EDICIONES COMPLUTENSE

Anales de Geografía de la Universidad Complutense
e-ISSN: 0211-9803

ARTÍCULOS

Variabilidad de humedales de La Mancha Húmeda (España) entre 1984 y 2025

M. Eugenia Pérez González
Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid (España)

M. del Pilar García Rodríguez
Departamento de Geografía, Universidad Complutense de Madrid (España)

https://dx.doi.org/10.5209/aguc.105695

Recibido: 28 de octubre de 2025 / Enviado a evaluar: 6 de noviembre de 2025
Aceptado: 10 de abril de 2026 / Publicado en línea: 16 de abril de 2026

Resumen. Este trabajo analiza la evolución de algunas lagunas de La Mancha Húmeda (España) entre 1984-2025, con el objetivo de conocer la variabilidad temporal de su lámina de agua y la posible tendencia hacia mayor inundación o desecación de estos humedales de interior según su emplazamiento, origen, manejo del agua y grado de estacionalidad. Se han utilizado imágenes de los satélites Landsat (TM, ETM+ y L8/9) y Sentinel 2, de las que se seleccionan en fechas contrastadas los índices y mejoras espectrales que más información ofrecen sobre la superficie de las láminas de agua: índice de la diferencia normalizada de agua (NDWI), índice de la diferencia normalizada de nieve (NDSI), intensidad, hue y saturación (IHS) y análisis en componentes principales. El estudio multitemporal de las lagunas manchegas, validado mediante trabajo de campo y laboratorio, permite afirmar una disminución de la extensión de los humedales acentuada en la última década, aunque con un notable repunte en 2025. La pérdida progresiva de agua responde a la conjunción de varias causas: sequías prolongadas, colmatación de los vasos lagunares, reducción del nivel de los acuíferos y de los aportes antrópicos superficiales procedentes de las depuradoras.x
Palabras clave: humedales interiores; variación temporal; Sentinel 2; Landsat TM; ETM+; L8/9.

[ENG] Variability of wetlands in La Mancha Húmeda (Spain) between 1984 and 2025

Abstract. This paper analyses the evolution of some wetlands of La Mancha Húmeda (Spain) between 1984-2025, with the aim of knowing their temporal variability of the water surface and the possible trend towards greater flooding or desiccation of inland wetlands according to their location, origin, water management and degree of seasonality. For this purpose, images from the Landsat (TM, ETM+ y L8/9) and Sentinel 2 satellites have been used, from which the indices and spectral enhancements that offer the most information on shallow water levels are selected: Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Snow Index (NDSI), Intensity, Hue and Saturation (IHS) and principal component analysis. The multitemporal study of these wetlands, validated by field and laboratory data, allows us to affirm a decrease in the extent of the wetlands accentuated in the last decade, although with a remarkable recovery of the water sheets of the wetlands in 2025. The progressive loss of water is due to the combination of several causes: prolonged drought, reduction in the level of aquifers, reduction of anthropogenic contributions to some wetlands and less availability of surface water for these natural spaces.
Keywords: inner wetlands; temporal variation; Sentinel 2; Landsat TM; ETM+; L8/9.

Cómo citar: Pérez González M. E. y García Rodríguez, M. P. (2026). Variabilidad de humedales de La Mancha Húmeda (España) entre 1984 y 2025. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 46(1), 59-73.

1. Introducción

Los humedales han sido "considerados áreas de interés internacional desde 1962, hecho que fue ratificado en 1972" (Ramsar, 2023). Estos ecosistemas forman parte de una serie de procesos naturales, como entrada y salida de aguas superficiales y subterráneas, control de avenidas, retención de nutrientes o degradación de contaminantes. También albergan vegetación específica, sirven de hábitat para distintos animales, especialmente

de avifauna, y favorecen microclimas que actúan como amortiguadores térmicos respecto a su entorno. Los humedales son fundamentales para mantener la calidad ambiental, pues gracias a la presencia de agua superficial o de suelos saturados, mantienen una actividad edáfica y una biocenosis específica, que constituye un paisaje singular de alto valor medioambiental.

Los diferentes humedales del interior peninsular, dulces, salobres y salinos, han sufrido distintas actuaciones antrópicas que explican en parte su estado actual. Son lagunas localizadas en clima semiárido, con marcados cambios estacionales e interanuales, con variaciones en la cantidad de agua y en el contenido de solutos. A su vez, son muy sensibles a los cambios naturales, sequías e inundaciones, y actuaciones antrópicas dentro y en el entorno de las lagunas. En años secos, estas lagunas suelen mantener solo humedad superficial o subsuperficial que, a cierta distancia, puede hacerlas parecer encharcadas. Por el contrario, en años húmedos o de precipitaciones intensas, suelen volver a ocupar su espacio original, independientemente del uso del vaso y borde lagunar actual. Este encharcamiento recurrente cargado de solutos va colmatando lenta pero progresivamente los vasos lagunares, con lo que la tendencia natural a largo plazo tiende a la reducción en la altura de las láminas de agua. De este modo, al cabo de varias décadas se requieren mayores aportes hídricos para mantener los humedales interiores inundados (Cirujano et al, 2014). Además, dada la rápida respuesta a los cambios ambientales de estos humedales, se han convertido en "indicadores" del clima y de las adecuadas o inadecuadas acciones antrópicas.

Los humedales manchegos se extienden por la Comunidad de Castilla La Mancha, con cerca de un centenar en las provincias de Ciudad Real y Toledo. Constituyen un vasto conjunto (Sanz Donaire, 2000; Donaire Jiménez, 2005), siendo los más conocidos Las Tablas de Daimiel y las lagunas de Ruidera. No obstante, hay casi cincuenta lagunas que fueron declaradas por la Unesco en 1980 Reserva de la Biosfera (MITECO, 2005 y 2023). Así, se conoce como Mancha Húmeda "al conjunto de lagunas, navajos, llanuras de inundación y torcas que se sitúan en el sector más llano de la región manchega, en las provincias de Toledo, Ciudad Real y Cuenca, excluyendo los espacios protegidos del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y del Parque Natural de las Lagunas de Ruidera" (García Rodríguez et al., 2023).

Las lagunas de La Mancha Húmeda son muy contrastadas en origen, calidad y permanencia de sus aguas, pudiendo variar desde las dulces a las saladas, contaminadas o sin contaminar, más naturales o fuertemente antropizadas (Hera Portillo et al., 2011). Los usos son muy diferentes: para caza (El Taray, Quero), playa artificial (laguna Grande de Villafranca), salinas (Quero), extracción de agua para la industria, ya en desuso (Peña Hueca), o vertedero (Gramosa, Villacañas) (García Jerez y De la Cruz, 2016).

Este trabajo tiene como objetivo conocer la variabilidad temporal de la superficie del agua de un conjunto de lagunas manchegas entre 1984 y 2025 en cuanto a extensión, estacionalidad y calidad. Para ello, se parte de la alta disponibilidad de datos Landsat (TM, ETM+ y L8/9) y Sentinel 2, que permiten la interpretación de los cambios de las aguas.

La teledetección se utiliza con frecuencia en estudios de humedales, dada la respuesta del agua en los diferentes canales espectrales, aportando una valiosa información sobre: extensión del área inundada, humedad edáfica, salinidad, vegetación higrófila o cambios de uso del suelo (García Rodríguez y Pérez González, 1999; Vega Martín, 2006; Cabello y Paruelo, 2008; Castañeda y Herrero, 2009; Pérez González et al., 2006; De Roeck et al., 2008; Morales et al., 2021). Toda esta información ha sido contrastada a lo largo del período estudiado con trabajos de campo y análisis de aguas, ya que de otro modo las respuestas espectrales obtenidas del análisis de las imágenes pueden distorsionar la realidad.

2. Materiales y métodos

El estado de las lagunas entre 1984 y 2025 se ha estudiado mediante 169 imágenes satelitales y una treintena de trabajos de campo, llevados a cabo mensualmente en 1989 y 1990, y en primavera (2011, 2025) y otoño (2021, 2022), con el fin de registrar la variabilidad espacio temporal de las láminas de agua. Las imágenes satelitales corresponden al Landsat TM (1984-2011), ETM+ (1999-2013), L8/9 (2013-2016) y Sentinel 2 (2017-2025). Todas ellas se han extraído de los servidores de libre acceso EO Brower (ESA, 2022), Copernicus Open Access Hub (ESA, 2023) y Earth explore- USGS (USGS, 2023), corregidas atmosféricamente (nivel 2).

Se han seleccionado las imágenes de las fechas más contrastadas en cuanto al volumen de agua, contaminación y contenido en sales superficiales. Para seleccionar las imágenes se ha establecido un umbral de nubosidad inferior al 5% y que no afectase a los vasos lagunares. En total, se han escogido 128 imágenes de verano y 41 al inicio de primavera, fechas en las que las lagunas suelen tener la menor y mayor cantidad de agua respectivamente. La disparidad en la cuantía de imágenes de ambas fechas responde al mayor interés durante los períodos xéricos en el contenido en agua, calidad y presencia de sales en superficie, y a que en primavera se reduce la disponibilidad real de imágenes multiespectrales debido a la mayor cobertura de nubes.

Las imágenes se han analizado visualmente mediante distintas combinaciones entre los canales visibles e infrarrojos (Figura 1). Las principales combinaciones que permiten valorar el estado de los humedales y su entorno son: color natural (R-V-A), falso color infrarrojo (IRc-R-V), falso color natural (IRm1-IRc-R) y el falso color urbano (IRm1-IRm2-R). A su vez, se han seleccionado diferentes índices y mejoras espectrales para destacar la extensión y mayor o menor cantidad de agua en los vasos lagunares. Estos son:

- NDVI (Índice de la diferencia normalizada de la vegetación), obtenido mediante el algoritmo (IRc-R)/(IRc+R). Diferencia la presencia de agua y la vegetación del borde e interior de las lagunas (Castañeda y Herrero, 2009).

