

1 **RESULTADOS PRELIMINARES DE LA RED DE PLUVIÓMETROS TOTALIZADORES INSTALADOS EN LA**
2 **SIERRA DE SEGURA (PROVINCIAS DE GRANADA Y JAÉN). IMPLICACIONES PARA LA EVALUACIÓN DE**
3 **LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS**

4
5 Alejandro Carrasco Martín ⁽¹⁾, Juan José Rovira Medina ⁽¹⁾, Matías Mudarra Martínez ⁽¹⁾, Víctor Juan
6 Cifuentes Sánchez ⁽²⁾, David González Rojas ⁽²⁾, Bartolomé Andreo Navarro ⁽¹⁾

7
8 (1) Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Edificio de investigación Ada Byron.
9 C/Arquitecto Francisco Peñalosa, 18. 29010, Málaga. alejandro.cm@uma.es; juanjrm@uma.es;
10 mmudarra@uma.es; andreo@uma.es

11 (2) Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Plaza de España,
12 Sector II y Sector III.41071, Sevilla. vjcifuentes@chguadalquivir.es; dgonzalez@chguadalquivir.es

13
14
15 **RESUMEN**

16 La Sierra de Segura y los relieves adyacentes conforman una amplia región natural sin excesivas
17 modificaciones antrópicas, que presenta grandes espacios con total ausencia de estaciones
18 meteorológicas. Las estaciones existentes pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y
19 al Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), establecido por el Ministerio para la
20 Transición Ecológica como herramienta de control para las confederaciones hidrográficas, y todas ellas
21 se sitúan en el entorno de núcleos urbanos o infraestructuras hidráulicas. Esto limita su
22 representatividad, ya que dichos emplazamientos se localizan mayormente en la periferia de los
23 grandes macizos montañosos. Por este motivo, se ha desplegado una amplia red control formada por
24 pluviómetros totalizadores de bajo coste y fabricación personal que, además de totalizar el volumen
25 de lluvia, permite la toma de muestras de agua para el estudio de la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$)
26 de las aguas de precipitación. Los pluviómetros han sido distribuidos sobre las áreas de recarga de los
27 acuíferos que son drenados por los principales manantiales de la Sierra de Segura, con el fin de
28 compensar la falta de información localizada y precisar las entradas al acuífero, lo cual es relevante
29 para afrontar el actual escenario de cambio climático en el que nos encontramos.

30
31 Palabras clave: Sierra de Segura, estaciones meteorológicas, pluviómetros totalizadores, control
32 hidrometeorológico

33
34
35 **1. INTRODUCCIÓN**

36 Los acuíferos carbonáticos abastecen hasta el 25 % de la población mundial y en muchas regiones del
37 mundo son la única fuente de agua dulce disponible (Ford & Williams, 2007). Este dato ilustra la
38 importancia de dicho tipo de acuíferos y la necesidad de desarrollar metodologías que permitan una
39 evaluación precisa y fiable de sus recursos hídricos, máxime en la actual situación de escasez de agua
40 y cambio global (ICPP, 2013; 2021). Los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (provincias de
41 Granada, Jaén y Albacete) juegan un papel fundamental como reservas estratégicas de agua
42 subterránea en la cabecera de las demarcaciones hidrográficas de los ríos Segura y Guadalquivir, con
43 implicaciones en la gestión de los recursos hídricos y en la conservación ambiental de los ecosistemas
44 dependientes. Se trata de una región natural con 3000 km² de superficie aproximada, caracterizada
45 por presentar una topografía agreste (rango altitudinal comprendido entre 500 y 2136 m s.n.m.), que
46 incluye valles profundos, con laderas escarpadas, y amplias zonas con topografía más suave situadas
47 en las zonas elevadas (altiplanos).

48 Las características orográficas indicadas hacen que el número de estaciones meteorológicas
49 pertenecientes a las redes oficiales existentes en la Sierra de Segura y en los relieves adyacentes sea
50 limitado, con una densidad baja o muy baja según zona, lo que conlleva incertidumbre en el cálculo de
51 la distribución espacial -y temporal- de la precipitación que realmente cae en la región. Además, buena
52 parte de la precipitación se produce en forma de nieve, lo que puede acarrear errores por defecto en
53 los datos de aquellas estaciones que no dispongan de instrumental específico para el registro de este
54 meteoro. La ausencia de estaciones meteorológicas representativas es especialmente manifiesta en el
55 sector central de la Sierra de Segura, una altiplanicie de 121 km² que incluye los denominados “Campos
56 de Hernán Pelea”, donde debe concentrarse buena parte de la recarga a los acuíferos de la región,
57 dado el desarrollo significativo del modelado kárstico y el predominio de morfologías endorreicas.

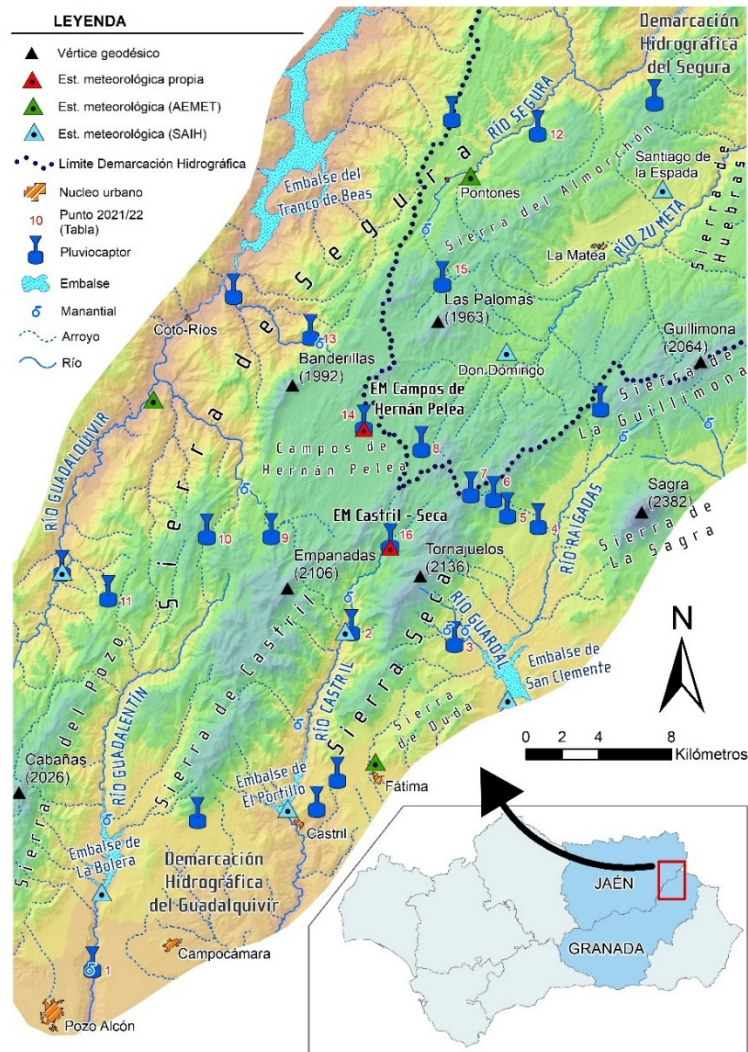
58 En el marco del Convenio firmado entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Centro de
59 Hidrogeología de la Universidad de Málaga (BOE nº 271, de 12 de noviembre de 2021) se está
60 profundizando en el conocimiento hidrogeológico de la Sierra de Segura y de los relieves adyacentes.
61 Entre los objetivos del convenio está el de cuantificar los recursos hídricos subterráneos, con especial
62 énfasis en las potenciales transferencias de recursos entre acuíferos y entre las demarcaciones
63 hidrográficas de las cuencas del Guadalquivir (MASb Quesada-Castril) y del Segura (MASb Machada y
64 MASb Fuente Segura - Fuensanta), y establecer el balance hídrico para cada sistema hidrogeológico
65 identificado. Con el fin de alcanzar los objetivos indicados, entre otras actividades, se ha desplegado
66 una red de pluviómetros totalizadores en la región que, unido a la instalación en 2021 de dos
67 estaciones meteorológicas diseñadas especialmente para zonas de montaña, permitirá un registro más
68 preciso de la cantidad de precipitación (lluvia/nieve) caída sobre los acuíferos de la Sierra de Segura.

