

VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE PRECIPITACIÓN HORARIA DE UN RADAR METEOROLÓGICO BANDA S PARA EL SEGUIMIENTO EN TIEMPO REAL DE EXTREMOS METEOROLÓGICOS

Fulgencio CÁNOVAS GARCÍA^{1,2}, Sandra GARCÍA GALIANO¹ y Francisco ALONSO SARRÍA²

¹*Unidad Predepartamental de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena.*

²*Departamento de Geografía Humana. Universidad de Sevilla*

³*Instituto Universitario del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Murcia.*

fulgencio.canovas@upct.es, sandra.galiano@upct.es, alonsarp@um.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una validación de las imágenes de acumulación horaria de uno de los radares de la Agencia Estatal de Meteorología de España empleando dos redes de pluviómetros durante dos episodios tormentosos de elevado periodo de retorno. El área de estudio corresponde a la Demarcación Hidrográfica del Segura situada en el sureste de la Península Ibérica, la cual abarca una superficie de más de 18.000 km². Para validar las imágenes de precipitación del radar se han analizado estadísticos como el sesgo, la RMSD y el coeficiente de correlación de Pearson. Si bien en algunos casos la precipitación es capturada en algunos pluviómetros, las altas intensidades no son representadas adecuadamente. El error en la estimación está correlacionado con la precipitación del pluviómetro, pero no en el mismo grado con la precipitación del radar. La tormenta ha sido correctamente identificada por las imágenes de precipitación, pero la estimación cuantitativa de la precipitación presenta subestimaciones en varios casos.

Palabras clave: Estimaciones cuantitativas de precipitación, Validación, radar meteorológico, interpolación.

ABSTRACT

This paper presents a validation of hourly rainfall values from one of the radars of the Agencia Estatal de Meteorología de España. Two rain gauge networks in two storm episodes of high return period were used. The study area is the Segura Hydrographic Demarcation, located in the southeast of the Iberian Peninsula, which covers an area of more than 18,000 km². Several statistics, such as bias, RMSD and correlation coefficient were calculated. Although in some cases precipitation is, in some rain gauges, well reproduced, high intensity rainfall is not adequately represented. The estimation error is strongly correlated with the amount of precipitation recorded in the rain gauge, but not with amount recorded by the weather radar. Although the storms were correctly identified in precipitation images, the rainfall was underestimated in several cases.

Key words: Quantitative Precipitation Estimates, Validation, meteorological radar, interpolation.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es una variable de máxima relevancia en ciencias de la tierra. La disponibilidad de estimaciones de precipitación con buena resolución espacial y temporal es importante en hidrología, investigación climática (Hong *et al.* 2004) o meteorología. Es posible que las estimas de precipitación sean el input meteorológico de mayor importancia en el uso y calibración de modelos hidrológicos y ecológicos (Sun *et al.* 2018).

La falta de datos adecuados para la monitorización de la precipitación limita la posibilidad de llevar a cabo investigaciones de hidrometeorología y el empleo de modelos físicos o estadísticos para la gestión de recursos hídricos (Miao *et al.* 2015). En algunos casos las QPE (Estimaciones Cuantitativas de Precipitación, por sus siglas en inglés) generadas a partir de radares meteorológicos pueden constituir una alternativa a las redes de pluviómetros. Las QPE procedentes de radares meteorológicos pueden ser una fuente de registros de precipitación de gran valor en distintas escalas espaciales y temporales.

En las últimas décadas se ha producido un incremento en la frecuencia de catástrofes por inundación en Europa (Barredo, 2007). En España, las inundaciones son el riesgo natural con el mayor impacto territorial y son responsables de importantes pérdidas económicas y de serios perjuicios para la sociedad (Lopez-Martínez *et al.* 2017). Además, España es el país de la Unión Europea más afectado por inundaciones relámpago (Barredo, 2007). El sureste de la Península Ibérica no es ajeno a estos fenómenos, que han sido motivo de un número muy elevado de muertes y de pérdidas económicas millonarias. Ejemplos recientes son los dos eventos analizados en este trabajo.