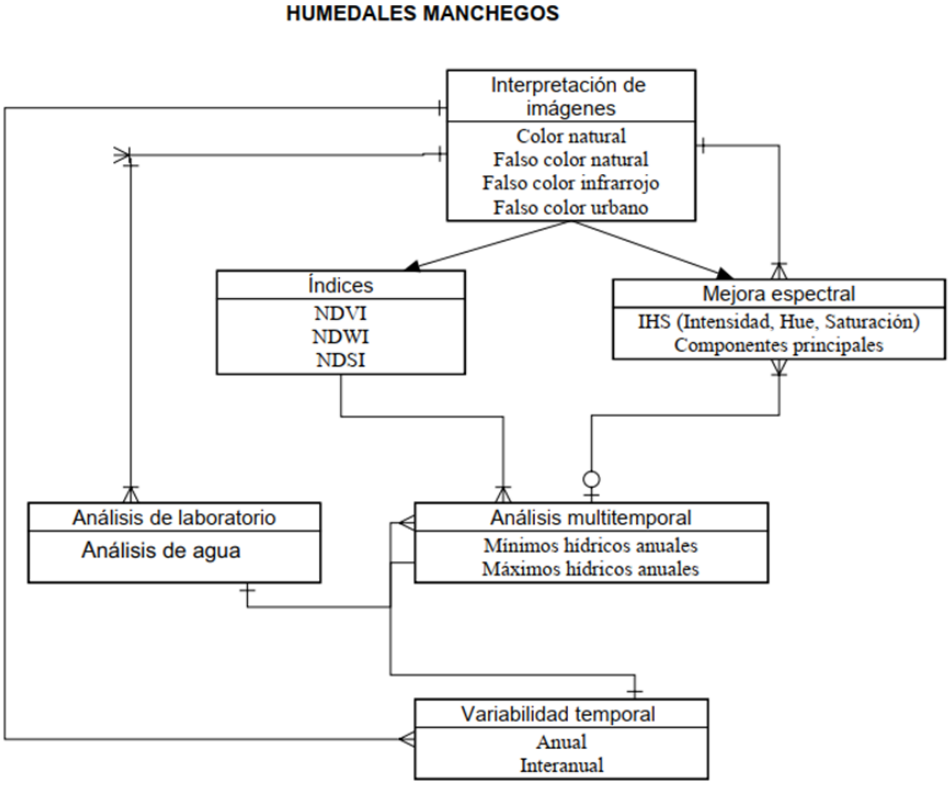
- NDWI (índice de la diferencia normalizada de agua) (V-IRc)/(V+IRc), permite discriminar los humedales con agua y sus distintos niveles de inundación (Xu, 2006; Rodríguez-Valero y Alonso Sarria, 2019; Morales et al., 2021).
- NDSI, denominado de "nieve" o índice normalizado modificado de agua (V-IRm1)/(V+IRm1). Se utiliza para delimitar los vasos lagunares (Armijo, 2022).
- Los componentes principales discriminan la extensión máxima del agua en el vaso lagunar y los suelos saturados (Balázs et al., 2018).
- IHS (Intensidad, Hue, Saturación) destaca mediante atributos de color fácilmente identificables la variabilidad hídrica de los humedales (Kumar et al., 2013).

La calidad de las aguas se evalúa mediante datos de laboratorio a partir de los análisis mensuales realizados en 1989 y 1990 (Peinado, 1994 y Pérez González, 1995), en abril de 2011 (Pérez Ortega, 2011) y por las autoras en noviembre de 2021, octubre de 2022 y junio de 2025.Se han medido las siguientes variables:

- pH: medido con pHmetro.
- Conductividad eléctrica (mS/cm).
- Cloruros: valoración con nitrato de plata y dicromato potásico, ppm.
- Dureza total: realizado mediante EFTA sódico (etilendiamida tetracetato de sódio), ppm.
- Sulfatos: método colorimétrico por precipitación mediante cloruro de bario, ppm.
- Fosfatos: método colorimétrico mediante reducción con ácido ascórbico, para valores < a 5 ppm, y con ácido vanado-molibdenofosfórico para valores < 60 ppm.
- Nitratos: mediante método colorimétrico mediante reducción por cadmio para muestras con un rango entre 0,3-3,5 ppm y mediante método ionométrico para un rango de medidas ilimitado.
- Nitritos: método colorimétrico de diazotización, ppm.
- Amoniaco: colorimetría con el reactivo de Nessler, ppm.

Con la información de las imágenes, de laboratorio y del trabajo de campo se ha realizado el análisis multitemporal en los mínimos y máximos hídricos de las lagunas (Figura 1), con los que se determina la variabilidad temporal del período 1984-2025.

Figura 1. Fases del estudio de la variabilidad temporal de humedales manchegos.



Fuente: elaboración propia.

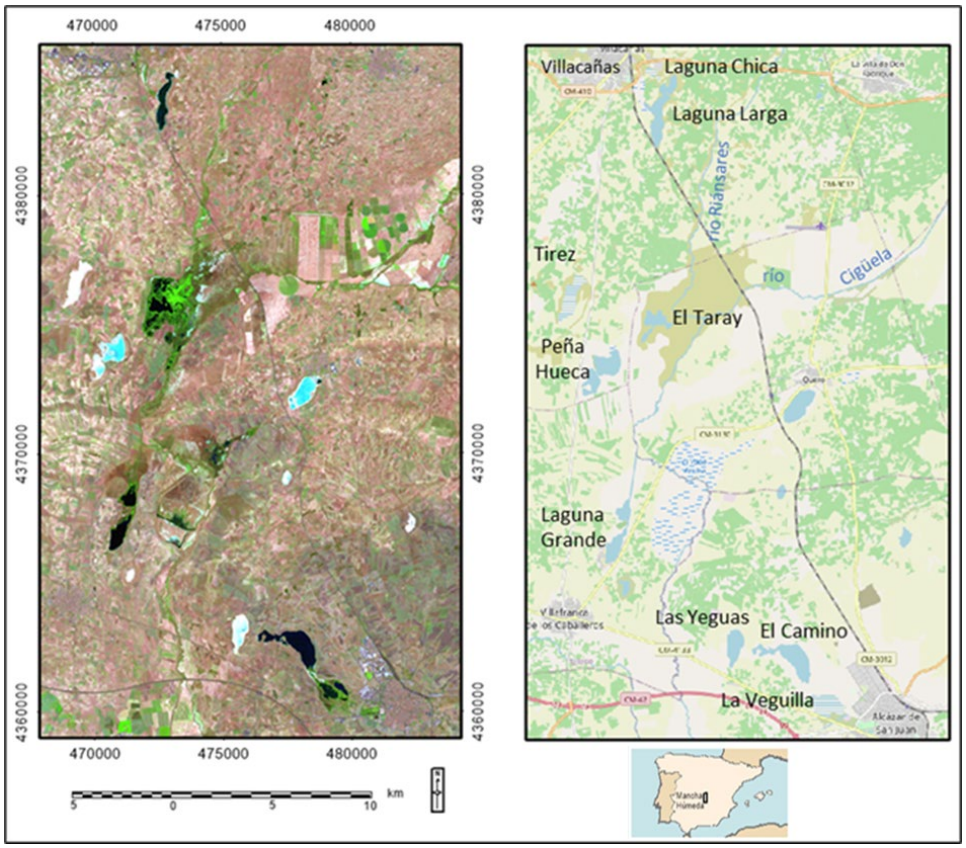
3. Área de estudio

La Mancha Húmeda se extiende por las provincias de Toledo, Cuenca y Ciudad Real, albergando medio centenar de lagunas. En este estudio se han estudiado nueve: Lagunas Larga y Gramosa de Villacañas, Peña Hueca, Tirez, El Taray y Grande de Villafranca de los Caballeros en Toledo, y el complejo lagunar de Alcázar de San Juan (La Veguilla, del Camino de Villafranca y Las Yeguas) en Ciudad Real, (Figura 2).

Este conjunto de humedales se ha formado por diferentes condicionantes geomorfológicos: tectónico, fluvial, pseudokárstico o en reverso de cuesta (Peinado, 1994 y Pérez González, 1995). Estas lagunas pueden ser estacionales o permanentes, con agua dulce, salobre o salina y estar sin contaminar o altamente eutrofizadas. Se localizan en la cuenca del río Guadiana, siendo más numerosas en la confluencia de los ríos Riánsares y Cigüela, y entre este y el Záncara" (García Rodríguez, 2023), dado que desarrollan aquí amplias llanuras de inundación antiguas y actuales.

Este sector manchego se localiza en el contacto entre el paleozoico y la cuenca sedimentaria mesozoica y cenozoica. Los materiales sedimentarios aumentan de forma discontinua hacia el centro de la cuenca de noroeste a sudeste. Los materiales triásicos, ricos en arcillas y evaporitas, están muy vinculados a las lagunas salobres y salmueras, de modo que con frecuencia los materiales del jurásico aparecen en el borde de algunas lagunas. El neógeno se caracteriza por la presencia de estratos del mioceno y del plioceno depositados por medios fluviales, lagunares y lacustres en áreas próximas al borde de cuenca. Los sedimentos miocenos están discordantes sobre los materiales triásicos y son casi horizontales, con variabilidad de facies, tanto de borde de cuenca como de centro, dominando los sedimentos vindobonienses de arcillas rojas con intercalaciones de yeso y gravas ferruginizadas, y una facies blanca formada por margas, yesos y calizas. Los materiales pliocenos están formados por una serie del plioceno inferior y medio constituida de arenas y gravas y otra del plioceno superior con calizas. Los depósitos cuaternarios se localizan en los valles de los ríos y en las áreas endorreicas formados fundamentalmente por materiales detríticos finos, limos y arcillas influidos por los yesos infrayacentes (I.G.M.E., 2010 y 2015).

Figura 2. Localización de los humedales analizados



Fuente: elaboración a partir de una imagen Sentinel 2 (ESA, 2023).

Los humedales manchegos quedan limitados al norte por los sedimentos continentales tabulares de edad miopliocena de la Mesa de Ocaña, al sudeste por las calizas y dolomías liásicas del campo de Montiel, al suroeste por los afloramientos basálticos del campo de Calatrava, al oeste por las estribaciones más orientales de los Montes de Toledo y al este por los afloramientos mesozoicos que a modo de fallas y pliegues falla constituyen las estribaciones más occidentales del Sistema Ibérico (Rodríguez y Pérez, 1999; Pérez González et al., 2000). Todas las lagunas se desarrollan sobre relieves muy planos, formando cuencas endorreicas sometidas a procesos de subsidencia por la disolución del yeso (procesos pseudokársticos) y con aportes fluviales en algunos casos (El Taray, Villafranca de los Caballeros). La presencia de materiales triásicos ricos en carbonatos y sulfatos cálcicos y magnésicos, y sedimentos terciarios constituidos por margas y yesos, son las principales fuentes de aportes de sales a las aguas superficiales. La fuerte evaporación, unida a las escasas precipitaciones da lugar a su acumulación en la superficie de algunas lagunas.

