4
2003 1 10 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 11 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 12 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 13 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 14 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 15 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 16 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003 1 17 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2003 1 18 0 0	17.2	10	3	6	7.2	0	0	5.7	0	0	0	0	2
2003 1 19 0 0	1.6	8.5	7	5.5	3.1	1.5	3	0	4.5	0	0	0	0
2003 1 20 0 0	32.1	17.5	0	0	12	5	7.5	10	1.7	6.3	17	18	16
2003 1 21 0 0	4.2	2.6	15	5	7.2	0	7.5	0	1	4.2	3	5	2
2003 1 22 0 0	4.5	11.6	12	14.4	0	7.5	0	10.5	4.7	7.1	5.5	4	
2003 1 23 0 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



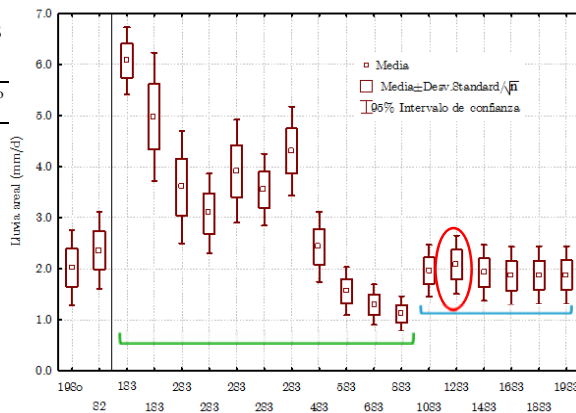
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Correlación diaria entre lluvia combinada y pluviómetros

▪ 01 de Enero al 31 de Julio del 2003

Detalle	Notación	Densidad (km <sup>2</sup> /pluviómetros)	Valor medio (mm/d)
Pluviómetros (19)	19S0	45	2.03
PERSIANN-CCS	S2		2.36
<b>Lluvia combinada:</b>			
1So+S2	1S3	861	6.07
1So+S2	1S3	861	4.97
2So+S2	2S3	431	3.60
2So+S2	2S3	431	3.08
2So+S2	2S3	431	3.91
2So+S2	2S3	431	3.55
2So+S2	2S3	431	4.30
4So+S2	4S3	215	2.43
5So+S2	5S3	172	1.56
6So+S2	6S3	144	1.30
8So+S2	8S3	108	1.12
10So+S2	10S3	86	1.96
12So+S2	12S3	72	2.08
14So+S2	14S3	62	1.92
16So+S2	16S3	54	1.86
18So+S2	18S3	48	1.87
19So+S2	19S3	45	1.87



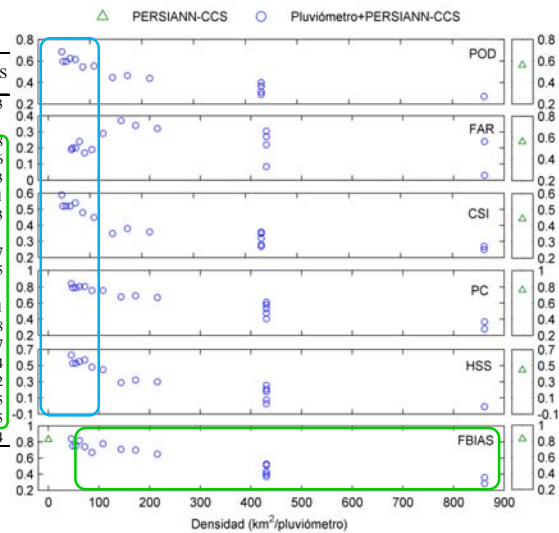
- Mejora a densidad menor a 100 km<sup>2</sup>/pluv (corresponde 10,12,14,16,18,19 pluv): 3-8%
- Empeora a densidad mayor a 100 km<sup>2</sup>/pluv: 20-200%