Es evidente que no todas las pequeñas y medianas ramblas que son susceptibles de dar lugar a inundaciones relámpago o sistemas hidrológicos de mayor envergadura que puedan dar lugar a inundaciones pueden estar aforadas y suministrando información sobre alturas de la lámina de agua en tiempo real. Por lo que el conocimiento de la intensidad de la precipitación sigue siendo la fuente de información más habitual durante las situaciones de alarma por eventos meteorológicos extremos. Así que independientemente de la metodología o del tipo de modelización empleada en la gestión del riesgo, lo que parece cierto es que la exactitud de los avisos dependerá mucho de la exactitud de la estimación de precipitación (Nikolopoulos *et al.* 2013).

En este trabajo se comparan las estimaciones de precipitación de un radar meteorológico durante dos episodios de fuertes precipitaciones registrados durante la última década en el sureste de la Península Ibérica (España). Las comparaciones se han llevado a cabo con datos agregados, empelando estadísticos para toda el área de estudio y para las cuencas hidrográficas más afectadas, por un lado, y de forma desagregada haciendo lo propio para los pluviómetros de la red que registraron acumulaciones e intensidades de precipitación muy importantes, por otro. Las comparaciones han sido también de tipo espacial, empleando la interpolación para

cartografiar las diferencias de precipitación acumulada entre los dos QPE y los pluviómetros.

2. MÉTODOS

La investigación se ha llevado a cabo en la parte terrestre de la Demarcación Hidrográfica del Segura. Esta se localiza en el sureste de la Península Ibérica y presenta una extensión de 18,740 km² que abarcan la propia cuenca del Segura y otras pequeñas cuencas costeras con cauces intermitentes (Pellicer-Martínez et al. 2018). Es un territorio con precipitaciones escasas e irregulares, altas temperaturas y un número alto de horas de sol al año. Existe un gradiente de precipitación NW-SE que va aproximadamente desde los 1000 mm/año en la zona de cabecera del río Segura hasta menos de 300 mm/año en la zona costera (Gomariz-Castillo et al. 2017). Desde el punto de vista hidrológico el área de estudio presenta una distribución irregular del tamaño de las cuencas de drenaje. Con la excepción del río Segura, los cauces más comunes son ramblas, las cuales frecuentemente son responsables de las inundaciones relámpago, características del clima mediterráneo (López-Martínez et al. 2017).

