

HERRAMIENTAS DE APOYO A LA GESTIÓN DE LOS HUMEDALES DE ANDALUCÍA BASADAS EN *GOOGLE EARTH ENGINE*

Gabriel Martorell Guerrero ⁽¹⁾, Ana Isabel Marín Guerrero ^(2,3), Antonio Sánchez Espinosa ⁽¹⁾, Christoph Schröder⁽¹⁾

⁽¹⁾ European Topic Centre for Spatial Analysis and Synthesis (ETC-UMA). Universidad de Málaga. Edificio de Investigación Ada Byron, Ampliación Campus Teatinos. Málaga, España

⁽²⁾ Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Universidad de Málaga. Edificio de Investigación Ada Byron, Ampliación Campus Teatinos. Málaga, España

⁽³⁾ Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Málaga. Campus Teatinos, Málaga, España.

RESUMEN

Los humedales son ecosistemas claves a nivel global para la provisión de servicios ecosistémicos tan importantes como la regulación climática o el mantenimiento de la biodiversidad. Sin embargo, en las últimas décadas la situación de degradación y desaparición de estos hábitats es alarmante a pesar de ser centro de múltiples políticas internacionales de protección que, a la luz de los resultados que están teniendo, no han tenido la efectividad esperada en su implementación real. Por tanto, es necesario tomar medidas urgentes dirigidas a revertir esta situación y que su implementación sea evaluada de forma objetiva, sistemática y recurrente. Este trabajo presenta una herramienta web llamada *GreenEye Hub* para el seguimiento de los humedales del Inventario de Humedales de Andalucía basada en imágenes de satélite del Sentinel-2, técnicas de teledetección y en tecnologías de procesamiento de datos masivos mediante *Google Earth Engine*. La herramienta, con un diseño orientado a la gestión de estos ecosistemas, presenta una consola de visualización que permite realizar el seguimiento de los principales indicadores de agua y vegetación y el análisis de tendencias de estos. Es, por tanto, un sistema de apoyo a la gestión y a la toma de decisiones. Este estudio proporciona información de cómo es factible en la actualidad desarrollar un sistema de seguimiento de humedales a escala regional a partir de datos gratuitos accesibles y cómo esta herramienta constituye un proceso de transferencia del conocimiento desde la ciencia a la gestión.

Palabras clave: Andalucía, humedal, monitorización, Sentinel, teledetección

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales, por sus singulares características, se encuentran entre los ecosistemas más complejos, dinámicos y productivos del planeta. Estos desempeñan una serie de funciones y proveen de unos servicios ecosistémicos que les otorgan un elevado valor ambiental, económico, cultural, social y paisajístico (Convenio de Ramsar, 2021). Los humedales son ecosistemas claves en procesos globales como el ciclo del agua o el ciclo del carbono, y, por tanto, determinantes para la seguridad hídrica, el desarrollo sostenible, la pérdida de biodiversidad global y el cambio climático. Los humedales, en su condición de componentes esenciales de la biodiversidad y del patrimonio natural, contribuyen directa

o indirectamente a los 75 indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible-ODS de las Naciones Unidas (Convenio de Ramsar, 2018).

A pesar de la relevancia de estos ecosistemas y de los importantes servicios ecosistémicos que prestan al ser humano, la superficie de humedales se ha reducido en 35% de su superficie a nivel global desde 1970, y alrededor del 87% desde 1700 (Davidson, 2014). De hecho, están considerados como los ecosistemas más amenazados de la Tierra (Convenio Ramsar, 2022). En el contexto mediterráneo, esta situación es aún más dramática, si cabe, ya que la superficie de humedales naturales se ha visto fuertemente reducida entre 1975 y 2005 desapareciendo entre el 45% y el 51% de estos hábitats (OZHM, MedWet & Tour de Valat, 2018).

La pérdida y degradación de los humedales está especialmente vinculado, tanto en el ámbito mundial como europeo, al cambio de usos de suelo y otras amenazas combinadas relacionadas con el cambio climático, la explotación de recursos hídricos, contaminación y especies invasoras (IPBES, 2019; Comisión Europea, 2020). Estas son también las principales causas generadoras de la degradación y pérdida de los humedales españoles que se acentúan por la escasa integración sectorial, la falta de conocimientos, la insuficiente financiación y la falta de internalización de los costes ambientales de ciertos sectores de actividad (MITECO, 2023).

