

Monitorización hidrológica de las lagunas peridunares de los mantos eólicos de Doñana en el periodo 2020-2023

Hydrological monitoring of the sand dune ponds of Doñana during the 2020-2023 period

José Luis Yanes^{1*}, Miguel Rodríguez-Rodríguez¹, María José Montes-Vega¹, Alejandro Jiménez-Bonilla¹ y Francisco Moral-Martos¹

¹ Dpto. Sistemas Físicos, Químicos y Naturales, Universidad Pablo de Olavide, Ctra. Utrera km 1, 41013 Sevilla. j
lyancon@upo.es, mrodrod@upo.es, mariajosemontesv@gmail.com, ajimbon@upo.es, fmormar@upo.es.

*Corresponding author

ABSTRACT

This study presents a synthesis of the results from the hydrological monitoring of the sand ponds in the Doñana Biological Reserve during the period 2020-2023. Data on water level and temperature are derived from records from sensors installed in 5 ponds' bottom and neighboring piezometers. Additionally, this includes records from one of the Matalascañas supply wells and water electrical conductivity measurements taken throughout the study period. The results show a decrease in water level and changes in the hydroperiod of the ponds over the last three years, related to the annual module and the distribution of precipitation. The water temperature showed a significant increase in the ponds during the study period. This study demonstrates the alteration of the water regime and its impact on the physicochemical properties of the water of the Doñana National Park sand ponds. On the other hand, it highlights the need for detailed monitoring of these hydrological variables for the sustainable management of the Doñana aquifer, in the current context of climate change.

Key-words: sand dune ponds, Doñana aeolian mantle, hydroperiod, water temperature.

RESUMEN

En este estudio se presenta una síntesis de los resultados de la monitorización hidrológica de 5 lagunas peridunares de la Reserva Biológica de Doñana durante el período 2020-2023. Los datos de nivel y temperatura derivan del registro de sensores instalados en las cubetas lacustres y piezómetros adyacentes. Asimismo, se incluye el registro en uno de los sondeos de abastecimiento de Matalascañas y las medidas de conductividad eléctrica del agua que se tomaron durante el periodo de estudio. Los resultados muestran una disminución en el nivel de agua y cambios en el hidroperiodo de las lagunas en los tres últimos años, relacionados con el módulo anual y la distribución de las precipitaciones. La temperatura del agua experimentó un aumento notable en las lagunas durante el periodo de estudio. En este estudio se constata la disminución del hidroperiodo y su impacto en las propiedades fisicoquímicas del agua en las lagunas peridunares del Parque Nacional de Doñana. Por otra parte, se evidencia la necesidad de la monitorización de detalle de estas variables hidrológicas para la gestión sostenible del acuífero de Doñana, en el contexto actual de cambio climático.

Palabras clave: lagunas peridunares, manto eólico de Doñana, hidroperiodo, temperatura del agua.

Geogaceta, 76 (2024), 55-58

<https://doi.org/10.55407/geogaceta104491>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 09/02/2024

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

Introducción

Desde 2015, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide desarrollan un proyecto para la monitorización de detalle del nivel de las lagunas peridunares de la Reserva Biológica de Doñana (RBD) y la modelación de la relación entre estas lagunas y el acuífero costero del manto eólico litoral de Doñana. Fruto de este trabajo, se han publicado diversos estudios en los que ya se ha constatado una alteración del funcionamiento hidrológico de las lagunas peridunares más próximas a la localidad de Matalascañas, donde existen varios sondeos de extracción del acuífero para el abastecimiento de este núcleo poblacional (Fernández-Ayuso *et al.*, 2018; Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2020; Montes-Vega *et al.*, 2021). Estos trabajos han puesto de mani-

fiesto la importancia del seguimiento de detalle de los niveles piezométricos en el entorno de estos ecosistemas.

Desde la publicación del último informe sobre el proyecto (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2019), la monitorización ha continuado durante el periodo 2020-2023. Este periodo de estudio ha sido particularmente crítico para las lagunas peridunares de Doñana, ya que se ha registrado una notable intensificación de fenómenos climáticos extremos, particularmente la sequía y el aumento de las temperaturas. Según el reciente informe preliminar del estado de los acuíferos de Doñana (CHG, 2023), se observa una tendencia descendente en los niveles piezométricos con una evolución desfavorable a largo plazo, agravada por la situación climática de los últimos años hidrológicos.