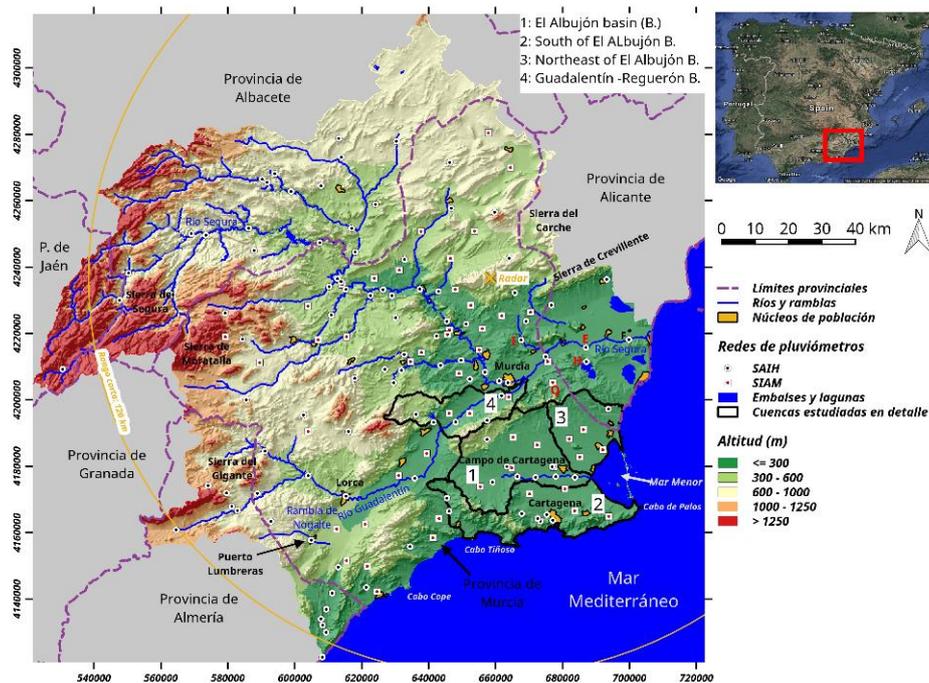


Fig. 1: Mapa de localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía del Instituto Geográfico Nacional y Confederación Hidrográfica del Segura.

Se han identificado y caracterizado dos eventos de precipitaciones muy intensas sucedidos en la última década. El primero de ellos se produjo el 27 y 28 de septiembre de 2009 y afectó principalmente al Campo de Cartagena. Se registraron

importantes inundaciones en varios cauces del área de estudio. Por ejemplo, en la rambla de Benipila (la cual normalmente transcurre seca) se alcanzaron los $214 \text{ m}^3/\text{sec}$ en tres horas (Castejon-Porcel et al. 2014).

El segundo evento se registró entre el 17 y el 19 de diciembre de 2016 y fue el evento de precipitación más importante de todo el año en la Península Ibérica. Las mayores intensidades de precipitación se registraron en el Campo de Cartagena y en la costa este del área de estudio. Las áreas cercanas a la laguna del Mar Menor quedaron muy afectadas por la tormenta y las inundaciones posteriores.

Como QPE se han usado datos del radar regional de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) situado en la Sierra de la Pila (Región de Murcia). En la actualidad suministra datos para un área definida por un círculo centrado en el radar de 240 km de radio (modo rango largo). Las imágenes suministradas están en proyección local de tipo cartesiano conforme cónica de Lambert centrada en el radar (38.27° N , 1.19° O). Cada imagen consta de 480×480 píxeles y una resolución espacial de $1 \times 1 \text{ km}^2$ cuando el radar funciona en modo rango largo. Por el contrario, cuando trabaja en modo rango corto suministra información del área de un círculo de 120 km de radio a partir del radar y una resolución espacial de $500 \times 500 \text{ m}^2$. A partir de las imágenes de factor de reflectividad con una resolución temporal de 10 minutos se genera la acumulación horaria (1 hora) de precipitación, que es el QPE de mayor resolución temporal ofrecido por AEMET y el utilizado en este trabajo. Para el episodio de 2009 se dispone de los datos de acumulación horaria basados en CAPPI (*constant altitude plan position indicator*) trabajando en modo rango corto. Para el episodio de 2016 se ha utilizado un QPE horario denominado SRI (*surface rainfall intensity*) el cual es un producto mejorado que tiene en cuenta el carácter convectivo o estratiforme de la precipitación a la hora de aplicar o no una corrección por perfil vertical de reflectividad.

Las QPE han sido comparados con dos redes de pluviómetros. La red SIAM es el conjunto de estaciones agrometeorológicas de la Región de Murcia. Contaba para el evento de 2009 con 45 pluviómetros y para el evento de 2016 con 47.

La segunda red de pluviómetros es el SAIH-Segura (Sistema Automático de Información Hidrológica del Segura). Esta red contaba durante el evento de 2009 con 64 pluviómetros y con 106 durante el evento de 2016. En total en el año 2009 se tiene un pluviómetro por cada 173 km^2 , para el evento de 2016 la densidad aumenta a $124.5 \text{ km}^2/\text{pluviómetro}$, aunque la distribución espacial de los pluviómetros no es homogénea. La localización de las estaciones SIAM se tiene en <http://siam.imida.es/apex/f?p=101:41:5337967566822910> y la de los pluviómetros de la red SAIH-Segura se puede consultar en <https://www.chsegura.es/chs/cuenca/redesdecontrol/SAIH/visorsaih/visorjs.html>

En todos los casos se ha llevado a cabo una comparación píxel-pluviómetro. En los casos en los que más de un pluviómetro interseca con un píxel del QPE se emplea el valor medio de los pluviómetros.