La tasa de degradación y pérdida de los humedales que existe aún hoy en día evidencia que, a pesar de los esfuerzos realizados en el diseño de políticas de conservación de estos ecosistemas en los últimos 50 años (Convención Internacional sobre Humedales de Ramsar, que fue firmada en febrero de 1971, entró en vigor en 1975 y que España suscribió en 1982), la implementación efectiva de las mismas ha sido muy deficiente, incluso en regiones europeas. De este modo, los impulsores causantes de la pérdida y degradación de los humedales siguen operando en la actualidad y se requiere un mayor compromiso de los agentes locales y estatales para la gestión, conservación y restauración de estos ecosistemas.

Recientemente, en el marco europeo, se han establecido líneas estratégicas a través del Pacto Verde Europeo y la Estrategia de la Unión Europea sobre Biodiversidad para 2030. Estas han sido incorporadas en el Plan Estratégico de Humedales a 2030 de España (MITECO, 2023), que fija el marco de referencia y los compromisos existentes que han de regir la planificación para la conservación y el uso sostenible de los humedales españoles.

La caracterización, conservación y gestión eficaces de los humedales requieren datos sobre el estado del humedal y sus especies y las amenazas para fundamentar la toma de decisiones y la gestión adaptativa. El seguimiento detallado y convencional de los humedales a través del trabajo de campo requiere tiempo y recursos económicos y humanos, lo que, en muchos casos, limita la frecuencia y resolución del seguimiento de los humedales (Lang et al., 2015). En comparación con las técnicas convencionales de cartografía de campo, el uso de tecnologías basadas en datos de observación remota, como la teledetección, es una técnica rentable y eficiente utilizada para adquirir información espacial y temporal detallada sobre los humedales en grandes áreas (Guo, et al., 2017; Mahdianpari et al., 2022). La disponibilidad de datos satelitales de libre acceso (ej: Sentinel o Landsat) proporcionan una observación continua, exhaustiva y normalizada de los ecosistemas en grandes áreas, que se han utilizado ampliamente para cartografiar y monitorear humedales (Sánchez-Espinosa y Schröder, 2019). El análisis oportuno y preciso de los cambios permite monitorear las condiciones y el estado de los humedales, así como las actividades naturales y/o humanas asociadas (Asokan y Anitha, 2019; Morant et al., 2021). En un contexto de creciente difusión de datos de campo o de teledetección, de aumento de los recursos computacionales y de avance de la inteligencia artificial (IA), se ha promovido recientemente el desarrollo de enfoques operativos y estandarizados (Rebelo et al., 2018; Weise et al., 2020). Así, la plataforma de computación en la nube *Google Earth Engine* representa una herramienta crucial para realizar un seguimiento de los ecosistemas a escala mundial y series temporales extensos. Una evaluación de este tipo, en combinación con los datos in-situ, ofrece oportunidades de gestión

para adoptar medidas adecuadas que faciliten la conservación, la restauración y el mantenimiento de los humedales.

2. OBJETIVOS

En vistas a lo anteriormente expuesto, en este estudio se incluye como objetivo principal la aproximación, de forma operativa y funcional, de tecnologías de computación masiva en la nube para el análisis de datos espaciales y teledetección, a partir de datos públicos y gratuitos de satélite, a la gestión y seguimiento de los humedales. El trabajo, que se engloba en el proyecto LifeWatch INDALO (Infraestructuras científicas para el seguimiento y adaptación ante el cambio global en Andalucía), pretende, además, los siguientes objetivos secundarios:

- el análisis y la selección de indicadores derivados de teledetección que sean útiles en el seguimiento y gestión de los humedales,
- el desarrollo de las herramientas de apoyo a la gestión de humedales que permita la visualización y extracción de información de relevante sobre los indicadores predefinidos,
- el escalado regional de la herramienta para el seguimiento de humedales a la comunidad autónoma andaluza.

3. METODOLOGÍA

Las herramientas presentadas en este estudio han sido desarrolladas específicamente para el seguimiento de humedales en la Comunidad Autónoma de Andalucía; concretamente, aquellos que se encuentran recogidos en el Inventario de Humedales de Andalucía (IHA) a fecha de septiembre de 2022. En el IHA se recopilan sistemáticamente los humedales andaluces con valores naturales singulares. Estos valores pueden ser edafológicos, geomorfológicos, hidrológicos, fisicoquímicos, ecológicos, biológicos y culturales. Andalucía alberga el 17% de los humedales españoles en número, lo que representa, sin embargo, el 56% de la extensión total de las áreas inundables españolas en superficie (BOJA, 2004). A fecha de septiembre de 2022, el IHA incluía 224 humedales que constituyen las áreas de desarrollo y mapeo del sistema de seguimiento presentado en este trabajo.