La Laguna Larga de Villacañas y la Gramosa son de origen endorreico y tienen procesos de subsidencia, con un fuerte condicionamiento tectónico. Su sustrato está constituido por arcillas, margas y yesos del terciario, aunque la Laguna Larga tiene al sur un sustrato triásico con arcillas y yesos muy impermeables que da lugar a una alta concentración en sales. Esta laguna ha experimentado notables cambios en la calidad del agua, desde una alta eutrofización debido al aporte continuo de aguas residuales mal depuradas hasta la casi descontaminación, gracias a que se tomaron medidas encaminadas a mejorar la calidad, hecho que se inicia a principios de este siglo. La reducción de los

vertidos urbanos conlleva a que en la actualidad sea una laguna más estacional, pero con aguas más limpias. Por el contrario, la laguna Gramosa, a la que se vertían aguas procedentes de una fábrica próxima, está a día de hoy, salvo periodos húmedos excepcionales, seca casi todo el año.

Peña Hueca y Tírez, de origen endorreico, tienen un sustrato formado por materiales triásicos del keuper dominados por arcillas rojas y yesos, por lo que sus aguas tienen una alta concentración de sulfatos. Están rodeadas por calizas jurásicas y materiales cenozoicos. En Peña Hueca se incorporaban aguas procedentes de pozos con el objetivo de utilizar la salmuera para la extracción del azúcar de la remolacha, actividad que cesó hace más de una década. Estas lagunas no reciben ya aportes adicionales, por lo que mantienen una alta estacionalidad.

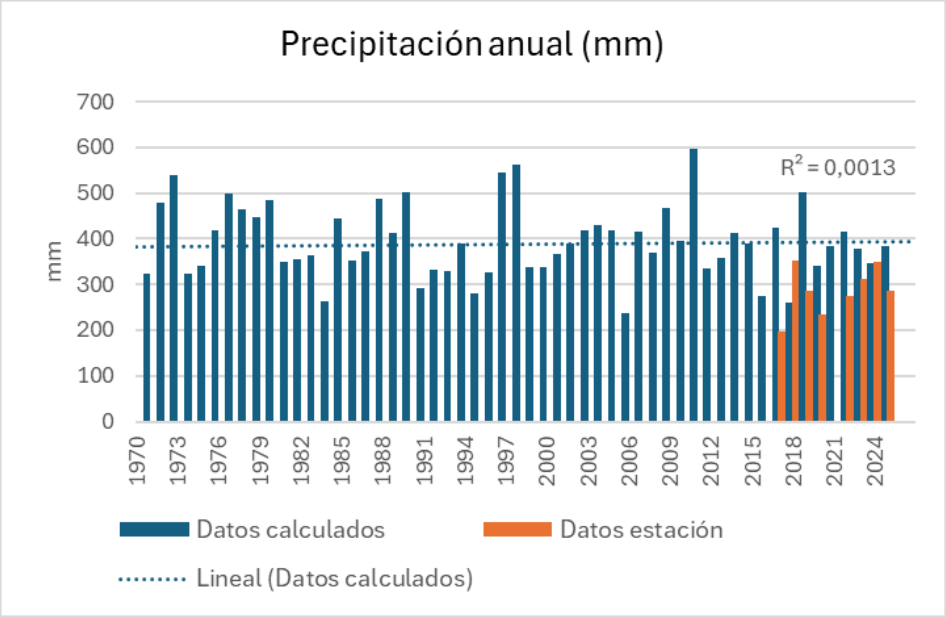
El Taray, situado en la desembocadura del río Riánsares y con aportes del Cigüela, tiene una extensa llanura de inundación sometida a procesos de subsidencia. El sustrato está formado por yesos y materiales detríticos finos, limos y arcillas del terciario y cuaternario. Esta laguna es privada con uso cinegético, por lo que tiene un alto manejo antrópico: creación de islas, conservación de la vegetación higrófila y gestión de la lámina de agua a partir de aguas tanto superficiales como subterráneas. No se permite el acceso, por lo que se desconoce la calidad actual de sus aguas más allá de lo interpretado por las imágenes satelitales.

La Laguna Grande de Villafranca también es de origen fluvial, con aportes desde el río Cigüela. Se asienta sobre materiales cuaternarios y cenozoicos rodeados de yesos, arcillas y margas del triásico, ubicada entre dos cuestas con influencia tectónica, pues está alineada con las lagunas del Taray y Villacañas en un eje norte–sur. Este humedal utilizado hace décadas como balneario, en la actualidad mantiene un uso recreativo, convirtiéndose en la conocida "playa de la Mancha".

Las Lagunas de Alcázar de San Juan se ubican aprovechando antiguos cauces fluviales, por lo que tienen un sustrato de materiales cuaternarios rodeados por sedimentos triásicos ricos en yesos. Este conjunto lagunar está interconectado mediante canales y recibe aguas desde el municipio de Alcázar, mostrando un gradiente hídrico que se reduce cuanto más alejado esté del núcleo urbano. La calidad de las aguas ha ido mejorando conforme han avanzado los sistemas de depuración y mejorado las actuaciones encaminadas a su conservación.

El clima se clasifica como árido de estepa fría o BSk según Köppen (Kottek et al. 2006), caracterizado por precipitaciones anuales medias que no alcanzan en el periodo 1970-2024 los 400mm, con mínimos de 196,2mm en 2017 y máximos de 597,7mm en 2010 en la estación de referencia de Alcázar de San Juan (Figura 3). La distribución temporal de la precipitación anual muestra más frecuencia de años con valores bajos que años moderados o altos: 26% de años con menos de 382 mm frente al 12% superiores a 455mm. Estacionalmente, alrededor del 60% de la pluviosidad anual se registra en invierno y otoño, mientras que el verano no alcanza el 10%. La tendencia lineal no muestra tendencia significativa, pues apenas se mueve de su valor medio (400mm anuales) (Figura 3). Los pocos años con registros completos en la estación de Alcázar de San Juan (2017-2025) reflejan sensibles diferencias con los datos obtenidos por ERA-5 (1970-2024), siendo los datos de AEMET en general algo inferiores (entre 36 y 151mm anuales), lo que evidencia la irregularidad espacial de las precipitaciones y las limitaciones de los datos calculados.

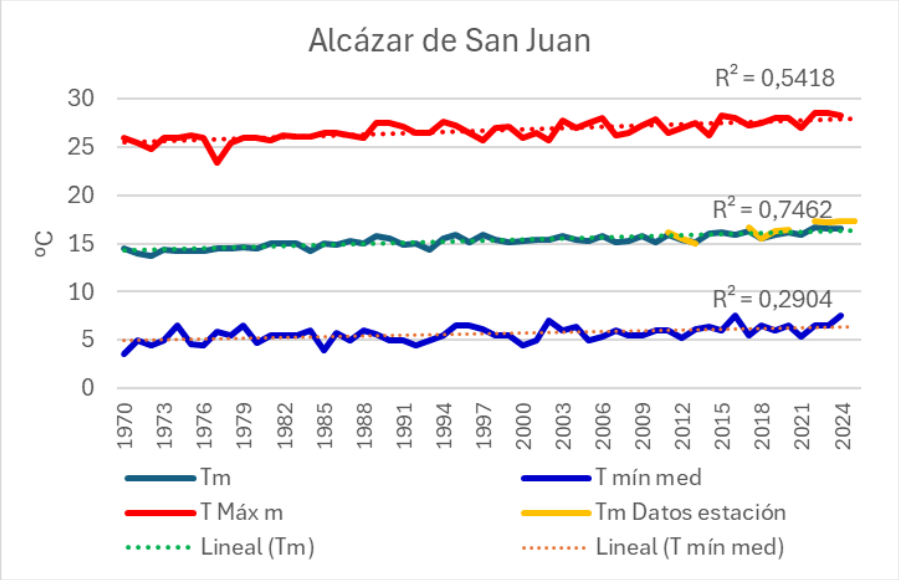
Figura 3. Precipitación anual en Alcázar de San Juan: 1970-2025



Fuente: elaboración a partir de Fick & Hijmans (2017), University of East Anglia Climatic Research Unit et al. (2025) y AEMET (2026).

Las temperaturas muestran inviernos fríos con temperaturas mínimas medias entre 3,5 y 7,5°C y periodos de heladas entre octubre y abril. La estación estival es muy calurosa con temperaturas máximas medias entre 23,4°C y 28,5°C (Figura 4) y máximas absolutas frecuentes > de 40°C (AEMET, 2026). La temperatura media anual de 15,3°C, ha oscilado desde los 14,4°C de los años setenta a los >16°C desde 2014, lo que ofrece una tendencia ascendente al menos en los últimos 55 años (1970-2025). El incremento mostrado mediante la tendencia lineal es de +0.375°C/década, con una significación del 75%, hecho que se advierte también en las máximas medias y mínimas medias, aunque con una significación más baja (Figura 4).

Figura 4. Temperaturas en Alcázar de San Juan: 1970-2024



Fuente: elaboración a partir de Fick & Hijmans (2017), University of East Anglia Climatic Research Unit et al. (2025) y AEMET (2026).

Estos humedales forman un microclima que se caracteriza por la amortiguación térmica, actuando como "islas de frío" en verano y como "islas de calor" en invierno (Pérez González y Sanz Donaire, 1998). Las temperaturas medias anuales indican que en esta comarca "no existe una relación directa entre la altitud y las temperaturas, pues es la estación de Campo de Criptana la que, localizada a mayor altitud y similar posición topográfica, presenta las temperaturas más elevadas cuando cabría esperar lo contrario. Debido a las escasas diferencias topográficas del terreno, mínimas pendientes y núcleos rurales concentrados, el principal microclima de esta amplia región viene condicionado por estos humedales" (García Rodríguez et al, 2023).