En este trabajo se presentan los re-

sultados de la monitorización del nivel, la temperatura y la conductividad eléctrica del agua en las lagunas peridunares más relevantes de la RBD durante el periodo 2020-2023, con el objetivo de analizar el impacto de la reducción de precipitaciones y el incremento de las temperaturas en el hidroperiodo y la dinámica hidrológica de las lagunas durante este periodo.

Zona de estudio

El sistema acuífero Almonte-Marismas (Fig. 1A) es un acuífero detrítico que está dividido administrativamente en seis masas de agua subterránea (MASb) entre las que se incluye la del manto eólico litoral de Doñana (MASb. 0055104), cuyo funcionamiento hídrico está íntimamente relacionado con el funcionamiento de las lagunas peridunares estudiadas.

meteorológicos, desde el 1 de septiembre de 2020 hasta el 31 de agosto de 2023. Además, durante este periodo de estudio se han realizado mediciones puntuales de la conductividad eléctrica del agua (CE) en cada punto mediante una sonda multiparamétrica Hach-HQ40®.

Los datos de precipitación se han obtenido del registro de la estación meteorológica de Almonte (Junta de Andalucía).

El análisis estadístico y la representación de los datos de temperatura del agua se ha llevado a cabo mediante R (R Core Team, 2023).

Resultados y discusión

La figura 2 muestra los limnigramas de los sistemas estudiados en el periodo 2020-2023. En el caso de las lagunas de Sopotón, Santa Olalla y Dulce, se incluye la evolución del nivel registrado en los piezómetros cercanos a estas lagunas. Cada limnigrama incluye la precipitación diaria registrada en la estación meteorológica de Almonte durante el periodo de estudio.

La evolución del nivel de las lagunas muestra una variación determinada por la estacionalidad de la precipitación, concentrada en los meses de otoño y primavera. En los tres años hidrológicos estudiados, la precipitación anual promedio fue aproximadamente un 35% inferior al promedio histórico de la zona (i.e. 564 mm/año en Montes-Vega *et al.*, 2023). Esta reducción en la precipitación durante el periodo coincide con una tendencia interanual descendente tanto en los niveles de las lagunas como en el de los piezómetros. El descenso en los niveles piezométricos es más evidente en el caso del sondeo 10 (S10) en el que se observa un descenso neto de más de 1 m entre el primer y el último año estudiado.

Se observa una reducción significativa en el nivel, aproximadamente 0,8 m, y el hidrometereológico de las lagunas entre el primer y el segundo año hidrometereológico. A pesar de que la precipitación anual registrada en la estación de Almonte fue similar en estos dos p aproximadamente 375 mm, la distribución fue más homogénea en 2020/2021, mientras que en 2021/2022 se concentró en eventos puntuales de abundante precipitación.

En el caso de las lagunas estacionales, hubo una reducción superior al 50% en el hidrometereológico de la laguna de Taraje durante el segundo año hidrometereológico.