Se han calculado estadísticos capaces de informar sobre el grado de acuerdo y de asociación lineal entre los valores de los pluviómetros y de los QPEs. Estos son las diferencias $dif_i = QPE_i - PLUV_i$, siendo $PLUV_i$ la precipitación estimada por un pluviómetro dado durante una hora y QPE_i la precipitación estimada por el QPE en el píxel que interseca con la localización del pluviómetro anterior en la misma hora.

La precipitación media de los pluviómetros ($mPLUV$), la precipitación media del QPE ($mQPE$), la raíz cuadrada de la diferencia media cuadrática ($RMSD$), el sesgo, el coeficiente de correlación lineal de Pearson (R) y el $RMSD$ relativo como $rRMSD = RMSD/mPLUV$.

3. RESULTADOS

En la tabla 1 (parte superior) se presentan los estadísticos calculados para conocer el grado de acuerdo y de asociación lineal entre los valores de los pluviómetros y los píxeles de los QPE. La columna de observaciones indica el número de parejas de valores de precipitación tenidos en cuenta en el cálculo de los estadísticos.

Analizando con mayor detalle el evento de septiembre de 2009, se pueden destacar algunos resultados. El $RMSD$ de toda el área de estudio es moderado, 2.9 mm/h . Los valores relativos de $RMSD$ indican que el estadístico es 2.2 veces el valor medio de la precipitación de la red de pluviómetros. El radar ofrece indicadores de acuerdos peores cuando se analizan los pluviómetros ubicados en las cuencas más afectadas por la tormenta. Cuando se trata de los totales acumulados de los pluviómetros y de los píxeles que intersectan con estos ($sumPLUV$ y $sumQPE$) los problemas de subestimación quedan patentes: en un caso (pluviómetro 02A01) el radar solo registra 12 mm cuando el pluviómetro registra 121 mm. En los otros dos pluviómetros las diferencias no son tan abultadas, pero sí son importantes: en el pluviómetro 07A03 el radar estima el 41 % de lo registrado por el pluviómetro, y en el pluviómetro 07A04 este valor desciende al 30 %. Con respecto a los valores del sesgo, los resultados indican que cuando se atiende a los datos de toda el área de estudio, al finalizar el evento los valores subestimados compensan los sobreestimados. No sucede así cuando el análisis desciende a escala de cuenca. Al menos en la cuenca situada al sur de la rambla del Albujón el QPE subestima como media 2.5 mm/h . Los coeficientes de correlación en todos los ámbitos, menos en las cuencas litorales al NE de la rambla del Albujón, están por encima de 0.45, con lo que se puede hablar de existencia de correlación positiva.

Para el evento de 2016 (tabla 1, parte inferior), se dispone de un número mayor de pluviómetros debido a la ampliación de la red SAIH-Segura. En un primer análisis los valores de $RMSD$ son similares a los del episodio de 2009. En este caso también se tiende a subestimar la precipitación. Los valores de correlación también son similares a los del episodio de 2009, siendo esta positiva. La estimación de radar en la localización de los pluviómetros (comparación puntual) de nuevo indica subestimación del radar.

Para entender mejor los datos que han dado lugar a los estadísticos presentados en la tabla se han creado unos gráficos de dispersión en los que en el eje de abscisas se representa la precipitación estimada por los QPE y en el de ordenadas la precipitación registrada por los pluviómetros (figura 2). También se han dibujado las rectas $y=x$, de forma que todos los puntos que queden por debajo de esta recta corresponden a $dif_i > 0$, por lo que utilizando $PLUV_i$ como referencia estos puntos corresponderían a sobreestimaciones de la precipitación de las QPE y viceversa.