La evolución edáfica está vinculada a la gestión hídrica de los humedales y ríos. Cerca de estos, en la llanura de inundación, se desarrollan gleysoles y fluvisoles en sectores encharcados y solonchaks donde se acumulan las sales. En los bordes lagunares con vegetación higrófila se originan chernozems y kastanozems. Sobre materiales ricos en carbonatos y/o yesos se forman calcisoles y gipsisoles (Carlevaris et al., 1992).

Casi toda la comarca tiene uso agrícola, llegando los cultivos hasta las inmediaciones de las lagunas. Por ello la vegetación natural es muy residual y está limitada a pequeños enclaves no aptos para su aprovechamiento agrícola. "La vegetación potencial está caracterizada por la serie mesomediterránea manchega de *Quercus rotundifolia*, que apenas se localiza como pies aislados. La vegetación natural se observa en los bordes de las lagunas y márgenes de los cauces fluviales, con la presencia de especies halófitas e higrófilas: *Salicornias*, *Suaedas, Salsolas, Scirpus, Schoenus nigricans*, *Microcnemun caralloide, Juncus maritimus, Limonium sp.*, etc. y otras especies (*Tamarix sp, Cladium mariscus, Phragmites australis, Populus alba, Arundo donax*, etc.)" (Cirujano 1980, 1981, 2001 y 2010). Esta vegetación se adapta espacialmente desde el borde del área inundada hasta los cultivos próximos en función de su tolerancia a la hidromorfía o salinidad. En muchas lagunas se han acometido diferentes fases de revegetación de especies hidrohalófilas, con lo que su presencia actual es sensiblemente superior a décadas atrás.

4. Resultados y discusión

4.1. Características hídricas de las lagunas manchegas

En la Mancha Húmeda se localizan lagunas dulces, salobres y salinas vinculadas a su origen dispar, que muestran gran variabilidad espacio temporal. Las lagunas dulces (El Taray (Quero), Gramosa y Grande de Villafranca) están ubicadas en llanuras de inundación o reciben aguas subterráneas que lavan sedimentos de acuíferos no salinos. Las salobres y salinas (Larga de Villacañas, Peña Hueca, Tirez y complejo lagunar de Alcázar de San Juan) están en cuencas endorreicas o antiguas llanuras de inundación que tienen sedimentos salinos en superficie o en profundidad, pertenecientes al Triásico. A continuación, se señalan las características hídricas de las lagunas seleccionadas.

La laguna Larga de Villacañas ha sido durante muchas décadas un humedal permanente por los aportes urbanos. En la actualidad, tras años de esfuerzos por reducir la contaminación hídrica, tiene menores aportes adicionales de agua, por lo que pasa largos períodos de sequía, más acordes al clima. Sus aguas son una salmuera cloruradasulfatada-magnésica (Tabla 1). Los aportes urbanos dieron lugar a una alta contaminación y eutrofización con exceso de fosfatos, compuestos nitrogenados, detergentes, escasez de oxígeno disuelto y elevada turbidez en el agua (Pérez González y García Rodríguez, 2004). El pH se mantiene en rangos alcalinos (8,2-8,4) y la C.E. oscila de 1,54 a > 20 mS/cm en función del volumen de agua. Los cloruros oscilan considerablemente en función de los aportes recibidos y la evaporación local, de manera que a lo largo del año puede oscilar desde 820ppm tras fuertes lluvias hasta 174 276ppm en fechas estivales próximas a su desecación (Pérez González, 1995), aunque lo más frecuente es que se mantenga casi todo el período entre 1000 y 20 000ppm, propio de aguas salobres.

Tabla 1. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna Larga de Villacañas entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
1989	7,1 9,0	1,5 >20	820 174 276	1961 55 212	975 100 000	2,8 >5	1,0 110	0,07 8,7	1,7 16,5
1990	8,4 8,9	12,8 >20	7 189 22 471	12 797 79 292	1100 130 000	>5	1,0 75	0,02 3,6	>2,5
4/11	8,5	10	-	-	-	0	0	0	0,2
11/21	8,3	13,6	384	-	-	0,35	0	0	0,78
10/22	Laguna seca								
06/25	8,4	9,8	3000	5000	>10 000	0	0	0	1-2

Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm). Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar la notable reducción de fosfatos, nitratos y nitritos desde valores muy elevados en 1989-90 hasta prácticamente desaparecer en la última década gracias a la efectividad en los procesos de depuración de las aguas de los municipios adyacentes. Por el contrario, el amonio, indicador de aguas residuales, mantiene valores positivos, aunque notablemente inferiores a décadas atrás.

La laguna Gramosa de Villacañas en la actualidad casi ha desaparecido debido a que se han anulado los vertidos industriales del pasado y al ser invadida en parte por una nave industrial. En otoño de 2022 ambas lagunas estaban secas, a consecuencia de la intensa sequía que afectó a gran parte de España. Sin embargo, en 2025, fecha del último muestreo de campo, las cuantiosas lluvias registradas en primavera han vuelto a inundar la laguna Larga en toda su extensión, con unos 20 cm de altura, mientras que la Gramosa continua seca desde 2008.

Peña Hueca y Tirez son dos lagunas hipersalinas con larga estacionalidad. Los datos analizados se refieren a Peña Hueca (Tabla 2), pues tiene un período de inundación mayor. Esta laguna endorreica se alimenta de aguas superficiales y subsuperficiales de la cuenca y de "aguas freáticas procedentes de las carniolas que asoman en la margen occidental y supuestamente están situadas en el fondo de la laguna condicionando su desarrollo" (Pérez González et al. 2000). Se caracteriza por tener aguas con pH neutro cuando tiene más agua, y valores alcalinos cuando está próxima a la desecación. La conductividad eléctrica es >20 mS/cm y los cloruros oscilan entre 23 500 en los meses de mayor inundación y 213 000ppm cuando está próxima a la desecación, valores que se mantienen elevados en la actualidad (42 400ppm, 2025). Debido a la alta salinidad el contenido de sulfatos de las aguas es muy elevado, con cifras > 100 000ppm. Los valores de dureza son igualmente altos, con cifras más bajas en invierno y primavera, cuando el agua lagunar acaba de precipitar y la evaporación es reducida, aunque con valores casi siempre > 20 000ppm. Los fosfatos y nitratos presentan variaciones destacadas a lo largo del período analizado, alcanzando puntualmente cifras propias de contaminación agraria en primavera, por el lavado de las tierras cultivadas del entorno tratadas con fertilizantes ricos en estos compuestos, mientras que el resto del año son mucho más bajos.

Tabla 2. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna de Peña Hueca entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
1989	6,8 8,9	18,3>20	33 015 205 500	19 600 275 260	1050 >120000	0,0 4,3	0,4 409	0,01 0,7	0,5 15,5
1990	7,8 8,4	>20	23 500 213 000	32 895 158 333	10 100 135 000	0,9 1,8	0,8 4,4	0,0 0,9	>2,5
10/22	7,1	>20	52 000	>20 000	>100000	0,4	4,84	0,86	>1
06/25	7,6	>20	42 400	>20 000	-	2,32	-	-	<1

Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm).Fuente: elaboración propia.

La laguna del Taray se sitúa en la confluencia de los ríos Cigüela y Riánsares y mantiene agua dulce la mayor parte del año. Está afectada por procesos pseudokársticos, con numerosas dolinas, por la que se descargan aguas subterráneas y subsuperficiales. Al ser de propiedad privada no está permitida la toma de muestras, por lo que el seguimiento de su estado durante las últimas décadas debe realizarse mediante imágenes remotas. Los análisis de aguas en las proximidades revelan que son aguas duras, predominantemente sulfatado-cálcicas, debido a los sustratos ricos en yesos y carbonatos. Sólo en los períodos próximos a la desecación las aguas son salobres.

La laguna Grande de Villafranca de los Caballeros (Tabla 3) está situada en una difluencia del río Cigüela y se alimenta de un canal artificial a partir de este río (Peinado, 1994). El volumen de agua oscila en función de la meteorología local y manejo del agua, con alturas en torno 0,5m en décadas pasadas, sin apenas agua en años de sequía (6mm de altura en octubre de 2022) y cerca de 1m en años húmedos como 2025. Esta laguna se utiliza con fines recreativos, con espacios adaptados al baño y parte de la ribera con playas artificiales.

El pH del agua oscila en función de su volumen entre 7,2-8,6, siendo mayor cuanta menor cantidad de agua tenga por la mayor concentración de solutos. Se caracteriza por tener aguas salobres, con una C.E. de 15,68mS/cm, que desciende hasta 6,15mS/cm en picos de mayor llenado lagunar (junio 2025). Los cloruros oscilan entre 540-3500ppm, propio de aguas dulces a salobres. El contenido en sulfatos muestra una gran variabilidad temporal vinculada al manejo del agua y lavado de los sedimentos desde valores en torno a 2000 a >100 000ppm. Cuando la laguna tiene escaso volumen, las aguas son muy duras, con 10 000ppm de CO_3Ca en 2022, frente a 6000ppm en momentos de mayor altura de agua como junio de 2025, que pudo recuperar la actividad recreativa de baños en la llamada "playa de La Mancha". En la actualidad, las aguas son pobres en nutrientes tanto nitrogenados como fosfatados, por lo que carecen de contaminación y tienen niveles muy bajos de nitrógeno amoniacal.

Tabla 3. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna de Villafranca de los Caballeros entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
1989	7,5 8,6	-	800 3100	-	4250 7270	0,0 0,3	0,36 0,6	<0,02	-
1990	7,2 8,6	-	2400 3500	-	< 9000	0,0 0,35	0,05 0,4	<0,02	-
4/11	8,2	8,6	-	-	-	0	0	0	0,3
10/22	8,5	15,7	1600	10 000	>100000	0	0	0	<1
06/25	8,2	6,2	540	6000	>10 000	0	0	0	<1

Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm). Fuente: elaboración propia.

El complejo lagunar de Alcázar de San Juan lo forman tres humedales: La Veguilla, El Camino de Villafranca y Las Yeguas, conectados entre sí por canales artificiales (Figura 2). Se sitúan en un antiguo cauce del río Cigüela, muy próximas al citado núcleo. Las aguas residuales se vertieron sin reciclar a la laguna más próxima a Alcázar, La Veguilla, hasta 1986 y desde los noventa se vierten desde una depuradora. Debido a estos aportes urbanos y la interconexión entre ellas, estas lagunas presentan un gradiente de volumen de agua decreciente conforme más se alejan del pueblo, lo que repercute en la calidad de sus aguas y contenido de sales. Así, La Veguilla tiene un pH casi neutro, baja salinidad y escasos cloruros (Tabla 4). No obstante, sus aguas son semiduras y está eutrofizada, de modo que en la actualidad su contenido en nutrientes sigue siendo muy elevado, alcanzando el máximo valor en nitratos, nitritos y amonio, aunque se ha reducido en la última década el contenido en fosfatos.