69 En el presente trabajo se muestran los resultados preliminares de cantidad de precipitación y datos
70 isotópicos de las muestras de agua tomadas en la red de pluviómetros desplegada en la Sierra de
71 Segura, durante el año hidrológico 2021/22 (seco desde el punto de vista meteorológico). Se describen,
72 además, las características constructivas de los dispositivos utilizados y se analizan los problemas
73 detectados durante las medidas. Se comparan también los valores de precipitación obtenidos con los
74 registrados en una estación meteorológica de referencia instalada en los Campos de Hernán Pelea en
75 el marco del Convenio CHG-UMA. El objetivo último es conocer la distribución espacial y temporal de
76 las precipitaciones en el área de estudio y las características isotópicas del agua de precipitación, así
77 como los factores condicionantes, lo que permitirá realizar una evaluación más precisa de los recursos
78 hídricos subterráneos y establecer las áreas de recarga de los diferentes manantiales responsables del
79 drenaje natural de los acuíferos.

80 81 2. ÁREA DE ESTUDIO

82 La Sierra de Segura -principal relieve de la región- y los relieves adyacentes (sierras de La Guillimona,
83 Castril, Pozo, Seca) corresponden, a grandes rasgos, al conjunto de afloramientos carbonáticos
84 localizados entre las provincias de Granada y Jaén. Estos macizos presentan una orientación geográfica
85 preferente NE-SO y se extienden a lo largo de 60 km, desde la localidad de Pozo Alcón, en el extremo
86 SO, hasta la confluencia de los ríos Segura y Zumeta, en el borde NE (Figura 1). Esta región constituye
87 la cabecera de cauces pertenecientes a las demarcaciones hidrográficas de los ríos Guadalquivir y
88 Segura.

89



90
 91 Figura 1. Mapa de localización del área de estudio con la red de pluviómetros, estaciones climáticas del CEHIUMA
 92 y estaciones meteorológicas de redes oficiales (AEMET y SAIH). Se muestra también la ubicación de los
 93 manantiales principales

94 Los afloramientos de calizas y dolomías de edad Cretácico del ámbito de estudio, permeables por
 95 fisuración y karstificación, están limitados al O por el río Guadalquivir; al N por el río Segura; al E por
 96 la sierra de Huebras, el río Raigadas y el macizo de La Sagra; y al S por la sierra del Pozo, el río
 97 Guadalestín y la depresión de Guadix-Baza (Figura 1). La recarga de los acuíferos se produce por
 98 infiltración del agua de precipitación (lluvia y nieve), sobre todo en las áreas de mayor cota, sobre el
 99 altiplano segureño. Por su parte, el drenaje natural de los acuíferos tiene lugar de manera puntual en
 100 las surgencias localizadas en la periferia del conjunto montañoso y de forma difusa hacia los cauces de
 101 la región.

102 La Sierra de Segura se caracteriza por un clima de tipo mediterráneo con matices continentales y
 103 de montaña, donde los inviernos son húmedos y fríos y los veranos suaves y secos (CEHIUMA-IGME,
 104 2021). La distribución temporal de la precipitación presenta una notable estacionalidad: las
 105 precipitaciones ocurren principalmente durante los meses de otoño, invierno y primavera, mientras
 106 que en los meses de verano apenas se registran lluvias. La orografía constituye un condicionante
 107 fundamental en la distribución de las precipitaciones y de las temperaturas. En las zonas altas, las
 108 nevadas son frecuentes y persistentes durante los meses de invierno. Las principales alineaciones
 109 montañosas de la Sierra de Segura (NNE-SSO) ejercen de barrera frente a los vientos húmedos
 110 predominantes procedentes del océano Atlántico (Cruz-Sanjulián et al., 1992). Esto origina gradientes

111 pluviométricos pronunciados en las vertientes montañosas orientadas a barlovento, mientras que en
112 las laderas orientadas a sotavento la precipitación es más baja (Castillo, 1988; Moral, 2005).

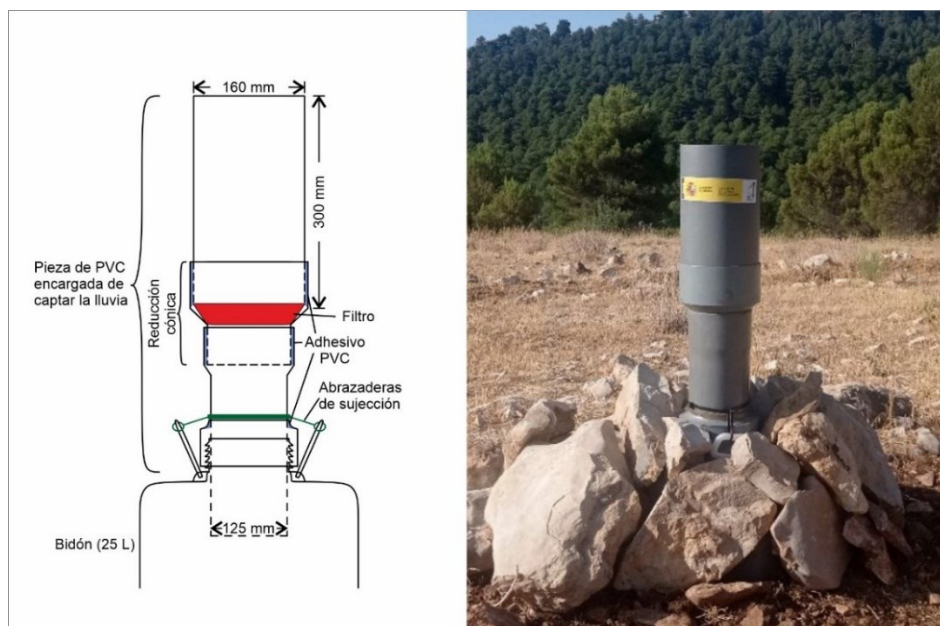
113 La escasez de estaciones en la red oficial de control meteorológico existente en la sierra de Segura
114 ha limitado los estudios de caracterización climatológica de la región, esencialmente en el altiplano y
115 áreas de mayor cota. En la actualidad existen diez estaciones meteorológicas activas pertenecientes a
116 diversos organismos que cubren un rango de altitudes comprendido entre 936 m s.n.m. (embalse de
117 El Portillo) y 1544 m s.n.m. (Don Domingo). Las estaciones se encuentran principalmente en pequeños
118 municipios localizados en los valles de los ríos Castril, Segura, Zumeta y Guadalquivir y en los embalses
119 que regulan sus aguas (Figura 1). Estas 10 estaciones forman parte de la red de la Agencia Estatal de
120 Meteorología (AEMET) y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), tanto de la
121 Confederación Hidrográfica del Guadalquivir como de la del Segura.