Los colores de los puntos de la figura indican la magnitud de la diferencia observada. Para facilitar la visualización de los gráficos solo se han representado las

parejas de puntos en los que bien QPE_i bien $PLUV_i$ presentan valores iguales o superiores a uno.

Si tenemos en cuenta el evento de 2009, tratando toda el área de estudio, pero excluyendo las cuencas costeras situadas al sur de la rambla del Albuñón, se aprecia gráficamente que la asociación lineal entre las dos estimaciones es débil. Hay muchos valores que se encuentran por encima de la recta $y=x$. Con respecto a los puntos que $|difi| < 2.5$ (puntos verdes) suponen el 68.7 % de los puntos. Si centramos el análisis en las cuencas costeras al sur de la rambla del Albuñón (donde se alcanzaron las mayores acumulaciones de precipitación) igualmente se aprecia la ausencia de correlación lineal entre las dos estimaciones. Hay un número importante de casos cuya diferencia es superior a 2.5 mm/h e intensidades muy altas, por encima de 40 mm/h, son estimadas en 2, 3, 5 o 11 mm/h.

Evento de 2009, 27 y 28 de septiembre										
Nom	nº pluviom.	Obs.	mQPE	mPLUV	RMSD	rRMSD	Sesgo	R	sumQPE	sumPLUV
S. Al	5	220	2.5	5	7.9	1.6	-2.5	0.46	--	--
Al	6	264	1.8	2.9	4.2	1.4	-1.1	0.49	--	--
NE. Al	5	220	1.2	2.6	4.6	1.8	-1.4	0.29	--	--
O2A01	1	44	0.3	2.8	4.2	1.5	-2.5	0.69	12	121
O7A03	1	44	1	2.5	4.8	1.9	-1.5	0.48	45	110
O7A04	1	44	1.3	4.2	8.8	2.1	-2.9	0.68	56	185
Total	108	4752	0.8	1.3	2.9	2.2	-0.5	0.5	--	--
Evento de 2016, del 17 al 19 de diciembre										
Nom	nº pluviom.	Obs.	mQPE	mPLUV	RMSD	rRMSD	Sesgo	R	sumQPE	sumPLUV
Al	11	737	0.8	2.4	4.2	1.8	-1.6	0.29	--	--
NE. Al	5	335	1	3.1	5.8	1.9	-2.1	0.42	--	--
G-Re	7	469	1.3	2.6	3.2	1.2	-1.3	0.58	--	--
O1A02	1	67	1.5	2.5	3	1.2	-1	0.61	104	168
O7E01	1	67	1	2.7	6	2.2	-1.8	0.3	67	184
P142818	1	67	0.8	3	5.7	1.9	-2.2	0.15	53	198
Total	151	10117	1.0	1.6	2.7	1.6	-0.7	0.43	--	--

Tabla 1: Estadísticos de las diferencias observadas entre los pluviómetros y los píxeles correspondientes del QPE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET, IMIDA y CHS. Nom: nombre de la cuenca o del pluviómetro; Obs.: número de observaciones. Los estadísticos se pueden consultar en el apartado 2 y los nombres y la localización de las cuencas en la figura 1.

En el evento de 2016, si atendemos a toda el área de estudio, los resultados son parecidos a los del evento de 2009. Puntos con $|difi| < 2.5$ representan el 67.1 %.

Centrándose en las cuencas costeras al norte de la rambla del Albuñón se repiten las pautas de las cuencas analizadas en el episodio de 2009.