La laguna del Camino de Villafranca tiene mayor salinidad que la anterior, pues oscila entre valores propios de aguas salobres a salinas. Su pH es alcalino, la dureza alta y un alto contenido en sulfatos y cloruros. El contenido de nutrientes disminuye considerablemente respecto a la laguna anterior, tanto en los compuestos nitrogenados como en los fosfatos (Tabla 5). La evolución temporal muestra una reducción considerable en fosfatos y nitratos desde finales de los años ochenta hasta la actualidad.

Tabla 4. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna de La Veguilla (Alcázar de San Juan) entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
4/11	7,6	5,4	-	-	-	3,0	10,0	0,3	0,7
10/22	7,1	2,4	200	800	-	1,01	13,42	2,73	9,0

Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm). Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna de El Camino de Villafranca (Alcázar de San Juan) entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
1989	8,5 9,4	-	2200 32 725	-	2000 25 000	0,0 3,9	0,1 0,2	0,01 0,4	
1990	8,2 8,7	-	9585 63 900	-	13 450 28 700	0,3 4,2	0,05 0,2	0,0 0,1	
4/11	8,6	19,6	-	-	-	2,0	2,0	0,03	0,2
10/22	8,4	16,5	5200	11 000	>100000	0,78	0,18	0,03	<1
06/25	Laguna seca								

Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm). Fuente: elaboración propia.

La laguna de Las Yeguas, al estar más alejada, es muy dependiente de la meteorología local, por lo que tanto en otoño de 2022 como en junio de 2025 estaba seca. Los valores de años anteriores permiten clasificarla como laguna muy salina, que en los momentos de máxima concentración llega a alcanzar pH de 9,7 y CE de 63,2mS/cm (Tabla 6). También son muy elevados los valores de sulfatos y cloruros. En cuanto a los nutrientes, en el pasado tuvo altas concentraciones de fosfatos y de nitratos.

Tabla 6. Parámetros físicos y químicos disponibles de las aguas de la laguna de Las Yeguas (Alcázar de San Juan) entre 1989 y 2025

	pH	CE	Cl^-	DUREZA	SO_4^{2-}	PO_4^{3}	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+
1989	8,6 9,7	-	2600 25 000	-	7820 23 125	0,9 5,2	0,0 0,3	0,01 0,3	-
1990	7,7 8,7	-	20 235 87 330	-	45 000 107 500	4,57 5,2	0,0 0,2	0,01 0,2	-
4/11	9,4	63,2	-		-	-	15,0	0	0
10/22	Laguna seca								
06/25	Laguna seca								

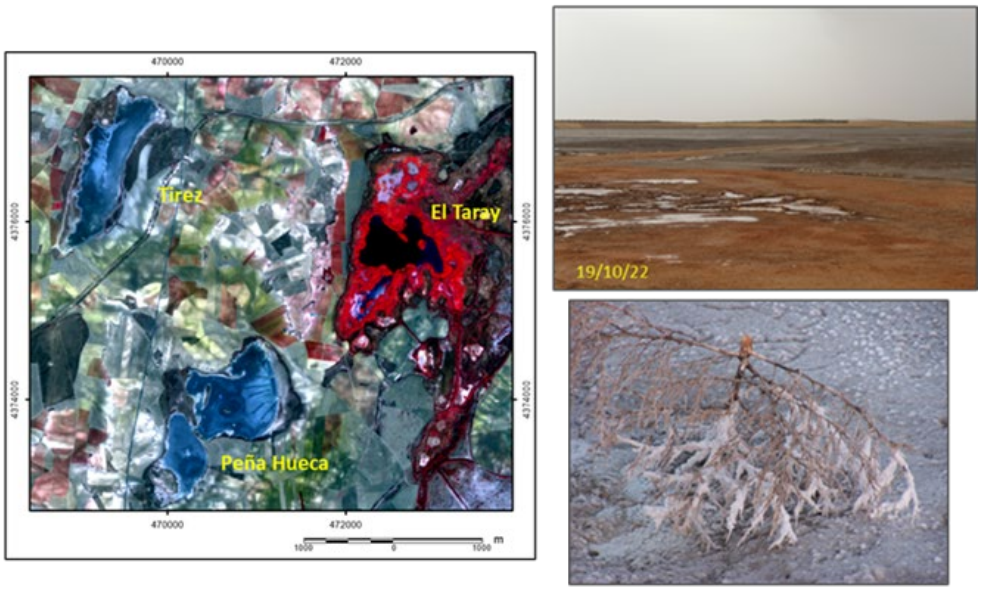
Leyenda: C.E (mS/cm), Cloruros, Dureza, Sulfatos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos y Amonio (ppm). Fuente: elaboración propia.

4.2. Variabilidad temporal de las lagunas manchegas

Durante el periodo 1984-2025 las lagunas seleccionadas muestran notables cambios anuales e interanuales dependientes de la meteorología y de la gestión de estos espacios. Conforme al clima mediterráneo del interior peninsular, presentan habitualmente máximos niveles de agua en primavera y mínimos estivales. La intensa evapotranspiración del verano y la escasa profundidad de las láminas de agua debieran secar todas las lagunas durante esta estación, pero los aportes de agua desde áreas urbanas, ríos y pozos próximos permite en algunos casos mantener una reducida lámina de agua, por lo que las lagunas aquí estudiadas están sometidas a una intensa acción antrópica (Santiesteban et al. 2009).

Junto a los cambios en las láminas de agua, hay oscilaciones en la presencia de sales superficiales, de forma que las lagunas salinas e hipersalinas en verano llegan a construir costras de sales solo identificables in situ, pues el carácter higroscópico de las sales enmascara su identificación en las imágenes de satélite. Como ejemplo de esta dicotomía, en las fotografías realizadas en campo en fecha similar a la imagen Sentinel 2 (Figura 5) se confirma que la laguna de Peña Hueca está prácticamente seca, mostrando sales en superficie, mientras que en la imagen de satélite en cualquier combinación de bandas parece que tiene agua. Esto es debido a la humedad subsuperficial de algunos humedales con aportes subterráneos.

Figura 5. Sales en la Laguna de Peña Hueca e imagen Sentinel asociada, 15/10/22, IRc-R-V



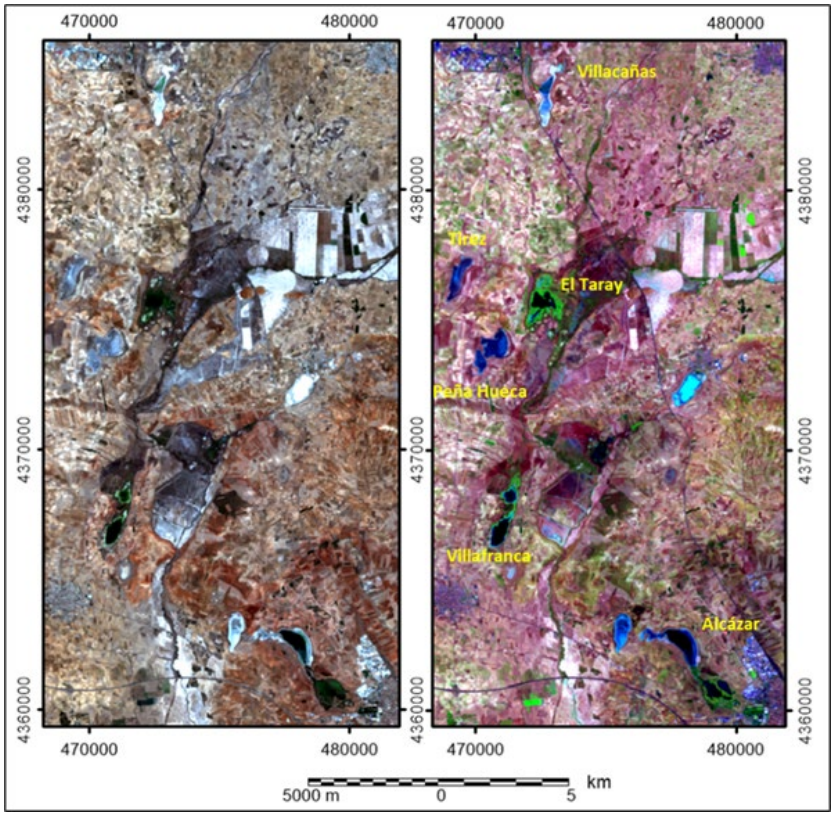
Fuente: Imagen Sentinel 2 (ESA, 2023) y autoras.

En general, en las imágenes en color natural (R-V-A) se discriminan las lagunas con agua en color negro o azulado, y sin agua con tonos desde blanco (sales en superficie), grisáceo (humedad subsuperficial) y verdoso (sapropel). Las imágenes en falso color que combinan los canales visibles con los infrarrojos cercanos y medios son óptimas para destacar el estado de la vegetación hidrófila, pero tienen el inconveniente de enmascarar el contenido real de agua en las lagunas, pues éstas suelen presentar tonos de azulados a negros (Figura 6).