122 3. METODOLOGÍA

123 3.1. Diseño de los dispositivos totalizadores

125 La red de control pluviométrico desplegada en la Sierra de Segura está formada por 22 dispositivos
126 totalizadores, que actúan igualmente como pluviómetros totalizadores, fabricados a partir de la unión
127 de piezas de policloruro de vinilo (PVC), adaptadas para conformar el dispositivo final (Figura 2). El
128 depósito acumulador de agua de cada uno de los pluviómetros totalizadores consiste en un bidón de
129 25 litros de capacidad al que se le ha acoplado una pieza -colectora- formada por varios tubos
130 encargados de captar el agua de precipitación.

131 La pieza colectora cuenta con dos tubos de PVC unidos entre sí (Figura 2). La parte inferior tiene
132 125 mm de diámetro externo para una correcta adaptación con la boca del bidón (diámetro interno
133 de 125 mm). La parte superior, encargada de captar la lluvia y dirigirla hacia el interior, presenta un
134 diámetro de 160 mm (semejante a la medida estándar usada en los dispositivos totalizadores vendidos
135 de manera comercial) y longitud mínima de 300 mm, con el fin de otorgar espacio suficiente en caso
136 de que la precipitación ocurra en forma de nieve. Ambas piezas se han unido herméticamente y fijado
137 con un material adhesivo con la ayuda de una reducción cónica a modo de embudo. De manera
138 adicional, se ha incorporado un filtro interno de poliéster con una luz de 500 μm para evitar la caída
139 de insectos o cualquier elemento externo al interior del totalizador.



140
141 Figura 2. Esquema con el diseño constructivo del dispositivo totalizador e imagen real de uno ubicado en campo

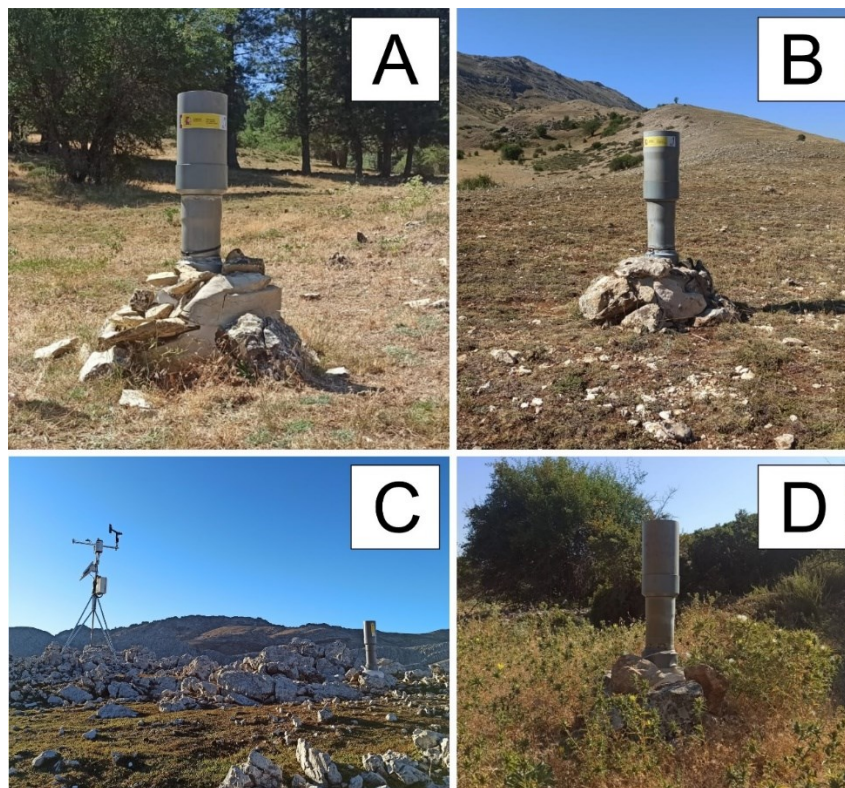
142 Una vez ensambladas las diferentes componentes de la pieza colectora superior es introducida unos
143 15 cm dentro del bidón. El diámetro externo de la pieza de PVC debe de ser igual al diámetro interno
144 de la boca del bidón para evitar vibraciones en caso de fuertes vientos. La pieza superior dispone de
145 una adaptación a modo de protección que cubre la boca del recipiente y evita así la entrada de agua
146 exterior por condensación o por lluvias con trayectoria oblicua. Finalmente, las dos piezas de los
147 pluviómetros son fijadas con la ayuda de bridas o abrazaderas metálicas a las asas que incorpora cada
148 bidón.

149 Se han tomado otras precauciones adicionales durante el manejo de los dispositivos para evitar la
150 evaporación del agua, la pérdida de volumen y, por ende, la alteración de las características
151 hidroquímicas e isotópicas del agua. Esto se consigue con la adición de un centímetro de parafina
152 líquida a cada recipiente vacío, con la finalidad de que quede siempre por encima del agua dada la
153 diferencia de densidades. Los bidones son enterrados en la medida de lo posible para minimizar la
154 incidencia del sol. En caso de ausencia de suelos bien desarrollados se han rodeado de rocas hasta
155 quedar cubiertos (Figura 3). Una vez tomadas las lecturas en cada muestreo, se vuelve a añadir
156 parafina para que adquiera aproximadamente el espesor inicial.