De cara a realizar una correcta validación es conveniente visualizar un mapa de las acumulaciones de precipitación de todo el evento y contrastarlo con otro mapa que indique las diferencias observadas. Para tal fin se han elaborado las figuras 3 y 4. La primera es un conjunto de mapas de acumulación de precipitación en cada evento analizado. Por otro lado, se dispone de diferencias puntuales de estimación entre el

QPE y el pluviómetro correspondiente. Para pasar de esta capa de puntos a una superficie continua se han interpolado estas diferencias mediante un Kriging ordinario. Para elegir el modelo de semivariograma se ha empleado un ajuste automático propuesto en el paquete de geoestadística de R *gstat* (Pebesma, 2004). La estimación de precipitación del radar para el episodio de 2009 parece que se distribuye en franjas horizontales en las que los valores más altos se concentran en la latitud de la línea de costa de la Región de Murcia y van descendiendo hacia el norte y hacia el sur. El valor máximo de acumulación del radar en este episodio es de 154 mm y la media es de 30.7 mm. Con respecto a la interpolación de las diferencias (figura 4 a), muestra unas subestimaciones muy importantes en Cartagena y desembocadura del río Segura, mientras que estos valores tienden a descender en dirección noroeste. Hay un pequeño núcleo de sobreestimación en torno a la ciudad de Lorca.

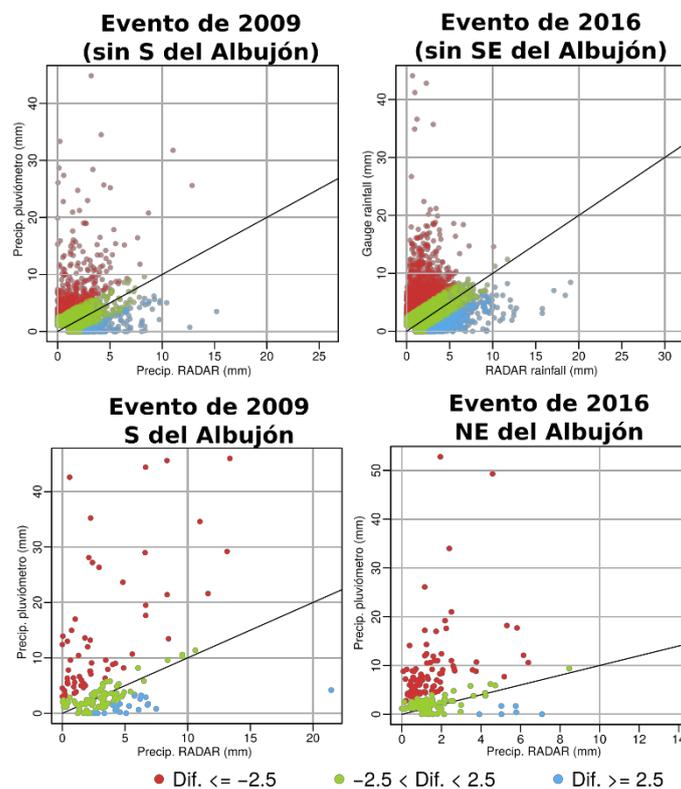


Fig. 2: Gráficos de dispersión de la lluvia registrada por el pluviómetro (Y) versus la lluvia estimada por le QPE (X) durante el evento de 2009 y de 2016. Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET, IMIDA y CHS.

En la figura 3 b y c se tienen las acumulaciones de precipitación del evento de 2016. El radar sitúa las mayores acumulaciones en el centro del área de estudio. Con respecto a las diferencias (figura 4 b) las mayores diferencias se localizan en los

municipios del Mar Menor, donde las consecuencias de las precipitaciones fueron mayores.