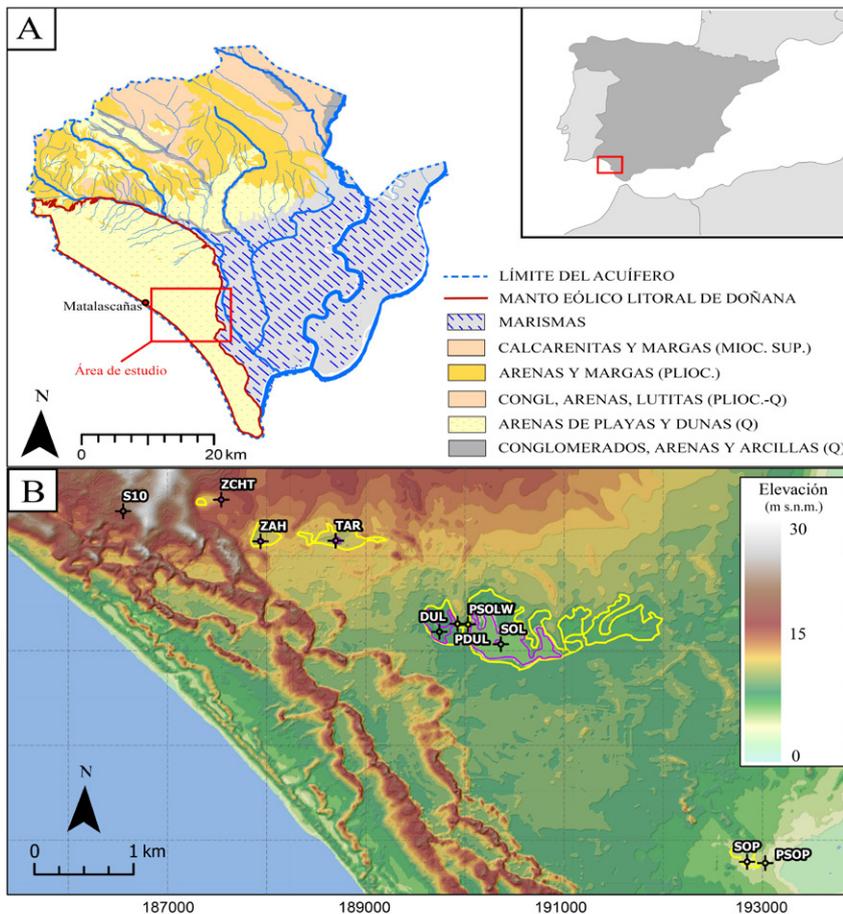


Fig. 1.- A) Localización de la zona de estudio y litologías del acuífero Almonte-Marismas en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. B) Localización de las lagunas peridunares estudiadas sobre modelo digital de elevaciones y puntos en los que se ha llevado a cabo la monitorización. SOP: laguna de Sopotón, PSOP: piezómetro de la laguna de Sopotón, SOL: laguna de Santa Olalla, PSOLW: piezómetro oeste de la laguna de Santa Olalla, DUL: laguna de Dulce, PDUL: piezómetro de la laguna Dulce, TAR: laguna de Taraje, ZAH: laguna de Zahillo, ZCHT: zacallón del Charco del Toro, S10: sondeo 10 de Matalascañas.

Fig. 1.- A) Location of the study area and lithologies of the Almonte-Marismas aquifer in the area of Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. B) Location of the studied sand ponds on a digital elevation model map and monitoring points. SOP: Sopotón pond, PSOP: piezometer of the Sopotón pond, SOL: Santa Olalla pond, PSOLW: west piezometer of the Santa Olalla pond, DUL: Dulce pond, PDUL: piezometer of the Dulce pond, TAR: Taraje pond, ZAH: Zahillo pond, ZCHT: zacallón of Charco del Toro, S10: Matalascañas well 10.

Estas lagunas se encuentran ubicadas dentro de los límites del Parque Nacional de Doñana (Fig. 1B) a una altitud comprendida entre los 2 m s.n.m. (Sopotón) y los 10 m s.n.m. (Charco del Toro). La mayoría de estas lagunas son de tipo temporal o estacional, como es el caso de la laguna de Taraje, Zahillo o Sopotón, aunque también existen lagunas casi permanentes, como la laguna de Santa Olalla, que, desde que hay registros, se ha secado en los estiajes de 1983, 1995, 2022 y 2023.

Metodología

La monitorización de detalle del nivel de las lagunas, el nivel piezométrico y la temperatura del agua se ha realizado mediante sensores (TD-Diver y Levelogger) instalados en un total de diez

puntos (Fig. 1B) que incluyen las lagunas de Sopotón, Santa Olalla, Dulce, Taraje y Zahillo y piezómetros someros (aprox. 2 m) y profundos (aprox. 20 m) situados en las inmediaciones de las lagunas (piezómetro somero de Sopotón y piezómetros profundos de Santa Olalla y Dulce). En el caso de la laguna del Charco del Toro, seca durante todo el año, se ha realizado un seguimiento de los niveles piezométricos someros en un zacallón excavado en el borde de la laguna. Además, en este estudio también se incluye la monitorización del nivel y la temperatura del agua en uno de los sondeos de extracción de Matalascañas, el sondeo 10, que se sitúa a tan solo 750 m de la laguna del Charco del Toro. El registro del nivel y la temperatura del agua se realizó cada tres horas durante un periodo de tres años hidro-

lógico, y la laguna de Zahillo permaneció seca durante todo el año. La laguna de Santa Olalla, que no se había secado desde 1995, se secó durante los estiajes de 2022.

En el último año hidrometeorológico, continuó la tendencia descendente en los niveles, sin embargo, el hidropereodo de las lagunas aumentó ligeramente con respecto al año anterior, con una precipitación anual de 346 mm, pero distribuida de forma más uniforme a lo largo del año. No obstante, la laguna de Santa Olalla se secó en el estiaje de 2023 por segundo año consecutivo, un hecho sin precedentes en el registro histórico.