157

158 3.2. Red de muestreo y periodicidad de medida

159 El principal criterio seguido a la hora de establecer la ubicación final de los totalizadores fue cubrir
160 áreas desprovistas de estaciones meteorológicas, con el fin de conocer la cantidad de lluvia y calcular
161 de la manera más precisa posible los gradientes pluviométricos e isotópicos. Los primeros 14
162 dispositivos fueron desplegados en octubre de 2021 (Tabla 1) y han permitido, junto con los datos de
163 las estaciones meteorológicas de redes oficiales y propias, dibujar las isoyetas para el año hidrológico
164 2021/2022. Los dispositivos cubren un intervalo altitudinal comprendido entre 761 y 1863 m s.n.m.



165

166 Figura 3. Ejemplos de pluviómetros totalizadores instalados en diferentes ubicaciones de la Sierra de Segura. A)
167 dispositivo en Rambla Seca (Figura 1, punto 9). B) totalizador ubicado en Cañada Cruz, al norte del pico de “Las
168 Palomas” (Figura 1, punto 15). C) estación meteorológica automática situada entre las sierras de Castril y Seca,
169 junto a uno de los pluviómetros (Figura 1, punto 16). D) dispositivo emplazado en Poyotello (Figura 1, punto 12)

170 Para la instalación en campo se han seguido algunas de las recomendaciones establecidas por la
 171 “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) y la AEMET, que persiguen optimizar el
 172 rendimiento de cada dispositivo:

- 173 - boca del pluviómetro circular con 160 mm de diámetro (aproximadamente 200 centímetros
- 174 cuadrados),
- 175 - filtro interior para evitar entrada de elementos externos como ramas o insectos,
- 176 - colocación del dispositivo completamente nivelado con el suelo para que la entrada se
- 177 encuentre en posición horizontal,
- 178 - ubicación en zonas abiertas, separado lo más posible de árboles u otros obstáculos que puedan
- 179 distorsionar la medida de la precipitación,
- 180 - instalación a una altura de 1,2 a 1,8 metros sobre el suelo, alejado de objetos cercanos que
- 181 puedan producir salpicaduras y alterar las medidas,
- 182 - dos de los totalizadores han sido instalados en las inmediaciones de sendas estaciones
- 183 meteorológicas de referencia diseñadas especialmente para zonas de montaña.

#	Ladera	Denominación	Demarcación	Coordenadas UTM		Cota (m s.n.m.)	nº muestras	Composición isotópica						
				X	Y			Precipitación		Ponderada		Media aritmética		
								P total (mm)	P media (mm)	Med. $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Med. $\delta^2\text{H}$ (‰)	Med. $\delta^{18}\text{O}$ (‰)	Med. $\delta^2\text{H}$ (‰)	
1	SOT	Molino de Peralta	Guadalquivir	507965	4175153	761	12	245	25	-7,41	-44,32	-5,71	-34,87	
2	SOT	Juan Ruíz	Guadalquivir	522200	4193696	1187	12	700	64	-7,44	-42,93	-6,59	-39,53	
3	SOT	Fuente Alta	Guadalquivir	527867	4193053	1182	12	391	36	-7,45	-44,14	-7,17	-42,43	
4	SOT	Peñon del Toro 1	Guadalquivir	532482	4199540	1307	11	473	43	-7,45	-44,13	-6,88	-40,92	
5	SOT	Peñon del Toro 2	Guadalquivir	530775	4200133	1534	11	1063	97	-7,52	-43,08	-6,98	-40,52	
6	SOT	Peñon del Toro 3	Guadalquivir	530023	4201020	1725	11	725	66	-8,33	-47,53	-7,97	-46,33	
7	SOT	Peñon del Toro 4	Guadalquivir	528766	4201278	1863	11	658	60	-7,98	-43,82	-7,48	-41,96	
8	SOT	Pino Galapán	Segura	526047	4203781	1752	12	725	60	-8,10	-45,83	-7,84	-45,68	
9	Central	Rambla Seca	Guadalquivir	517795	4198990	1568	11	793	62	-8,25	-46,30	-7,89	-42,63	
10	BAR	Aguasnegras	Guadalquivir	514248	4198970	1476	10	1022	93	-8,41	-46,63	-7,48	-44,49	
11	BAR	Navas de San Pedro	Guadalquivir	508822	4195569	1452	10	673	61	-8,83	-50,17	-8,32	-47,02	
12	Central	Poyotello	Segura	532454	4221160	1445	11	796	72	-7,83	-43,33	-7,59	-44,30	
13	BAR	Aguamula	Guadalquivir	519957	4209938	1093	10	985	90	-7,40	-41,56	-6,54	-37,88	
14	Central	EM Campos de Hernán Pelea	Guadalquivir	522891	4204946	1755	11	650	60	-8,09	-44,19	-7,36	-42,65	
Total								155	707	64	-7,89	-44,85	-7,27	-42,23
Media														

184
 185 Tabla 1. Características principales de los dispositivos totalizadores instalados en el área de estudio en octubre
 186 de 2021. Coordenadas, valores de precipitación (mm) y composición isotópica (‰) -media aritmética y
 187 ponderada por la cantidad de precipitación. SOT = Sotavento; BAR = Barlovento; Central = Área central de la
 188 sierra

189 En general, la periodicidad de medida y el muestreo de agua de precipitación ha sido mensual. En cada
 190 campaña y en cada uno de los puntos se ha medido el volumen de agua almacenada y se ha tomado
 191 una muestra. En primer lugar, el agua es succionada con la ayuda de una bomba de extracción manual
 192 o de pipetas y almacenada en botellas de cristal de topacio para su transporte y posterior análisis
 193 isotópico en el laboratorio del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga.

194 Los valores de los isótopos de la molécula de agua ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) se han medido mediante un analizador
 195 isotópico de agua de la marca PICARRO, modelo L2120i-CRS. Los datos isotópicos mostrados en la
 196 presente comunicación aparecen tanto sin ponderar como ponderados por la cantidad total de
 197 precipitación recogida en cada dispositivo durante el año 2021/22. La ponderación es ampliamente
 198 empleada en regiones montañosas similares a la Sierra de Segura (Scholl et al., 2009; Moreno et al.,
 199 2021). Se basa en el precepto de que los valores isotópicos de la lluvia dependen no solo de la altitud,
 200 temperatura y origen del frente lluvioso, sino también de la cantidad de precipitación.

201 El volumen de precipitación acumulado en cada pluviómetro es medido *in situ* con la ayuda de una
 202 probeta graduada. Una vez realizada la medida, la parafina es reutilizada salvo que muestre
 203 degradación, en cuyo caso se recicla convenientemente y es sustituida por un volumen nuevo.

204 Tras revisar los resultados obtenidos para el año hidrológico 2021/2022 se decidió ampliar la red de
205 totalizadores hasta un total de 22, con objeto de mejorar la representatividad espacial de la
206 información hidrometeorológica y como apoyo en el cálculo de gradientes pluviométricos. La
207 ubicación de los 22 dispositivos aparece reflejada en la figura 1.