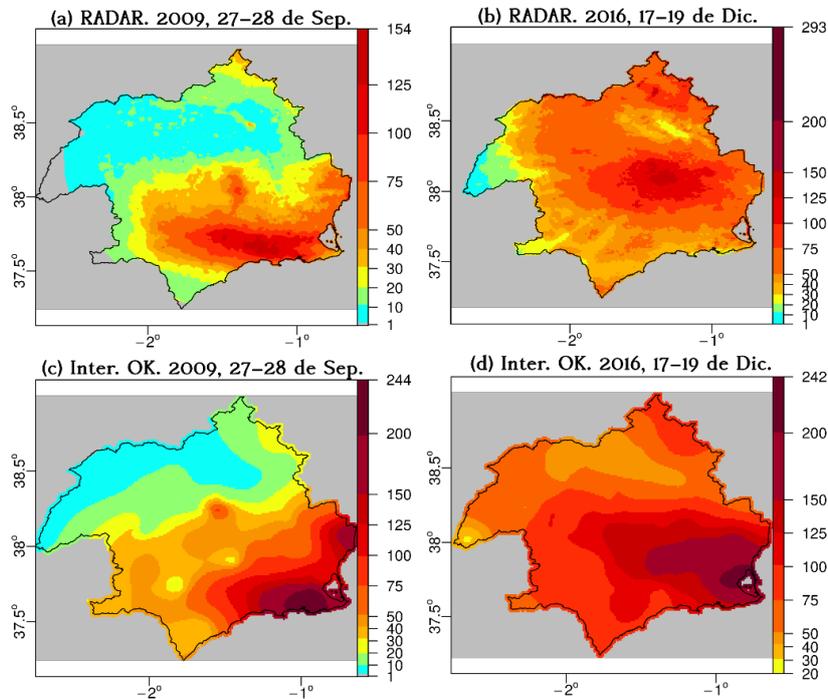


Fig. 3: Mapas de acumulación de precipitación (en mm) de los dos eventos. Los mapas de la parte superior (a y b) corresponden a las estimaciones del radar, los de la parte inferior (c y d) a la interpolación por Kriging ordinario de los valores de precipitación de los pluviómetros. Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET, IMIDA y de CHS.

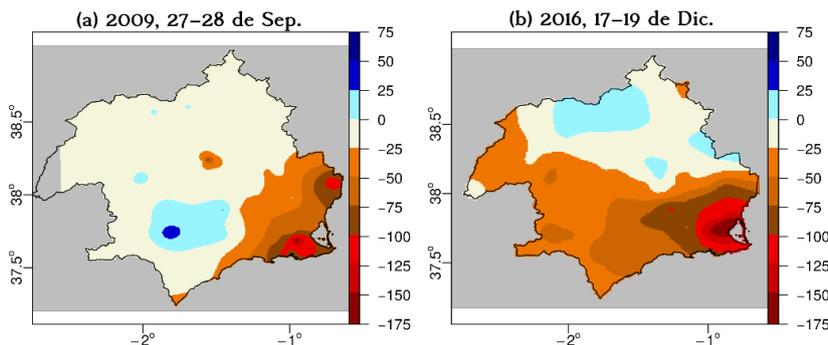


Fig. 4: Mapas de interpolación por Kriging ordinario de las diferencias en los totales de acumulación (QPE - Pluviómetro) en el evento de 2009 (a) y en el evento de 2016 (b), en mm. Fuente: elaboración propia a partir de datos de AEMET, IMIDA y CHS.

4. DISCUSIÓN

Se ha llevado a cabo una comparación de las imágenes de precipitación obtenidas por un radar meteorológico con dos redes de pluviómetros durante eventos de precipitación muy intensa sucedidos en el sureste de la Península Ibérica en la última década. El objetivo ha sido conocer si el radar meteorológico sin calibración empírica puede funcionar como una herramienta de monitoreo independiente frente a una posible contingencia. En este sentido los resultados de los dos eventos han sido similares, asumiendo la información de los pluviómetros como veraz, el radar sin calibración empírica a partir de pluviómetros no parece que ofrezca estimaciones aceptables para el monitoreo en tiempo real de fenómenos de precipitaciones intensas tales como los sucedidos en el sureste de la Península Ibérica en septiembre de 2009 y diciembre de 2016. Se ha comprobado como a mayor intensidad de precipitación aumenta el desacuerdo entre los dos valores de precipitación. Cuando se manejan datos agregados (tabla 1) se aprecia que los estadísticos de acuerdo relativo $rRMSD$ son superiores a la precipitación media. Si se analizan datos desagregados (las diferencias de un pluviómetro concreto con el píxel con el que este interseca espacialmente) se aprecia que las diferencias entre las dos estimaciones son muy importantes. Con respecto a la subestimación de las QPE, hemos comprobado que es muy elevada cuando las medidas de precipitación registradas por los pluviómetros también son muy altas.