Las mejoras espectrales realizadas permiten diferenciar las láminas de agua reales y no confundirlas con la humedad superficial (Figura 7):

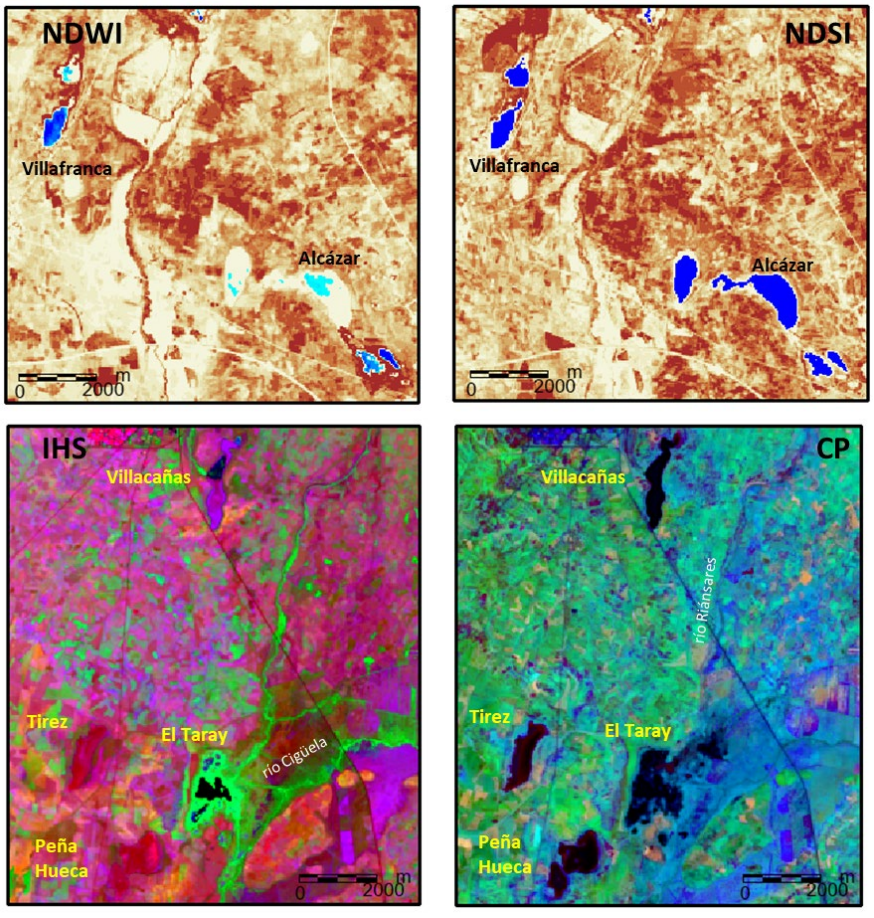
- NDWI: las láminas de agua más superficiales (con escasos milímetros) tienen tonos azul claro y valores positivos inferiores a 0,4; las lagunas con algo más de agua alcanzan valores entre 0,5-0,6, y las más profundas, con tonos azul oscuro, tienen valores > 0,9. Otros autores consideran área inundada en humedales valores > 0,1 (Morales et al. 2021). Sin embargo, en estas lagunas se requiere un valor superior para poder discriminar la humedad edáfica de la inundación.
- NDSI: los valores que marcan la delimitación de la cubeta inundada son >0,1, pero no separa las diferencias altimétricas de la lámina de agua.
- IHS: las lagunas secas se visualizan en tonos rosados, que se mimetizan con los campos de cultivo en barbecho y suelos desnudos, mientras que el agua aparece en tonos negros. Esta mejora es muy útil para conocer la vegetación higrófila, ya que la saturación en la respuesta del infrarrojo cercano la destaca en color verde brillante.
- Componentes Principales (CP): esta imagen muestra en negro el vaso lagunar y se diferencia en tonos azulados la llanura de inundación. Esta mejora es muy útil en el caso de La Mancha, pues las escasas diferencias topográficas del terreno dificultan la delimitación in situ, siendo esta mejora espectral de gran interés para analizar los riesgos de inundación.

Figura 6. Imagen Sentinel 2 en color natural (R-V-A) y falso color (IRm1- IRc-V), 15/10/2022



Fuente: elaboración a partir de una Imagen Sentinel 2 (ESA, 2023).

Figura 7. Mejoras espectrales (: NDWI, NDSI, IHS y CP) en una selección de imágenes Sentinel 2



Fuente: elaboración a partir de una Imagen Sentinel 2 (ESA, 2022).

Frente a los buenos resultados obtenidos para representar la humedad en lagunas de interior con otras mejoras espectrales como el Tasseled cap (Castañeda y Herrero, 2009), en la comarca manchega los suelos húmedos no se discriminan con precisión, dando mejores resultados las mejoras arriba comentadas. Otros índices utilizados, como el NDVI también permiten diferenciar la vegetación higrohalófila perimetral en las diferentes lagunas y en la llanura de inundación de los ríos (Díaz de Arcaya et al, 2005).

4.3. Análisis multitemporal de humedales manchegos mediante imágenes de satélite

Los cambios en la extensión de las láminas de agua presentan un mayor contraste anual entre verano y primavera, ya que son estas fechas las que habitualmente tienen los valores extremos, con máximos en primavera y mínimos en verano. Las lagunas hipersalinas de Peña Hueca y Tirez se secan todos los veranos, y los años más secos forman suelos poligonales y costras salinas de gran tamaño. También otras lagunas (Gramosa de Villacañas y Las Yeguas en Alcázar de San Juan) están secas en verano durante casi todo el periodo analizado (>94%, Tabla 7).

Tabla 7. Estado de lagunas manchegas en verano entre 1984-2025

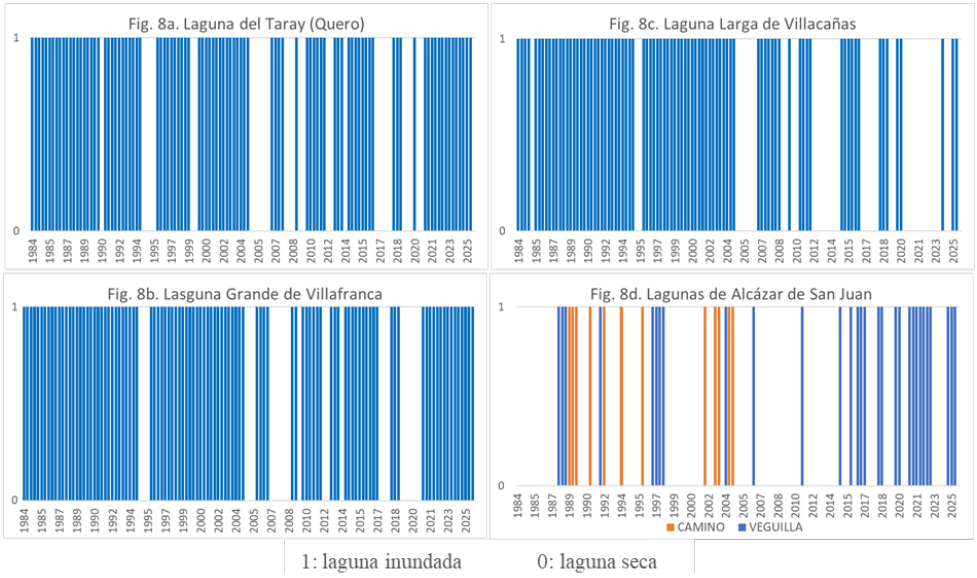
MUNICIPIO	VILLACAÑAS				QUERO	VILLAFRANCA	ALCÁZAR DE SAN JUAN		
Lagunas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Seca (%)	96,9	32,8	100	100	25,0	19,5	76,6	80,5	93,8
Inundada (%)	3,1	66,4	0	0	74,2	79,7	23,4	19,5	6,3

Leyenda: 1 Gramosa; 2: Larga; 3: Tirez; 4: Peña Hueca; 5: Taray (Quero); 6: Grande; 7: Veguilla; 8 Camino de Villafranca; 9: Yeguas.
Fuente: elaboración propia.

Más compleja es la evolución temporal de las otras lagunas de Alcázar de San Juan (Veguilla y El Camino), pues son muy dependientes de la gestión hídrica cambiante a lo largo de las cuatro décadas analizadas (1984-2025). En general, las dos lagunas mantienen una cierta lámina de agua en torno al 20% de años (Tabla 7), aunque su tendencia temporal es dispar. De hecho, muestran ciclos contrarios: mientras la primera, más próxima al núcleo urbano, tiene mayor volumen de agua en fechas recientes, la segunda lo tuvo al inicio del período, y desde 2005 registra largos períodos estivales secos (Figura 8).

Las tres lagunas más permanentes (Larga de Villacañas, Grande de Villafranca y El Taray) muestran un cambio de tendencia en el período analizado que parece conducir a períodos secos estivales más prolongados a partir de 2005, pese a tener diferente gestión hídrica. Desde el inicio de la serie en 1984 y hasta 2004 estos humedales han mantenido agua en verano en torno al 70-80% de años, con la excepción de los muy secos. De todos estos, el verano 1995 ha sido el que registró el mayor estrés hídrico.

Figura 8. Estado de inundación de las lagunas en verano entre 1984 y 2025



Fuente: datos propios obtenidos a partir de imágenes de satélite y trabajo de campo

Al observar la figura 8 se destacan las siguientes características:

- Las Lagunas de El Taray (Figura 8a) y Grande de Villafranca (Figura 8b) han estado inundadas durante el verano el 74% y 80% de años respectivamente, con un patrón temporal similar entre ellas, con más periodos secos entre 2005-2020 y más inundación desde entonces, debido al llenado artificial de las lagunas por motivos cinegéticos en el primer caso y recreativos en el segundo.
- La laguna Larga de Villacañas (Figura 8c) ha tenido agua en verano el 66% del período analizado, con un notable incremento de la estacionalidad desde 2005, pues a partir de este año muchos veranos se ha mantenido seca.

– Las lagunas de Alcázar de San Juan (Figura 8d), Camino y Veguilla, son más estacionales. La segunda, más próxima al núcleo urbano, con aportes de la depuradora, está inundada con más frecuencia en los últimos años, frente a la del Camino de Villafranca, que desde 2004 mantiene sus estíos secos.

Los largos períodos secos de estos humedales manchegos en las dos primeras décadas del siglo actual (Figura 3) no hacen más que acentuar su tendencia regresiva, mencionada décadas atrás (Sanz Donaire, 1995), cuando ya era patente el descenso de niveles de los acuíferos (Hera Portillo et al., 2013) y el creciente aprovechamiento de las aguas superficiales. Todo ello va en detrimento de las aguas "sobrantes", necesarias para ser retenidas en estas cubetas.