La evolución del nivel en las lagunas peridunares durante el periodo de estudio corrobora la alta dependencia de estos sistemas lagunares de las condiciones climáticas, lo cual ya se ha señalado en estudios anteriores (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2020; Montes-Vega *et al.*, 2021).

En la figura 3 se representa la evolución de la temperatura del agua en los sistemas estudiados. Se observa una diferencia entre la variación de la temperatura del agua en las lagunas y los piezómetros. Las lagunas y piezómetros someros, como PSOP, muestran una variación estacional similar a la de la temperatura am-

biental, con máximas en verano y mínimas en invierno y una notable variación intraanual. En contraste, los piezómetros profundos (PDUL, S10) muestran una variabilidad intraanual mínima, característico de aguas subterráneas, y presentan las temperaturas máximas en diciembre y enero, y las mínimas en mayo y agosto respectivamente.

En general, se observa una tendencia interanual ascendente en la temperatura de las lagunas y piezómetros someros. Este aumento es muy evidente en las lagunas estacionales, como la laguna de Taraje, en la que se observa un aumento de más de 5 °C durante el periodo de estudio. Esta tendencia puede estar relacionada con el aumento en la temperatura media ambiental, 19,3 °C en el año 2022/2023 frente a la media histórica de 17,2 °C (CHG, 2023), y la disminución del nivel y duración del hidropereodo en las lagunas. En cambio, los piezómetros profundos, aunque presentan poca variabilidad intraanual, muestran una tendencia descendente en la temperatura y la variabilidad interanual. La escasa variabilidad intraanual de la temperatura en estos piezómetros sugiere una buena conexión con el acuífero regional y la tendencia descendente de la temperatura puede estar relacionada con el funcionamiento hidrológico del acuífero. No obstante, con los datos disponibles no es posible realizar una interpretación concluyente de esta tendencia,

Finalmente, en la tabla I se presentan los datos de conductividad eléctrica del agua (CE) derivados de las medidas puntuales que se realizaron en cada sistema durante el periodo de estudio. Estos datos ponen en evidencia la diferencia de salinidad del agua superficial y del agua subterránea. La CE del agua de las lagunas es hasta cien veces superior a la CE del agua subterránea (18,8 mS/cm en SOL frente a 0,17 mS/cm en PDUL, Tabla I). Igualmente, la CE del agua subterránea se mantiene prácticamente constante frente a la CE del agua superficial, que aumenta progresivamente a medida que desciende el nivel de la lámina de agua.

La variación de la temperatura y la CE durante el periodo estudiado indica que los cambios en el régimen hídrico de las lagunas impactan directamente en sus propiedades fisicoquímicas, conduciendo a alteraciones ecológicas y al deterioro acelerado de estos ecosistemas, como sugieren numerosos estudios recientes (e.g., Díaz-Paniagua *et al.*, 2023).