Este trabajo se apoya en una red de pluviómetros que no ha sido distribuida de forma aleatoria o regular en el territorio. Por la propia naturaleza sectorial de las dos redes de pluviómetros empleadas están excesivamente representadas las áreas de cultivos de regadío, los fondos de los valles, las llanuras litorales y los lugares donde existen infraestructuras hidráulicas relevantes en la gestión de avenidas e inundaciones, principalmente embalses. Por otro lado, las zonas boscosas, de matorral, la parte alta de la cuenca y las cimas de las montañas quedan poco representadas. Desconocemos de qué forma esta sobrerrepresentación de algunos tipos de paisaje puede influir en el sesgo de los estadísticos de acuerdo empleados en la investigación.

Los QPE analizados no reproducen la variabilidad espacio-temporal de los eventos de precipitación analizados. Sin embargo, es posible que puedan servir como predictores en el proceso de interpolación de precipitación horaria empleando algoritmos de regresión provenientes del aprendizaje automático.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de un contrato posdoctoral financiado por el programa Saavedra Fajardo de la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (Ref. 20023/SF/16) de la Consejería de Educación y Universidades de la CARM (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia). Se agradece también la disponibilidad de información de la Confederación Hidrográfica del Segura y del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA) de la CARM. La información del radar meteorológico ha sido suministrada por AEMET, Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. Los autores agradecen a Luis Bañón Peregrín,

Juan Manzano Cano y José Miguel Gutiérrez (AEMET) por su ayuda en la interpretación de los productos de precipitación del radar meteorológico.

REFERENCIAS

- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards*, 42, 125-148. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9065-2>
- Castejón Porcel, G. y Romero Díaz, A. (2014). Inundaciones en la Región de Murcia en los inicios del siglo XXI. *Biblio 3W. Revista bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 19, 1-40. Recuperado de:
- Gomariz-Castillo, F.; Alonso-Sarría, F. y Cabezas-Calvo-Rubio, F. (2017). Calibration and spatial modelling of daily ET0 in semiarid areas using Hargreaves equation. *Earth Science Informatics*. doi: <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0327-1>
- Hong, Y.; Hsu, K.-L.; Sorooshian, S. & Gao, X. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1834-1852. doi: <https://doi.org/10.1175/JAM2173.1>
- <https://web.ua.es/es/giecryal/documentos/castejon-romero.pdf>
- López-Martínez, F.; Gil-Guirado, S. y Pérez-Morales, A. (2017). Who can you trust? Implications of institutional vulnerability in flood exposure along the Spanish Mediterranean coast. *Environmental Science and Policy*, 76, 29-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2017.06.004>
- Miao, C.; Ashouri, H.; Hsu, K.-L.; Sorooshian, S. & Duan, Q. (2015). Evaluation of the PERSIANN-CDR Daily Rainfall Estimates in Capturing the Behavior of Extreme Precipitation Events over China. *Journal of Hydrometeorology, American Meteorological Society*, 16, 1387-1396. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-14-0174.1>
- Nikolopoulos, E. I.; Anagnostou, E. N. & Borga, M. (2013). Using High-Resolution Satellite Rainfall Products to Simulate a Major Flash Flood Event in Northern Italy. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 171-185. doi: [10.1175/JHM-D-12-09.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-09.1)
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the *gstat* package. *Computers & Geosciences*, 30, 683-691. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>
- Pellicer-Martínez, F. y Martínez-Paz, J. M. (2018). Probabilistic evaluation of the water footprint of a river basin: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Science of the Total Environment*, 627, 28-38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.223>
- Sun, Q.; Miao, C.; Duan, Q.; Sorooshian, S. y Hsu, K.-L. (2018). A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56. doi: <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>