208 209 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

210 Durante el año hidrológico 2021/22 se han realizado 12 campañas de muestreo (155 muestras) a final
211 o a comienzos de cada mes. Para comprobar la representatividad de las medidas, uno de los
212 totalizadores fue intencionadamente situado en las proximidades (a 10 metros) de una estación
213 meteorológica automática instalada en los Campos de Hernán Pelea (Figura 1). Los datos de
214 precipitación mensual obtenidos en este totalizador han sido comparados con los datos pluviométricos
215 registrados en dicha estación durante el mismo periodo temporal. La figura 4 muestra el ajuste
216 obtenido entre los datos de la estación automática y los del pluviómetro ubicado en sus proximidades
217 durante el año 2021/22.

218 El valor del coeficiente de correlación obtenido al comparar los 11 datos de volumen medido en el
219 totalizador y los registrados por la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea es 0,98. Se
220 estima que las leves variaciones que se observan en algunos datos respecto a la línea de un ajuste 1:1
221 se deben a errores producidos en épocas donde la precipitación tuvo lugar en forma de nieve, lo que
222 pudo alterar levemente la medida.

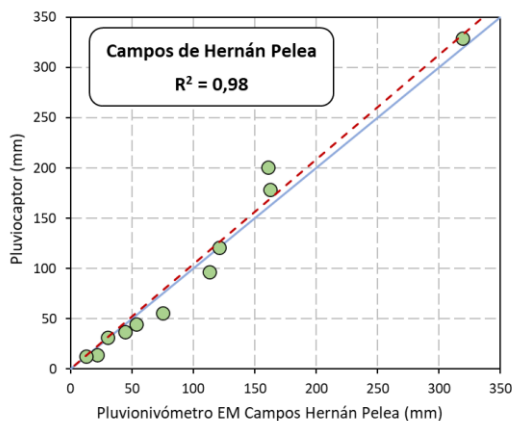


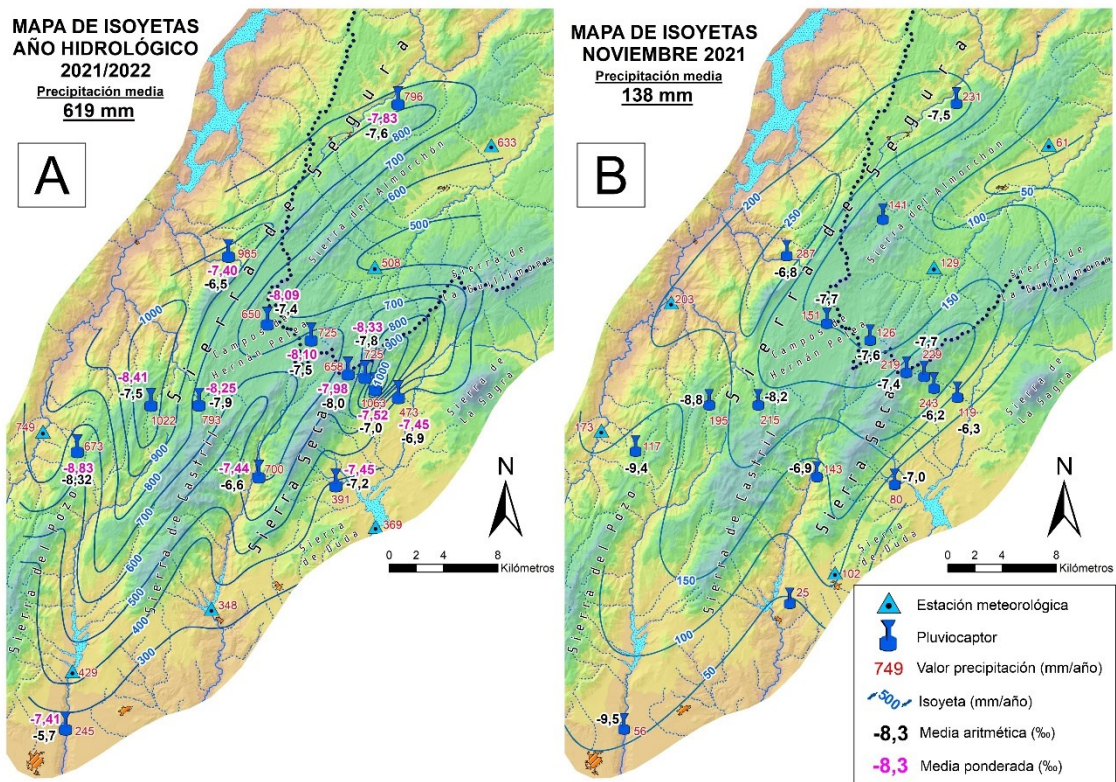
Figura 4. Comparación de los datos pluviométricos registrados en la estación meteorológica de los Campos de Hernán Pelea frente a la precipitación mensual obtenida en el pluviómetro adyacente. La ubicación se puede consultar en la figura 1

236 En la tabla 1 se indican las coordenadas de los dispositivos, la precipitación total y media recogida en
237 el año hidrológico 2021/22 y la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) -media aritmética y ponderada por
238 la cantidad de precipitación- del agua correspondiente a cada una de las muestras durante el mismo
239 período. El valor más elevado de precipitación anual (1063 mm) se recogió en el dispositivo instalado
240 en "Peñón del Toro 2" (a 1534 m s.n.m.), con una precipitación media mensual de 97 mm, seguido de
241 "Aguasnegras" (1476 m s.n.m.) con un total de 1022 mm (P media mensual = 93 mm). En
242 contraposición, "Molino Peralta" (a 761 m s.n.m.) fue el pluviómetro en el que se registró el valor de
243 precipitación más bajo (245 mm).

244 A partir de la información procedente de los pluviómetros totalizadores y de los datos de las estaciones
245 meteorológicas oficiales existentes en la región se ha elaborado un mapa de isoyetas para el año
246 hidrológico 2021/2022 (Figura 5A). El valor medio de precipitación calculado mediante planimetría de
247 la superficie encerrada por las isóneas es 619 mm/año. Este dato es inferior a los valores de
248 precipitación media anual obtenidos en trabajos previos en el área de estudio: 797 mm/año (Moral,
249 2005) para el período 1952/53-2001/02, y 740 mm/año (CEHIUMA-IGME, 2021) para el período de
250 1974/75-2018/19.

251 Desde el punto de vista de la distribución espacial de las precipitaciones (Figura 5), se aprecia que la
 252 orografía condiciona la cantidad de lluvia, con dos zonas en las que se registran valores más elevados
 253 de precipitación (próximos a 1000 mm/año): uno situado en el sector oriental y otro en el occidental
 254 de la Sierra de Segura. El primero concuerda con la línea de cumbres formada por Sierra Seca y La
 255 Guillimona, mientras que el segundo se sitúa entre la cabecera del río Guadalentín y el pico Banderillas.
 256 Moral (2005) achacaba dichos efectos a que las líneas de cumbres, con dirección NNE-SSO, son
 257 prácticamente perpendiculares a los vientos húmedos procedentes del océano Atlántico y del mar
 258 Mediterráneo. La notable barrera orográfica presente en ambas vertientes de la Sierra de Segura
 259 permite la generación de gradientes pluviométricos muy marcados. Entre ambos máximos se situaría
 260 una zona con precipitaciones anuales más bajas que coincidiría, a grandes rasgos, con el altiplano
 261 segureño, incluidos los Campos de Hernán Pelea.