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

## Estadísticos de Detección

Notación	Densidad (km <sup>2</sup> /pluviómetros)	POD	FAR	CSI	PC	HSS	BIAS
S2		0.56	0.32	0.44	0.76	0.45	0.83
1S3	861	0.27	0.03	0.27	0.28	-0.01	0.28
1S3	861	0.27	0.24	0.25	0.37	-0.01	0.36
2S3	431	0.31	0.27	0.28	0.48	0.08	0.43
2S3	431	0.4	0.22	0.36	0.61	0.25	0.51
2S3	431	0.37	0.31	0.32	0.58	0.18	0.53
2S3	431	0.36	0.08	0.35	0.53	0.21	0.4
2S3	431	0.29	0.22	0.27	0.41	0.03	0.37
4S3	215	0.44	0.32	0.36	0.67	0.3	0.65
5S3	172	0.46	0.34	0.38	0.69	0.32	0.7
6S3	144	0.45	0.37	0.35	0.68	0.29	0.71
8S3	108	0.55	0.29	0.45	0.76	0.45	0.78
10S3	86	0.55	0.19	0.48	0.76	0.48	0.67
12S3	72	0.61	0.17	0.54	0.81	0.57	0.74
14S3	62	0.63	0.24	0.52	0.81	0.55	0.82
16S3	54	0.59	0.2	0.52	0.79	0.53	0.75
18S3	48	0.59	0.2	0.52	0.79	0.53	0.75
19S3	45	0.69	0.19	0.59	0.84	0.67	0.84



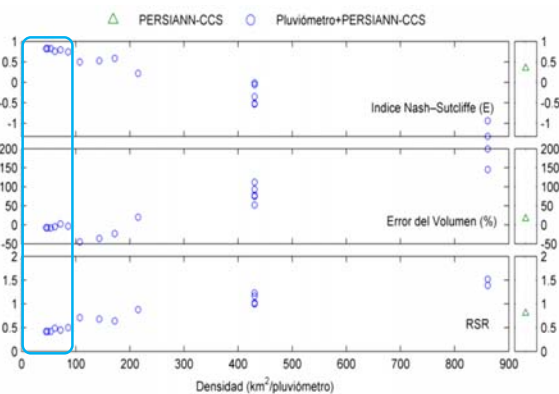
- Mejora significativa en los estadísticos a densidad menor de 100 km<sup>2</sup>/pluv (incremento de POD, CSI, PC y HSS, y reducción de falsas alarmas)
- Mejora notable de la frecuencia de sesgo con excepción a 45 km<sup>2</sup>/pluv

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

## Índices de Eficiencia

Notación	Densidad (km <sup>2</sup> /pluviómetro)	E	Ev	RSR
S2		0.348	16.515	0.805
1S3	861	-0.936	199.770	1.388
1S3	861	-1.317	145.541	1.519
2S3	431	-0.517	77.586	1.229
2S3	431	-0.013	52.216	1.004
2S3	431	-0.529	93.048	1.234
2S3	431	-0.056	75.209	1.025
2S3	431	-0.350	112.505	1.159
4S3	215	0.221	19.923	0.880
5S3	172	0.587	-22.918	0.641
6S3	144	0.530	-35.992	0.684
8S3	108	0.498	-44.879	0.707
10S3	86	0.746	-3.224	0.503
12S3	72	0.797	-2.661	0.450
14S3	62	0.762	-5.199	0.486
16S3	54	0.824	-8.182	0.419
18S3	48	0.823	-7.582	0.420
19S3	45	0.823	-7.544	0.420



- Índices se estabilizan a densidad menor a 100 km<sup>2</sup>/pluv
- Mejor rendimiento a de 72 km<sup>2</sup>/pluv