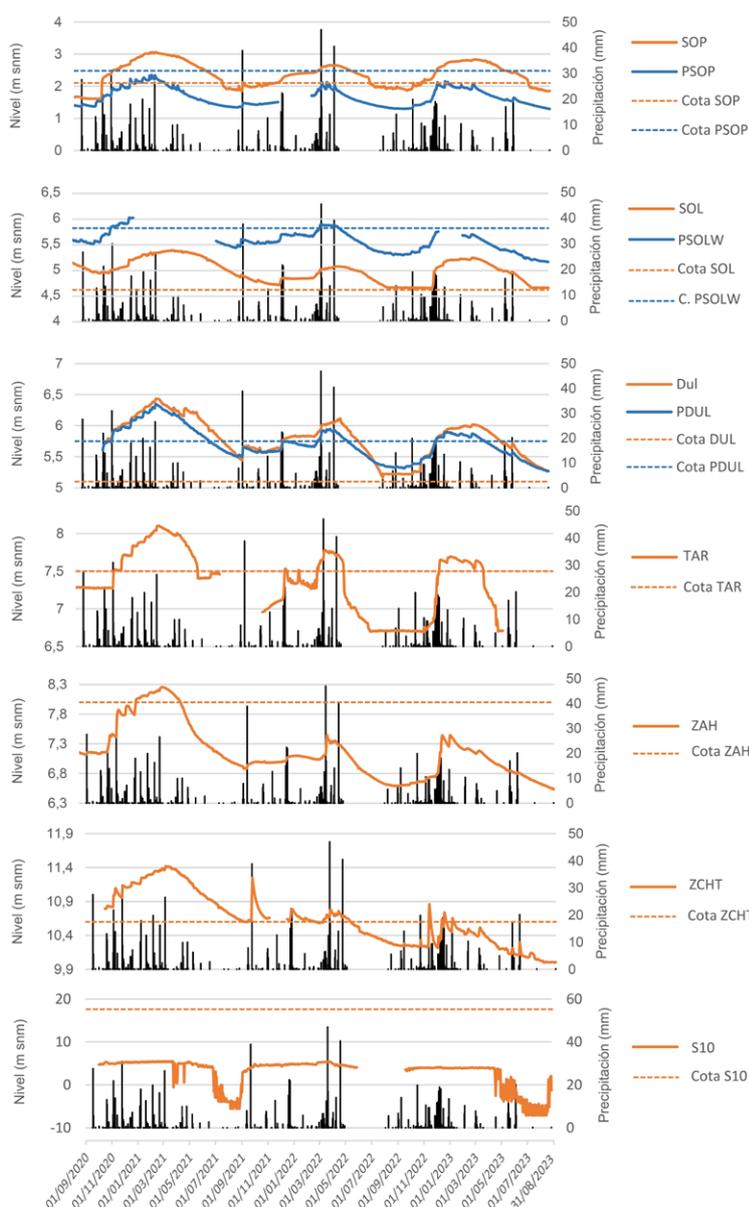


Fig. 2.- Linnogramas de los puntos monitorizados y precipitación registrada en la estación meteorológica de Almonte durante el periodo de estudio. La precipitación total para cada año hidrometeorológico es 378 mm en 2020/2021, 372 mm en 2021/22 y 346 mm en 2022/2023. Ver acrónimos en Fig. 1.

Fig. 2.- Linnograms of the study points and precipitation recorded at the Almonte weather station during the study period. The total precipitation for each hydrometeorological year is 378 mm in 2020/2021, 372 mm in 2021/2022, and 346 mm in 2022/2023. See acronyms in Fig. 1.

Contribución de los autores

Yanes: estructura del trabajo, edición, figuras, adquisición de datos, investigación/análisis. Rodríguez-Rodríguez: supervisión, metodología, adquisición de datos, investigación/análisis, revisión del manuscrito. Montes-Vega: adquisición de datos, investigación/análisis, revisión del manuscrito. Jiménez-Bonilla y Moral: metodología, investigación/análisis, revisión del manuscrito.

Agradecimientos

Este trabajo constituye una síntesis de parte de los resultados obtenidos gracias al convenio de colaboración: "Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en los mantos eólicos de Doñana. Seguimiento y ampliación del inventario" suscrito entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y la Universidad Pablo de Olavide.

Referencias

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) (2023). Informe Preliminar de Estado de los Acuíferos del Entorno de Doñana. Año Hidrológico 2022-2023. En: <https://www.chguadalquivir.es/estudios-tecnicos>.

Díaz-Paniagua, C., Ramírez-Soto, M., y Aragonés, D. (2023). Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems. <https://doi.org/10/md2b>

Fernández-Ayuso, A., Rodríguez-Rodríguez, M. y Benavente, J. (2018). Hydrological Sciences Journal 63 (15-16), 2048-2059. <https://doi.org/10/djcg>

Montes-Vega, M.J. y Rodríguez-Rodríguez, M. (2021). Geogaceta 70, 43-46.

Montes-Vega, M.J., Guardiola-Albert, C., y Rodríguez-Rodríguez, M. (2023). Water 15, 2369. DOI: <https://doi.org/10/md2b>

R Core Team, 2023. R foundation for statistical computing. Disponible en <https://www.r-project.org>

Rodríguez-Rodríguez, M., Moral, F., Fernández-Ayuso, A. y Bruque, J.M. (2019). Memoria Monitorización hidrológica y modelización de la relación laguna-acuífero en los mantos eólicos de Doñana. En: <https://www.chguadalquivir.es/estudios-tecnicos/#Humedales>

Rodríguez-Rodríguez, M., Fernández-Ayuso, A., Moral, F. y Caro, R. (2020). Geogaceta 67, 87-90.