Durante la primavera, las lagunas hipersalinas (Tirez, Peña Hueca y Las Yeguas) solo tienen agua entre el 24-31% de los años del periodo analizado (Tabla 8, Figura 9a). Al estar muy vinculadas a las condiciones meteorológicas, dado su carácter endorreico, solo mantienen agua en la cubeta los años húmedos. Los más húmedos han sido más frecuentes en las últimas décadas del siglo XX (1972,1976, 1989, 1996 y 1997), frente a solo dos años húmedos en el siglo XXI (2010 y 2018, Figura 3). Al igual que en verano, a partir de la segunda década del siglo actual se advierte una tendencia a la reducción del agua lagunar, con una lámina que apenas asciende unos milímetros en un pequeño sector. Este menor volumen de agua está en relación con los descensos piezométricos de los acuíferos manchegos, que conducen a un detrimento en la alimentación de agua subterránea a los humedales (Hera Portillo et al., 2011) y a la lenta colmatación de sus cubetas.

Tabla 8. Contenido en agua de lagunas manchegas en primavera entre 1984-2025

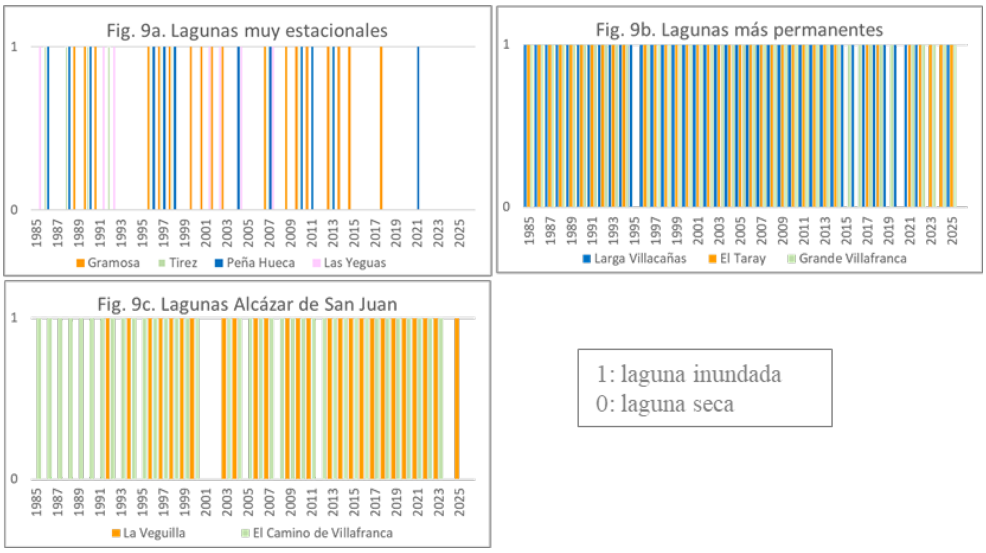
MUNICIPIO	VILLACAÑAS				QUERO	VILLAFRANCA	ALCÁZAR DE SAN JUAN		
Lagunas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Seca (%)	56,1	4,9	75,6	70,7	12,2	4,9	36,6	9,8	68,3
Inundada (%)	43,9	95,1	24,4	29,3	87,8	95,1	63,4	90,2	31,7

Leyenda: 1 Gramosa; 2: Larga; 3: Tirez; 4: Peña Hueca; 5: Taray (Quero); 6: Grande; 7: Veguilla; 8 Camino de Villafranca; 9: Yeguas.
Fuente: elaboración propia.

La tendencia ascendente de las temperaturas y la ausencia de esta en las precipitaciones (Figuras 3 y 4) conllevan también a la reducción de las láminas de agua y a incrementar su estacionalidad. No obstante, los humedales siguen desempeñando un papel fundamental en períodos de fuertes precipitaciones, amortiguando el riesgo de inundación.

Frente al comportamiento hídrico muy estacional de Peña Hueca y Tirez, la laguna salina de Las Yeguas fue más dependiente de los aportes antrópicos desde las otras lagunas de Alcázar de San Juan, pues estaban conectadas a través de un canal. Sin embargo, la conexión con la laguna del El Camino de Villafranca dejó de ser funcional a partir del inicio de los noventa, dependiendo desde entonces del régimen pluviométrico y de aportes subsuperficiales muy residuales. Por ello, se registra mayor volumen de agua hasta el inicio de la década de los noventa, mientras que el vaso lagunar ha estado prácticamente seco desde 1992 a la actualidad (Figura 9a), con periodos de inundación y sequía similares a las lagunas más estacionales. La laguna Gramosa de Villacañas, antaño con aguas salobres, tiene una tendencia similar, acentuada por la retirada de desagües industriales, por lo que sólo mantiene aguas ocasionales en momentos de intensos aguaceros que se pierden por evaporación con rapidez.

Figura 9. Distribución de los períodos de inundación (1) y sequedad (0) de lagunas manchegas en primavera



Fuente: elaboración propia.

De los tres humedales con aguas casi permanentes entre 1984-2025 la laguna Larga de Villacañas ha tenido cambios en la gestión del agua, con repercusiones notables en cuanto a calidad y volumen (Figura 9b). Esta laguna, que recibía los principales aportes de agua desde la depuradora del pueblo del mismo nombre, lleva una década reduciendo estos vertidos, por lo que ha disminuido la eutrofización e incrementado la estacionalidad, siendo más sensible a las variaciones meteorológicas. En la Figura 9b se observa la laguna seca durante los últimos años, aunque con una clara

recuperación tras las intensas lluvias de la primavera de 2025. Las lagunas de El Taray y Grande de Villafranca, con aportes adicionales desde los ríos y/o pozos próximos, tienen agua la mayor parte de los años (>90%), y sólo se secan en años coincidentes de intensa sequía. Sin embargo, a diferencia de la laguna Larga de Villacañas, estas apenas muestran procesos de eutrofización.

Las lagunas de Alcázar de San Juan con aportes urbanos dependen en gran parte de estos para explicar su variabilidad temporal. Al comparar sus lagunas, se observa el comportamiento hídrico dispar, de modo que la laguna del El Camino de Villafranca mantiene agua casi todos los años (90,2%), frente a la Veguilla, encharcada un 63,4% del período (Tabla 8). Además, esta laguna, la más próxima al núcleo urbano, estuvo prácticamente seca hasta 1991 y desde entonces incrementa su volumen de agua, especialmente entre 2013-25 (Figura 9c).

Por tanto, durante el período de máxima inundación las lagunas más antropizadas no muestran tendencia clara entre 1984-2025, siendo muy dependientes de los aportes adicionales. Sin embargo, las muy estacionales, parecen prolongar su período seco desde la llegada del siglo XXI y extender este déficit en la última década.

Cabe destacar que las lagunas manchegas situadas aguas arriba de Las Tablas de Daimiel han visto reducido su volumen de agua y mejorada su calidad a partir de los años noventa, ya que la contaminación producida en el citado Parque Nacional obligó a depurar primero y a reducir después las aguas residuales vertidas a las lagunas. Hasta esa década, estas aguas vertían directamente a los humedales, como ocurría en Alcázar de San Juan, Miguel Esteban, Pedro Muñoz, Villacañas, etc. Estos aportes aumentaron el contenido de detergentes, fosfatos y nitratos, lo que provocó la eutrofización de algunas lagunas (Peinado, 1996; Peinado y Plaza, 2011). Aunque hay lagunas que no forman parte del río Guadiana (Villacañas, Tirez, Peña Hueca), comparten los acuíferos, por lo que existen interconexiones superficiales y subterráneas con este río. Las medidas encaminadas a la mejora en la calidad de las aguas han tardado casi dos décadas en obtener buenos resultados.

5. Conclusiones

El estudio multitemporal entre 1984 y 2025 muestra que las lagunas presentan un mayor contraste anual entre los meses de verano y primavera, mínimos y máximos hídricos respectivamente. La tendencia temporal indica una marcada reducción en el contenido en agua de todos los humedales, siendo muy intensa en las lagunas salinas más estacionales. Esto es debido al descenso generalizado de los acuíferos de La Mancha y a los cambios en el manejo del agua con reducción de aportes adicionales. Además, el incremento progresivo de las temperaturas sin cambios significativos en las precipitaciones anuales contribuye a la reducción temporal de las láminas de agua.

La falta de agua en estas lagunas manchegas fue muy evidente tras la sequía de los primeros años noventa (91-95) y de la última década del siglo actual. Estos humedales se recuperaron tras la primera sequía y de momento también en 2025. Sin embargo, los cambios en el manejo del agua, uso extensivo de regadíos, descenso de los acuíferos y posible extensión de los períodos secos no ofrecen demasiadas esperanzas de recuperación.

La interpretación de imágenes de satélite, contrastada con trabajos de campo y laboratorio, permite conocer la variabilidad espacio temporal de los humedales. Las mejoras espectrales con resultados más precisos en láminas de agua someras son:

- El índice de la diferencia normalizada de agua (NDWI) discrimina los humedales con agua y sus distintos niveles de inundación.
- El índice normalizado modificado de agua o de nieve (NDSI) identifica masas de agua, delimitando bien la cubeta inundada con valores superiores a 0,1. No obstante, no separa las diferencias altimétricas de la lámina de agua.
- El IHS (Intensidad Hue y Saturación) es muy útil para conocer la vegetación higrófila y las láminas de agua.
- En terrenos muy llanos y con movimientos laterales de agua, la mejora espectral en componentes principales permite delimitar la amplitud de la llanura de inundación, que en el caso de La Mancha es complejo realizarlo incluso in situ, dado que las diferencias altimétricas son mínimas.

Estos humedales son ecosistemas frágiles, muy variables en la extensión y altura del agua, que no sobrepasa el metro en las épocas más húmedas. Tienen gran valor ecológico y paisajístico, con diversidad de vegetación y fauna. Además, estas lagunas tienen alta capacidad de absorción de contaminantes. Pese a su importancia ambiental son ecosistemas muy antropizados, con alteraciones en su régimen hídrico y en los terrenos circundantes.

Aunque la tendencia general sea a la reducción o casi pérdida de agua en las lagunas, en periodos o años de fuertes precipitaciones siguen siendo espacios de gran amortiguación de inundaciones. Una vez llega el agua a los humedales se inician los ciclos y funciones ecológicas propias de estos espacios.

Contribución de la autoría

Las dos autoras del trabajo han realizado conjuntamente todas las fases del estudio.

Referencias bibliográficas

Armijo Farías, A. N. (2022). *Monitoreo remoto de 3 humedales urbanos de Latinoamérica: relación entre indicadores y aumento de la temperatura superficial* [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.