262 La distribución espacial de las isoyetas a escala mensual es parecida a la obtenida para el año
 263 hidrológico completo. Como ejemplo, el mapa de la figura 5B refleja las isolíneas de precipitación
 264 obtenidas con los datos del mes de noviembre de 2021, el más húmedo del año 2021/22, con un valor
 265 promedio de 138 mm. Llega incluso a acentuarse la vaguada de precipitación localizada en la zona del
 266 altiplano segureño y en los Campos de Hernán Pelea.

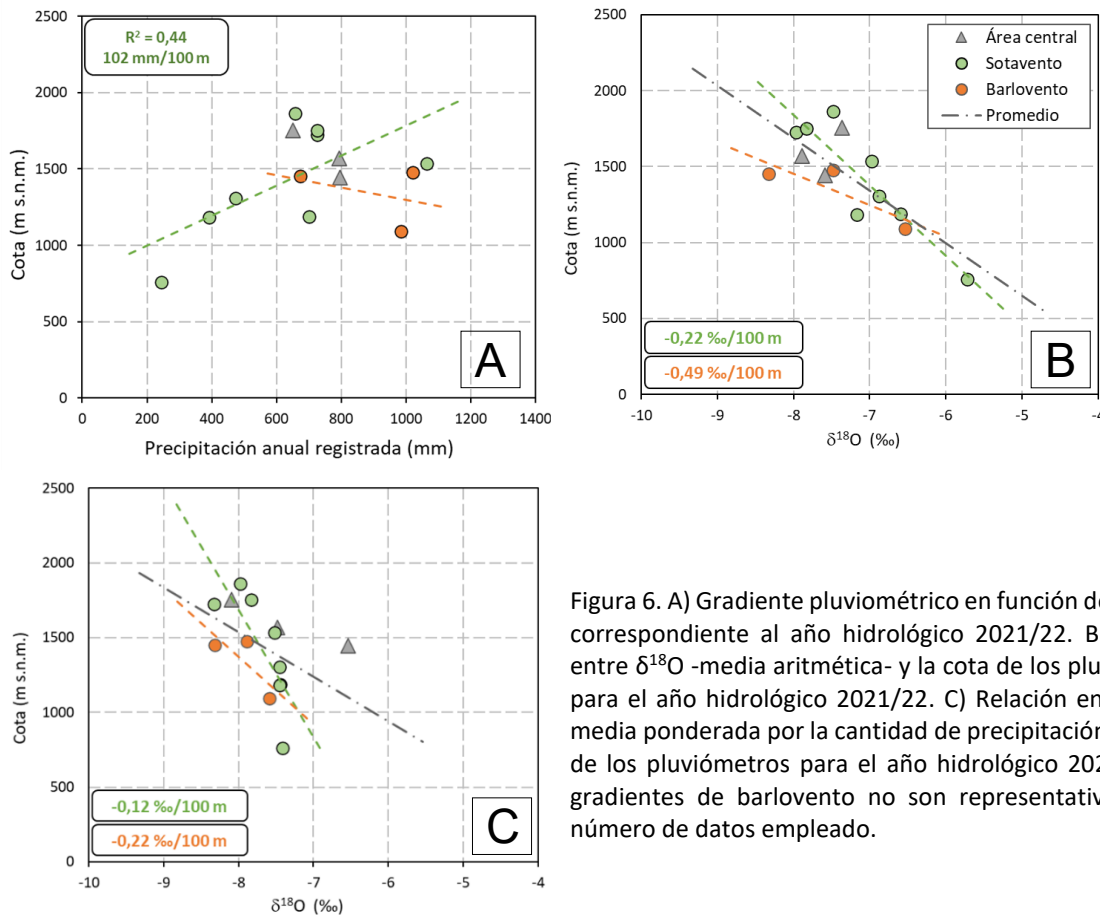


267
 268 Figura 5. Mapas de isoyetas correspondientes al (A) año hidrológico completo 2021/22
 269 (P media ponderada = 619 mm) y (B) al mes de noviembre de 2021 (P media = 138 mm) en la Sierra de Segura,
 270 elaborados con los datos obtenidos de los dispositivos totalizadores de fabricación propia y de las estaciones
 271 meteorológicas disponibles. En cada mapa se presenta la distribución de valores isotópicos procedentes de las
 272 muestras de agua obtenidas en cada pluviómetro

273 Se ha efectuado la correlación lineal entre la cantidad de precipitación registrada durante el año
 274 hidrológico 2021/22 en cada dispositivo totalizador (mm) y su altitud (Figura 6A). Las principales
 275 alineaciones montañosas de la Sierra de Segura (NE-SO) ejercen una barrera frente a los vientos
 276 húmedos de origen atlántico y mediterráneo, lo que origina dos gradientes pluviométricos: uno a
 277 sotavento y otro a barlovento. El gradiente calculado a sotavento (vertiente ESE) ha sido de
 278 102 mm/100 m y, en el caso de la vertiente ONO (barlovento) hay pocos datos para definir un

279 gradiente claro. Sin embargo, a excepción de uno de los puntos, parecen ajustarse al gradiente
 280 marcado para la ladera de sotavento. En términos generales, la cantidad de lluvia en la vertiente
 281 occidental de la Sierra de Segura es más elevada que en la vertiente oriental, aunque el gradiente
 282 pluviométrico está mejor definido en la ladera oriental. Esto podría deberse a que se trata de un año
 283 seco, además de disponer de un número limitado de pluviómetros desplegados en el año 2021/22. Por
 284 ello, se decidió ampliar la red de pluviómetros con el fin de cubrir una mayor superficie y obtener más
 285 información sobre la variabilidad espacial de las precipitaciones.

286 En cuanto a los isótopos de la molécula del agua, los valores medios anuales ponderados más ligeros
 287 (Tabla 1 y Figura 1) se han medido en el punto "Navas de San Pedro" (1452 m s.n.m.), con -8,83 ‰ de
 288 $\delta^{18}\text{O}$ y -50,17 ‰ de $\delta^2\text{H}$, y los menos negativos fueron -7,40 ‰ ($\delta^{18}\text{O}$) y -41,56 ‰ ($\delta^2\text{H}$), registrados en
 289 el totalizador situado en "Aguamula" (1093 m s.n.m.). En general, se puede deducir una tendencia
 290 según la cual los valores isotópicos más negativos se registran a cotas más altas, con un gradiente de -
 291 0,22 ‰/100 m para el $\delta^{18}\text{O}$, en la vertiente occidental de la sierra, y -0,49 ‰/100 m para el mismo
 292 isótopo, pero en la vertiente oriental (Figura 6B). Los gradientes en las mismas laderas disminuyen
 293 hasta -0,12 ‰/100 m y 0,22 ‰/100 m si se emplean datos de $\delta^{18}\text{O}$ ponderados por la cantidad de
 294 lluvia (Figura 6C). Al igual que con la cantidad de precipitación, sería necesario prolongar durante más
 295 tiempo los muestreos de agua de lluvia y aumentar el número de puntos de control con el fin de
 296 precisar los gradientes isotópicos.