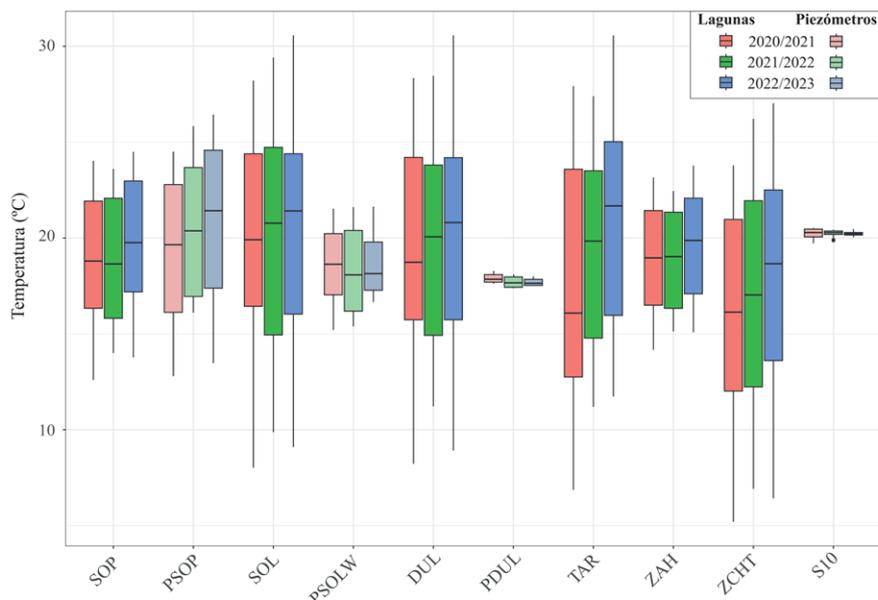


Fig. 3.- Variabilidad de la temperatura del agua por punto de estudio y año hidrometeorológico, representada mediante diagramas de caja. La línea central de cada caja indica la mediana de la temperatura. Ver acrónimos en Fig. 1.

Fig. 3.- Water temperature variability by study point and hydrometeorological year, represented through boxplots. The central line in box indicates the median temperature. See acronyms in Fig. 1.

Conclusiones

La monitorización de las lagunas peridunares de Doñana entre 2020 y 2023 muestra un cambio del régimen hídrico caracterizado por una notable disminución del nivel y reducción del hidropereodo con respecto al patrón histórico observado en estas lagunas. Esto conduce a la transformación de las lagunas permanentes, como Santa Olalla, a un régimen estacional y al cambio de las lagunas estacionales, como Zahillo y Taraje, hacia sistemas temporales que, además, dependen fundamentalmente de la precipitación para su llenado. Esta alteración podría relacionarse no solo con la disminución en las precipitaciones, sino con el cambio en la distribución de estas y con descensos paulatinos del nivel freático, atribuibles a

la reducción en la recarga del acuífero o a las extracciones para abastecimiento en las inmediaciones de Matalascañas

Además, el estudio de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica del agua en este periodo, indica que el cambio del régimen hídrico tiene un impacto inmediato en las características fisicoquímicas del agua y, consecuentemente, en la dinámica ecológica de estos ecosistemas. Esto subraya la importancia de las aguas subterráneas para mitigar los efectos de las variaciones climáticas y destaca la necesidad de la monitorización de detalles de estas variables hidrológicas como herramienta de apoyo en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que esté dirigida a minimizar los impactos actuales en el acuífero en el entorno de Doñana.

Sistema	n	Máx.	Mín.	Media	Mediana	SD
SOP	15	6,930	1,917	4,146	3,830	1,561
PSOP	14	2,270	0,188	1,458	1,378	0,520
SOL	13	18,800	6,600	11,709	10,250	4,019
PSOLW	18	0,248	0,219	0,227	0,224	0,008
DUL	14	12,430	1,010	3,605	2,420	2,880
PDUL	15	0,197	0,172	0,178	0,178	0,006
ZAH	12	13,780	1,164	4,127	3,540	3,240
TAR	11	5,720	0,245	3,001	2,930	1,797
ZCHT	16	4,600	0,142	1,754	1,666	1,039

Tabla. I.- Estadísticos principales de las medidas de conductividad eléctrica (CE) del agua en mS/cm durante el periodo de estudio. n= número de medidas, Máx.= CE máxima, Mín.= CE mínima, SD= desviación estándar. Ver acrónimos en Fig. 1.

Tabla. I. - Statistics of water electrical conductivity (EC) measurements in mS/cm during the study period. n= number of measurements, Máx. = maximum EC, Mín. = minimum EC, SD= standard deviation. See acronyms in Fig. 1.