Balázs, B., Bíró, T., Dyke, G., Singh, S. K., & Szabó, S. (2018). Extracting waterrelated features using reflectance data and principal component analysis of Landsat images. *Hydrological Sciences Journal***,** 63(2), 269–284. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1425802

Cabello, J. & Paruelo, J.M. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas*, 17 (3), 1–3. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=573

Carlevaris, J.J., Horra de la, J.L. & Rodríguez, J. (1992): *La fertilidad de los principales suelos agrícolas de la zona oriental de la provincia de Ciudad Real. La Mancha y Campo de Montiel*. CSIC, Madrid y Consejería de Agricultura de Castilla La Mancha.

Castañeda, C. & Herrero, J. (2009). Teledetección de cambios en la Laguna de Gallocanta. In M.A. Casterad, C. Castañeda (Eds). *La Laguna de Gallocanta Medio natural, conservación y teledetección*. Tomo VII (pp. 103-126). Madrid: Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural.

Cirujano, S. (1980). *Anales del Jardín Botánico*, (37), 155-192.

Cirujano, S. (1981). Las lagunas manchegas y su vegetación II. *Anales del Jardín Botánico*, (38), 187-232.

Cirujano, S. (2001). *Flora y Vegetación acuáticas de las Lagunas de La Mancha Húmeda*. Toledo: Instituto Provincial de Investigaciones y Estudios Toledanos. Diputación Provincial de Toledo.

Cirujano (2010). Plantas acuáticas de la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda. In M Pérez, M.J Aramburu, J.L González. (Eds). *Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda: retos y oportunidades de futuro* (pp. 52-61). Toledo: Junta de la Comunidad de Castilla La Mancha.

Cirujano, S., Medina, L., & Moreno, J. L. (2014). Vegetación acuática y conservación de humedales en la Península Ibérica. *Limnetica*, 33(2), 327–342.

De Roeck, Els R., Verhoest, N.E.C., Miya, M.H., Lievens, H., Batelaan, O., Thomas, A. & Brendonck, L. (2008). Remote Sensing and Wetland Ecology: a South African Case Study. *Sensors* (8), 3542–3556. https://doi.org/10.3390/s8053542

Díaz de Arcaya, N., Castañeda, C., Herrero, J. & Losada, J.A. (2005). Cartografía de coberturas asociadas a las Fluctuaciones de la Laguna de Gallocanta. *Revista de Teledetección*, (24), 61-65. http://www.aet.org.es/revistas/revista24/AET24-11.pdf

Donaire Jiménez, C. (2005). La diversidad de humedales de la provincia de Ciudad Real. *Ecosistemas*. 14 (3), 100-106. https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/433

ESA (2022). Sentinel hub. Agencia Espacial Europea. https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/

ESA (2023). Copernicus Open Access Hub. In Agencia Espacial Europea. Retrived from https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017), WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatology*, 37: 4302-4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

García Jerez, O. & de la Cruz, M. A. S. (2016). El interés didáctico de los paisajes alterados: la Reserva de la Biosfera de La Mancha húmeda (España) como ejemplo de estudio. *Revista Contexto & Educação*, 31 (99), 52-80. https://doi.org/10.21527/2179-1309.2016.99.52-80

García Rodríguez, M.P & Pérez González, M.P. (1999). Estudio mediante imágenes TM del entorno de Villacañas (Toledo). *Revista de Teledetección*, (11), 13–22. https://aet.org.es/revistas/AET11_2.pdf

García Rodríguez, M.P., Pérez González, M.P. & Sanz Donaire, J.J. (2006). Variabilidad hídrica y edáfica de humedales peninsulares interiores a partir de imágenes Landsat (TM y ETM). *Estudios Geográficos*, LXVII (260), 57–78. https://doi.org/10.3989/egeogr.2006.i260.43

García Rodríguez, M.P. (Coord.). (2023) *Itinerarios de Trabajos de Campo en Geografía Madrid y su entorno (III)*. Docta Complutense, https://docta.ucm.es/entities/publication/ea43130e-f514-4861-a54f-f430bedf0205/full

I.G.M.E. (2010). Hoja geológica de Alcázar de San Juan. Hoja 713, 1:50.000, 2ª Serie, 1ª edición. Madrid, 46 pp. https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?language=es&id=713

I.G.M.E. (2015). Hoja geológica de Villacañas. Hoja 687, 1:50.000, 2ª Serie, 1ª edición. Madrid, 82 pp. https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=687&language=es

Hera Portillo, A. D. L., Fornés Azcoiti, J. M., & Llamas Madurga, M. R. (2011). Servicios de los ecosistemas de humedales de la Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda. En *Congreso Ibérico sobre las Aguas Subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI* Zaragoza. 5–8. http://hdl.handle.net/10261/273692

Hera Portillo, A. D. L., Fornés Azcoiti, J. M., García de Domingo, A., Durán Valsero, J. J., Morales García, R., & Losa Román, A. D. L. (2013). Caracterización hidroquímica de los humedales Ramsar españoles. En Fernández Uría, A. (Ed.), (pp. 823–834). *X Simposio de Hidrogeología Serie: Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Madrid: CSIC - IGME. https://vdocuments.mx/hidrogeologia-y-recursos-hidraulicos-infoigme-para-la-interpretacion.html?page=2

Kumar, A., Sinha, S., & Taylor, G. (2013). Wetland classification using image fusion techniques. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1), 073616. https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.073616

MITECO (2005). *Red Española de Reservas de la Biosfera (RERB), Mancha Húmeda.* Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. http://rerb.oapn.es/red-espanola-de-reservas-de-la-biosfera/reservas-de-la-biosfera-espanolas/mapa/mancha-humeda/ficha

MITECO (2023). *Inventario español de zonas húmedas.* Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/inventario_esp_zonas_humedas.aspx

Morales, S., Ruiz, M. & Soria, J. M. (2021). Estudio de las fluctuaciones del nivel del agua en la laguna de Gallocanta (Aragón, España) mediante imágenes satelitales de Sentinel-2. *Revista de Teledetección*, (58), 119–129 https://doi.org/10.4995/raet.2021.14246

Peinado, M. (1994). *Funcionamiento y variabilidad de los geosistemas de los humedales manchegos*. [Tesis Doctoral, Universidad Complutense].

Peinado, M. (1996). The endorreic complex of La Mancha's Lagoons, Spain. In C. Morillo & J.L. González (Eds), *Management of Mediterranean Wetlands. II. Case Studies 1. Proyecto MedWet*. Unión Europea. (pp. 129–139). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

Peinado, M. & Plaza, J. (2011). La Reserva de la Biosfera y La Mancha Húmeda: Geografía, Territorio y Paisaje. In M. Pérez, M.J. Aramburu, J.L. González, (Eds). *Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda: retos y oportunidades de futuro* (pp. 43–51). Toledo: Junta de la Comunidad de Castilla La Mancha.

Pérez González, M.P. 1995. *Humedales de la confluencia de los ríos Riánsares y Cigüela: estudio de ciertas funciones*. [Tesis Doctoral, Universidad Complutense]. http://eprints.ucm.es/2423/

Pérez González, M.P. & Sanz Donaire, J.J. 1998. Clima y microclima de la Mancha Húmeda. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, (18), 205–237. https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9898110239A

Pérez González, M.P., Sánchez Pérez de Évora, A. García Rodríguez, M:P. & Sanz Donaire, J.J. (2000) Humedales Manchegos. In J.J. Sanz Donaire & Mª E. Pérez González, M. E. (Edits). *XV Jornadas de Campo de Geografía Física. Guía de Campo*. (pp. 62–82). Madrid: Dpto. de Análisis Geográfico regional y Geografía Física y A.G.E.

Pérez González, M.P.& García Rodríguez, M.P. (2004). Análisis de la contaminación hídrica en humedales de ambiente semiárido aplicando teledetección (La Mancha, 1992-2001). *Estudios Geográficos*, 65 (254), 101–119. https://doi.org/10.3989/egeogr.2004.i254.193

Pérez Ortega, M. (2011). *Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de La Mancha Húmeda*. [Trabajo Fin de Máster, Universidad Complutense]. https://eprints.ucm.es/id/eprint/13964/

Ramsar (2023). España. https://www.ramsar.org/es/humedal/espana

Rodríguez García, J. & Pérez González, A. (1999). Clasificación geomorfológica de los humedales y fondos endorreicos de La Mancha centro – occidental. *Geogaceta*, (26), 83–86. http://hdl.handle.net/10272/10079

Rodríguez-Valero, M.I. & Alonso-Sarria, F. (2019). Classification of Landsat 8 images in the Segura Hydrographic Demarcation. *Revista de Teledetección*, (53), 33–44. https://doi.org/10.4995/raet.2019.11016

Sanz Donaire J.J. (1995). De humedales a secarrales ¿inexorable evolución de las higrocoras del centro peninsular? *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, (15), 663–671. https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9595220663A/0

Sanz Donaire, J.J. (2000): Descriptive and Functional Wetland Typology and Classification. *Observatorio medioambiental*, (3), 311–340.
https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0000110311A/21960

Santiesteban, J. I., Mediavilla, R., Gil García, M. J., Domínguez Castro, F., & Ruiz Zapata, M. B. (2009). La historia a través de los sedimentos: Cambios climáticos y de uso del suelo en el registro reciente de un humedal mediterráneo (Las Tablas de Daimiel, Ciudad Real). *Boletín Geológico y Minero*, 120 (3), 497–508. https://core.ac.uk/reader/19715153

University of East Anglia Climatic Research Unit; Harris, I.C.; Jones, P.D. & Osborn, T. (2025): *CRU TS4.09: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.09 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2024). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, date of citation*. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/9cf07e92afaa405da4f40b6733f362d3

USGS (2023). Earth Explorer. In U.S. Geological Survey. https://earthexplorer.usgs.gov/

Vega Martín, L. (2006). La Teledetección aplicada al Inventario de Humedales. *Mapping*, (110), 14–22. http://sehumed.uv.es/revista/SEHUMED_04_P0401.PDF#:~:text=La%20teledetecci%C3%B3n%20espacial%20%E2%80%93t%C3%A9rmino%20aplicable%20a%20una%20amplia,en%20el%20estudio%20y%20seguimiento%20de%20zonas%20h%C3%BAmedas

Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference WaterIndex (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, (27), 3025-3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179