297

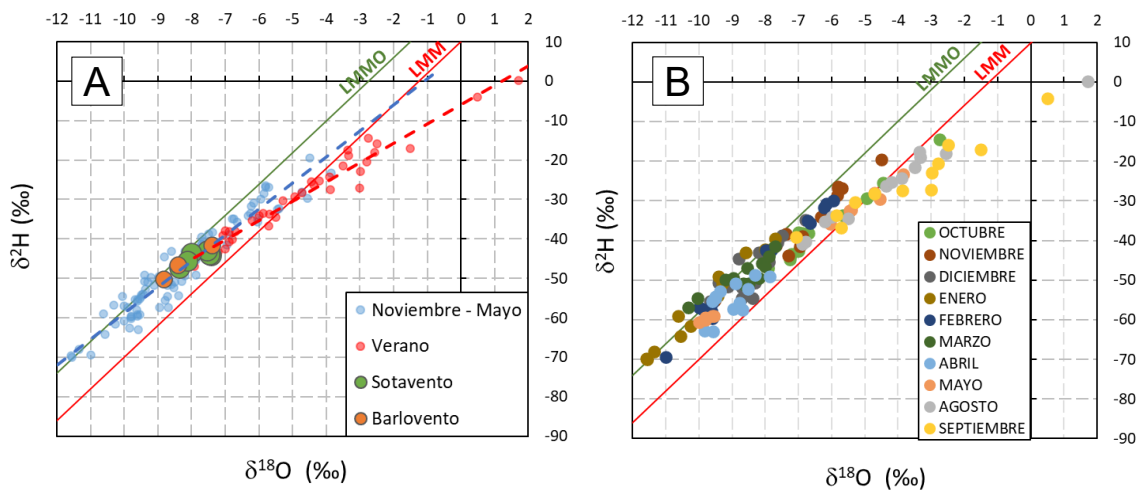
Figura 6. A) Gradiente pluviométrico en función de la altitud correspondiente al año hidrológico 2021/22. B) Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ -media aritmética- y la cota de los pluviómetros para el año hidrológico 2021/22. C) Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ -media ponderada por la cantidad de precipitación- y la cota de los pluviómetros para el año hidrológico 2021/22. Los gradientes de barlovento no son representativos por el número de datos empleado.

309

310 En la figura 7 se observa que los datos isotópicos se encuentran generalmente distribuidos entre la
 311 Línea Meteorológica del Mediterráneo Occidental (LMMO) y la Línea Meteorológica Mundial (LMM). En
 312 general, los vientos húmedos procedentes del océano Atlántico son la fuente principal de las
 313 precipitaciones que caen en la región (Cruz-Sanjulián et al., 1992). No obstante, en años con

314 precipitaciones inferiores a la media, como es el caso de 2021/22, los valores de composición isotópica
315 reflejan una mayor influencia de frentes asociados a masas de aire de origen mediterráneo.

316 Se aprecian diferencias en los valores isotópicos del agua de precipitación que cae en el conjunto de la
317 Sierra de Segura a lo largo del período de estudio. Parece deducirse un efecto “cantidad”, dado que
318 los valores isotópicos más negativos corresponden a los meses (Figuras 7 y 8) o áreas (Figura 5) con
319 mayor precipitación, a excepción de enero y febrero. La temperatura del aire también influiría en la
320 señal isotópica, lo que explicaría que en estos dos meses también se observen valores isotópicos más
321 negativos, a pesar de tratarse de meses secos (Figura 8). Un análisis más detallado de los datos permite
322 diferenciar dos grupos con pendiente diferente en la relación $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ (Figura 7A). El primer grupo
323 (puntos azules en la figura 7A) corresponde a las muestras de agua de precipitación tomadas de
324 noviembre a mayo (Figura 7B), cuya distribución aparece entre las líneas meteóricas del Mediterráneo
325 Occidental y la Mundial. El segundo grupo (puntos rojos en la figura 7A) está formado por las muestras
326 de agua recogidas en los meses de verano de 2022. Presentan menor pendiente debido a la
327 evaporación de las gotas de lluvia al precipitar. Este efecto es común en los meses templados y secos,
328 cuando los volúmenes de lluvia son pequeños (Mook, 2002).



329
330 Figura 7. Relación $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ de las 155 muestras de lluvia recogidas para el año hidrológico 2021/22. Se incluye
331 la Línea Meteórica Mundial (LMM) y la Línea Meteórica del Mediterráneo Occidental (LMMO)

332 La figura 8 muestra la evolución temporal (mensual) del valor medio aritmético del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de
333 precipitación recogida durante el año 2021/22, así como los valores promedios en los dispositivos
334 localizados en las vertientes de sotavento y barlovento de Sierra de Segura. Además, incluye los datos
335 mensuales de los dos totalizadores cuyos valores isotópicos difieren más entre sí: “Navas de San
336 Pedro” y “Molino Peralta”. Desde el punto de vista geográfico, se observa que el agua de lluvia caída
337 en la parte occidental del macizo montañoso (barlovento) presenta una composición isotópica más
338 negativa que la registrada en la ladera oriental (sotavento), y se acercan a la homogeneidad (en
339 ocasiones más negativos en la ladera occidental) durante los meses en los que la lluvia es abundante.

340 Los valores medios de exceso en deuterio (d) calculados para el año hidrológico 2021/22 muestran una
341 mayor influencia de los frentes de origen mediterráneo (en torno a +20 ‰) en el período comprendido
342 entre noviembre y abril, a diferencia del resto del año, cuya influencia fue predominantemente
343 atlántica (valores más cercanos a +10 ‰). Además, los bajos valores de exceso de deuterio
344 coincidentes con los meses de verano, confirmarían la evaporación producida en los meses más cálidos
345 y con menos volumen de precipitación (Mook, 2002).