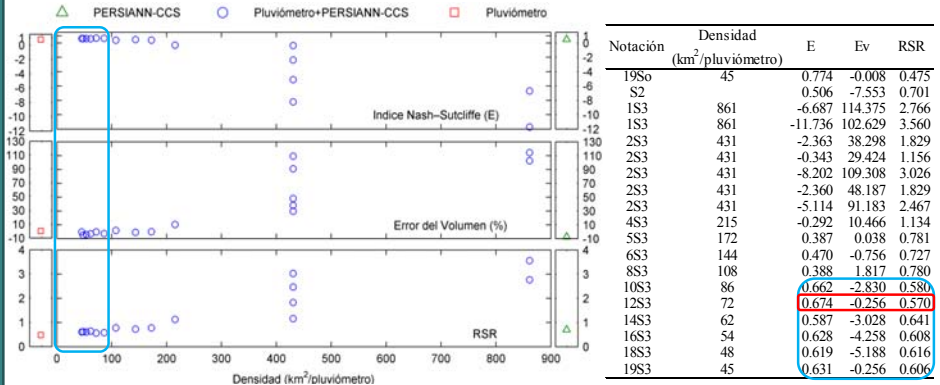
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite**
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Factores correctores

Factor corrector	Parámetro del modelo
FC1	Almacenamiento capilar del suelo
FC2	Factor de vegetación
FC3	Capacidad de infiltración
FC4	Velocidad en ladera
FC5	Capacidad de percolación
FC6	Conductividad hidráulica del interflujio
FC7	Capacidad de pérdidas del acuífero
FC8	Conductividad hidráulica del acuífero
FC9	Velocidad en los cauces

Índices de Eficiencia

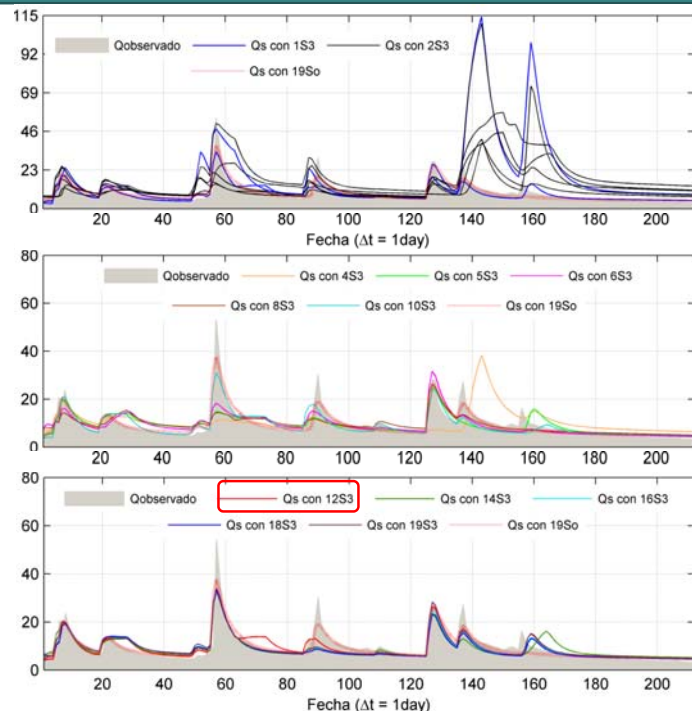


Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite**
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Hidrogramas

Mejor rendimiento a 72 km<sup>2</sup>/pluviómetro: reproduce flujo base y forma de curva de recesión, detecta mayoría de picos y días en que ocurren pero subestima valor máx en 37%.

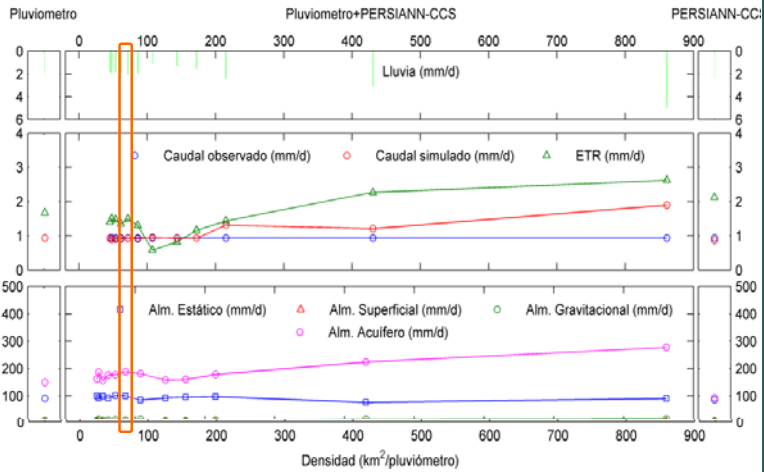


Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite**
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Balance hídrico

- Sensibilidad de la evaporación (estrategia de calibración)
- *Bitew y Gebremichael, 2011; Moreno, 2012*



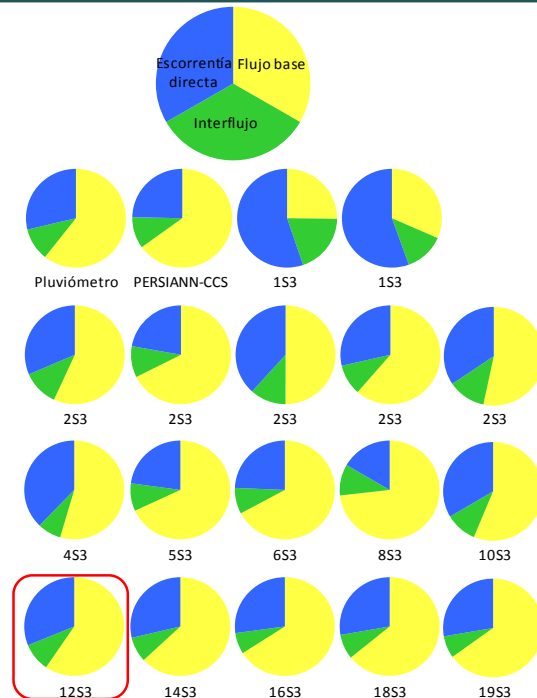
- Mejor rendimiento (**72 km²/pluviómetro**): 2.08, 1.50 y 0.93 mm/d de lluvia, evapotranspiración y flujo simulado:
  - Antes con PERSIANN-CCS se sobrestimaba la lluvia un 17%
  - Ahora con lluvia combinada sobrestima un 3%

Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
- 6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite**
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Balance Hídrico

- Densidad influye en el reparto de flujos en el hidrograma simulado
- Flujo base significativo (Pajaroncillo: flujo no se agota, recesiones breves en el tiempo)
- Mejor rendimiento: 72 km²/pluv (12S3), flujo:
  - 31% escorrentía directa
  - 9% interflujo
  - 60% como flujo base.



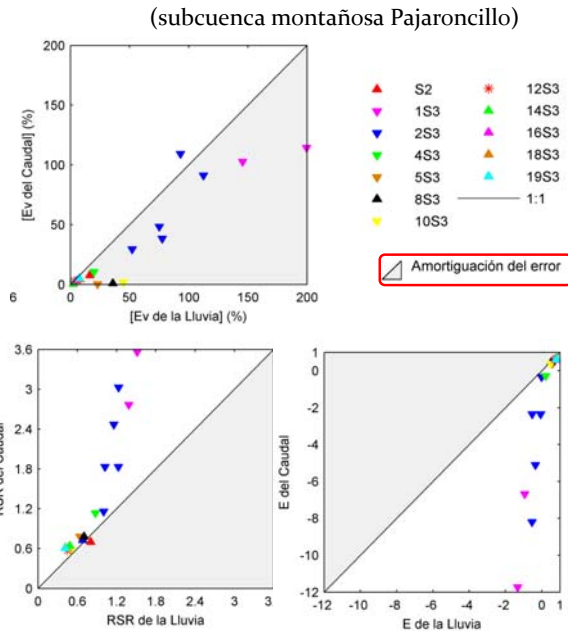
Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Ev se amortigua en todas las densidades de pluv, excepto a densidad de 431 km<sup>2</sup>/pluv (una opción de 2S<sub>3</sub>)

Por el contrario, E y RSR empeoran con la modelación hidrológica, excepto a densidades menores a 172 km<sup>2</sup>/pluv

*Nikolopoulos et al. (2010)*: cuencas de áreas menores a 400 km<sup>2</sup> tienen mayor capacidad de amortiguación del error de la lluvia al Qsim



Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

Lluvia estimada por satélite está sujeta a diversos errores (problemas instrumentales, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas y relaciones complejas entre las variables observadas y la lluvia, entre otras razones). Esto limita su uso en aplicaciones hidrológicas.

**Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en aplicaciones hidrológicas en una cuenca mediterránea extra tropical, como es la cuenca del río Júcar razonablemente bien instrumentada**

- Evaluación del error de dos productos de satélite frente a los pluviómetros
- Rendimiento en la modelación hidrológica distribuida
- Combinación pluviómetros+ producto de satélite

Ayudar en el uso de la lluvia estimada de satélite en áreas con características similares, particularmente en países del Norte de África, con clima y orografía similar, como alternativa a pluviómetros convencionales, escasos o inexistentes en estos lugares

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- ✓ Correlaciones espaciales entre la lluvia estimada a partir de satélite y la lluvia de referencia, es aceptable a escala anual, menos aceptable a escala mensual y pobre a escala diaria.
- ✓ **Invierno** la correlación diaria es más débil, tal vez, el efecto orográfico (lluvia se concentra más en montañas) ocasiona que la lluvia no está bien detectada por satélites. Por el contrario, en **Verano** se observa el patrón opuesto, correlación positiva significativa. Reflejado en valores más altos con Pearson en verano (presencia de ceros podría favorecer una mayor correlación); en cambio Kendall representa mejor estos casos (resiste el efecto de valores extremos).
- ✓ Errores altos con lluvias máximas y con frecuencia sobrestimación de lluvias ligeras
- ✓ En general, **PERSIANN-CCS sobrealora**, mientras que **PERSIANN subestima** a diferentes escalas de agregación de cuenca. Además, PERSIANN tiene mayor probabilidad de detección de lluvia, pero también mayores falsas alarmas. La detección de lluvia es menor en la subcuenca del río Albaida que en la subcuenca de Pajaroncillo. Diferencias en detección influenciadas por características climáticas y fisiográficas, reportado por *Hossain y Huffman (2008)*.

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- ✓ La calibración de los parámetros del modelo hidrológico han permitido elevar el rendimiento de la modelación. (*Stisen y Sandholt, 2010; Bitew y Gebremichael, 2011; Bitew et al., 2011; Jiang et al., 2012; Moreno et al., 2012*).
- ✓ Rendimiento “satisfactorio” con **PERSIANN-CCS**. Los resultados son alentadores, y tal parece que una mejor resolución, una sobrestimación en el volumen de lluvia y una menor frecuencia de sesgo, ocasionan que se adapte mejor a la modelación.
- ✓ En cambio, se obtiene rendimiento “insatisfactorio” con **PERSIANN**. Parece ser que una resolución gruesa y una subestimación en el volumen de lluvia, afecta negativamente a la modelación, pero esto posiblemente se esté amortiguando con la mayor probabilidad de detección de la lluvia PERSIANN.
- ✓ El modelo trata de mantener un comportamiento similar al Qobs (estrategia de calibración) => FC evapotransp se reduce con PERSIANN e incrementa con PERSIANN-CCS para finalmente obtener evapotranspiración real que se reduce con PERSIANN e incrementa con PERSIANN-CCS. Similar comportamiento es reportado por *Bitew y Gebremichael, 2011 y Moreno, 2012*.
- ✓ El error en volumen lluvia se amortigua a través de la modelación. Al contrario, E y RSR empeoran, excepto en cuencas más pequeñas (Pajaroncillo, 861 km<sup>2</sup> Albaida, 1,301 km<sup>2</sup>).