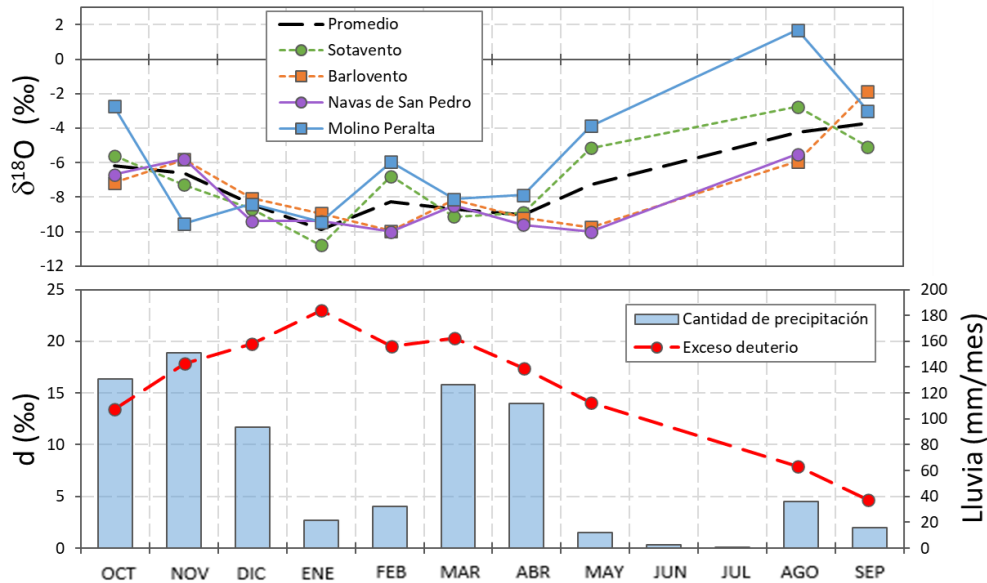


Figura 8.- Evolución temporal de la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) y del exceso en deuterio (d) del agua de lluvia en la Sierra de Segura durante el año 2021/22

346
347
348

349
350

5. CONCLUSIONES

351 La red de pluviómetros totalizadores de la precipitación (lluvia y nieve) desplegada en la Sierra de
352 Segura puede constituir una alternativa económica y eficaz con la que caracterizar la distribución
353 espacial y temporal de la precipitación en el altiplano segureño, una región con escasez de estaciones
354 meteorológicas oficiales. Al mismo tiempo, los dispositivos totalizadores permiten obtener muestras
355 para analizar la composición química e isotópica del agua de precipitación, de gran utilidad para
356 precisar las áreas de recarga de los principales manantiales y, en general, el funcionamiento
357 hidrogeológico de los acuíferos de la Sierra de Segura.

358 Los mapas de isoyetas elaborados para el año hidrológico 2021/22 han permitido conocer la
359 distribución espacial y temporal de las precipitaciones en un área de gran relevancia desde el punto
360 de vista de la recarga de los acuíferos de la sierra, como es el altiplano segureño. Se ha estimado la
361 precipitación media en el año hidrológico 2021/22, con un valor de 619 mm/año. Se reafirma la
362 presencia de un marcado gradiente pluviométrico en la vertiente ESE (sotavento) del macizo
363 montañoso, donde la precipitación aumentaría a razón de 102 mm cada 100 metros. Además, se ha
364 comprobado que en la zona central del altiplano, donde se encuentran los Campos de Hernán Pelea,
365 se produce un descenso relativo de las precipitaciones, debido al efecto orográfico provocado por las
366 alineaciones montañosas situadas al E y al O.

367 El estudio de los isótopos de lluvia ha permitido estimar que el agua de precipitación resultante del
368 año hidrológico 2021/22 es una mezcla de frentes con origen atlántico y mediterráneo. En este caso,
369 la temperatura y la estacionalidad han sido los factores más determinantes a la hora de definir la
370 distribución isotópica del período de estudio. También destaca el efecto de cantidad, pero dada la
371 condición de año seco, su efecto sólo se ha podido constatar durante algunos meses.

372 Estas observaciones confirman la necesidad de ampliar la red de estaciones meteorológicas de la Sierra
373 de Segura, especialmente en las zonas de mayor altitud y en aquellas que puedan constituir áreas de
374 recarga de los principales manantiales. Además de realizar un control climático más exhaustivo, esta
375 información podría servir para estimar la y cuantificar el volumen de entrada de agua a los acuíferos.
376 Ello permitiría realizar balances hidrogeológicos más precisos, lo que redundaría en la mejora de la
377 gestión y gobernanza del agua frente al cambio climático.

378
379
380

Agradecimientos

381 Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Convenio de Colaboración firmado entre la
382 Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y el Centro de Hidrogeología de la Universidad de
383 Málaga (CEHIUMA). Es una contribución del Grupo RNM-308 de la Junta de Andalucía y al proyecto
384 PID2019-111759RB-I00 de la Agencia Estatal de Investigación.

385
386
387

REFERENCIAS

388 Castillo, J.M. (1988): La abstracción climática, la realidad meteorológica y la aproximación geográfica:
389 el clima de Andalucía desde la perspectiva del análisis regional con los tipos de tiempo. Tesis doctoral
390 Universidad de Granada. 861 p.

391 CEHIUMA-IGME (2021): Delimitación, caracterización y evaluación de los recursos hídricos disponibles
392 y comprometidos de las masas de agua subterránea de la Comunidad Autónoma de Andalucía, que se
393 encuentran compartidas con dos o más ámbitos de planificación hidrológica. Informe técnico nº 7:
394 Sierra de Segura. Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga - Instituto Geológico y Minero
395 de España. 104 p.

396 Cruz-Sanjulián, J.J., Araguás, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García-López,
397 S., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F. y Olías, M. (1992). Sources of precipitation over South-Eastern
398 Spain groundwater recharge. An isotopic study. *Tellus*, Volume 44, Issue 3 (226-236).

399 Ford, D.C. & Williams, P.W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester. 562 p.

400 IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*
401 *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D.,
402 Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)].
403 Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. 1552 pp.

404 IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*
405 *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P.
406 Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K.
407 Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].
408 Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. 2391 p.

409 Mook, W. G. (2002): *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications*.
410 International Atomic Energy Agency and United Nations Educational, Scientific and Cultural
411 Organization. 1595 p.

412 Moral, F. (2005). *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura*
413 *(Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral Universidad Pablo de Olavide, Sevilla. 580 p.

414 Moreno, A., Iglesias, M., Azorin-Molina, C., Pérez-Mejías, C., Bartolomé, M., Sancho, C., Stoll, H., Cacho,
415 I., Frigola, J., Osácar, C., Muñoz, A., Delgado-Huertas, A., Bladé, I., and Vimeux, F. (2021): Measurement
416 report: Spatial variability of northern Iberian rainfall stable isotope values – investigating atmospheric
417 controls on daily and monthly timescales, *Atmos. Chem. Phys.*, 21 (13), 10159–10177.

418 Scholl, M.A., Shanley, J.B., Zegarra, J.P. and Coplen, T.B. (2009): The stable isotope amount effect: New
419 insights from NEXRAD echo tops, Luquillo Mountains, Puerto Rico. *Water Resources Research*, 45 (12),
420 407 p.