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

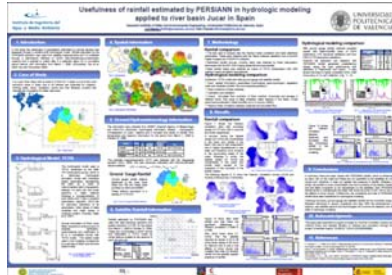
- ✓ De cara a mejorar las posibilidades de uso, se implementó un modelo Bayesiano (combinar pluvio+PERSIANN-CCS) a diferentes densidades de pluviómetro en la subcuenca montañosa de Pajaroncillo
- ✓ Lluvia: a **densidad menor 100km<sup>2</sup>/pluv**, mejora valor medio de PERSIANN-CCS, mejora significativa de estadísticos de detección y mejora notable de la frecuencia de sesgo con excepción a 45 km<sup>2</sup>/pluv. Índices E, RSR y Ev se estabilizan a <100 km<sup>2</sup>/pluv.
- ✓ Modelación hidrológica: rendimientos “buenos” a “muy buenos” a 100km<sup>2</sup>/pluv, con **mejor rendimiento a 72 km<sup>2</sup>/pluv** (hidrograma reproduce flujo base y forma de curva de recesión, detecta mayoría de picos y días en que ocurren, pero subestima valor máximo). El error en volumen lluvia se amortigua en todas las densidades (excepto a 431 km<sup>2</sup>/pluv), pero empeora E y RSR, excepto a densidad menor a 172 km<sup>2</sup>/pluv.
- ✓ El nuevo producto PERSIANN-CCS, además de incrementar su resolución espacial, también mejora en cuanto a su fiabilidad de uso en modelación hidrológica, especialmente si se combina con datos de pluviómetro, convirtiéndose en el punto de partida de futuras investigaciones.

## Índice

1. Introducción
2. Estado del conocimiento
3. Caso de estudio
4. Caracterización del error de la lluvia estimada de satélite
5. Modelación hidrológica con la lluvia estimada de satélite
6. Combinación de pluviómetros y lluvia estimada de satélite
7. Conclusiones
8. Futuras líneas de investigación

- Combinar lluvia pluviómetros con PERSIANN-CCS en un amplio número de cuencas experimentales bien instrumentadas en diferentes condiciones climáticas.
- Comparar resultados con otro producto satélite específico para la península Ibérica:
  - Algoritmo CRR “Convective Rainfall Rate”, estima lluvia con datos de satélite MSG al norte y sur de Europa, calibradas con radar AEMET y BALTRAD y FC por tasa de crecimiento de nube, gradiente de temperatura, corrección “parallax”, corrección orográfica y algoritmo para relámpagos (*Luque et al., 2006; SAFNWC, 2012*).
- Clasificar la lluvia según su intensidad y estación del año.
  - *Lábó, 2012*: evalúa tres productos de satélite, reporta resultados en tres categorías de intensidades de lluvia: baja, moderada y alta.
  - *Hossain y Huffman, 2008*: lluvia de satélite depende de resolución del satélite, región, estación del año y umbral de lluvia, por lo que es necesario evaluar la lluvia para estas diferentes condiciones
- Desarrollar un modelo probabilístico de error espacio-temporal para simular realizaciones estocásticas de lluvia satélite y cuantificar su impacto en la incertidumbre de la modelación hidrológica.

Publicaciones



Ramos, L, Francés, F. (2011). Usefulness of rainfall estimated by PERSIANN in hydrologic modeling applied to river basin Jucar in Spain. EGU2011-9746. EGU General Assembly, Viena 2011.

Ramos, L, Francés, F. (2010). Seminario internacional medio ambiente y recursos hídricos, Lima-Perú 2010. Presentación oral - 17/08/10



Ramos, L, Francés, F. (2012). XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay 2011. Presentación oral - 23/11/10



Propagación del Error de la Lluvia estimada por Satélite en la Modelación Hidrológica en una Cuenca Extratropical Mediterránea

Autores: Lia Ramos<sup>(1)</sup>, Félix Francés<sup>(2)</sup>

(1) Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA)

(2) Universidad Nacional Agraria La Molina

Ramos, L, Francés, F. (2012). ISBN: 978-9968-933-06-3. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José de Costa Rica 2012. Presentación oral - 11/09/12

Tesis Doctoral: Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida

Tesis Doctoral

Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida

Candidata a doctor: Lia Ramos Fernández

Director: Félix Francés García



Valencia, 15 de Febrero del 2013