En este trabajo se muestra un ejemplo del uso de las herramientas y sus resultados en la Laguna Dulce de Campillos, perteneciente a la Reserva Natural Lagunas de Campillos, en la provincia de Málaga. El diseño, desarrollo y testeo de las herramientas se ha realizado sobre una zona de estudio piloto formada por tres complejos de humedales: las Lagunas de Campillos, el Complejo endorreico de La Lantejuela y los Humedales del sur de Córdoba. La versión final de las herramientas incluye todos los humedales incluidos en el IHA a fecha de septiembre de 2022.

Los cuatro elementos claves que componen la metodología desarrollada en este trabajo son: los datos de observación terrestre (OT), es decir, las imágenes de satélite, las geometrías relativas al área de estudio (los humedales y sus delimitaciones hidroecológicas), los índices espectrales y la plataforma de computación en la nube *Google Earth Engine*, que ha sido la plataforma seleccionada en este estudio para implementar las herramientas de seguimiento de los humedales andaluces.

Los datos de observación terrestre seleccionados para este trabajo son los aportados por la Comisión Europea a través de la Agencia Espacial Europea (ESA, en inglés) en el marco del Programa Copernicus para la Observación de la Tierra. Concretamente, la colección integrada en *Google Earth Engine Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*, que contiene imágenes de reflectancia superficial corregidas atmosféricamente y ortorrectificadas de nivel 2A (L2A), descargadas de Sentinel

Hub y procesadas con sen2cor. La serie temporal trabajada es completa, es decir, desde 2017 hasta la actualidad con una resolución espacial de 10 m y resolución temporal de 5 días.

Los índices espectrales considerados básicos para el seguimiento de humedales son:

- el índice de agua, concretamente el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (conocido como NDWI por sus siglas en inglés) que permite identificar cuerpos de agua a partir de la reflectancia del agua y cuya metodología se detalla en McFetters (1998);
- el índice de vegetación, concretamente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (conocido como NDVI por sus siglas en inglés) que, de forma simple, es un indicador de biomasa fotosintéticamente activa y ha sido ampliamente aplicado en la identificación y seguimiento de las masas vegetales (Lambin, 2001). El valor de este índice varía entre -1 y 1, siendo los valores superiores a 0 los que indican el grado actividad fotosintética.

Por otro lado, en la actualidad la plataforma *Google Earth Engine* representa una oportunidad crucial para la adquisición, el procesamiento y la visualización de cantidades masivas de datos espaciales sin requisitos computacionales por parte del usuario. *Google Earth Engine* proporciona acceso a la inmensa mayoría de los datos de teledetección multitemporales, públicos y de libre acceso, y ofrece potencia computacional en la nube para aplicar algoritmos complejos.

Para la implementación operativa en *Google Earth Engine* se ha desarrollado un conjunto de herramientas llamado *GreenEye Tools* (GET) que contiene herramientas de obtención, preprocesamiento y procesamiento de imágenes de Sentinel-2 y de cálculo de índices espectrales, dinámicas de aguas superficiales y usos y coberturas del suelo desde el *Code Editor* de *Google Earth Engine*. Las herramientas son altamente personalizables y escalables y se pueden acceder a ellas desde *scripts* o integrándolas en aplicaciones basadas en Earth Engine.

Para GET, los únicos requisitos son dos geometrías: un polígono para el humedal o humedales (solo requerido para la generación de gráficas usando las herramientas integradas) y una geometría relativa a la región de estudio y que delimitará la extensión del análisis, que puede ser idealmente un polígono o un punto, en cuyo caso la extensión del análisis será la extensión de las imágenes de Sentinel-2 que con él intersecan. En este estudio, las geometrías de entrada han sido, por un lado, los datos espaciales incluidos en el IHA y que acompañan a los humedales seleccionados y, por el otro, un área de estudio para cada uno basada en la delimitación hidroecológica, definida a partir de la delimitación de procesos hidrológicos (cuenca hidrográficas y aguas subterráneas) y áreas protegidas de acuerdo con las directrices para la delimitación de ecosistemas de humedales del Servicio de Observación de Humedales por Satélite (Abdul Malak et al., 2016).

4. RESULTADOS

El resultado del trabajo realizado con la metodología anteriormente expuesta es un conjunto de herramientas web llamado *GreenEye System* (GES), desarrollado e implementado en *Google Earth Engine*, que permite el procesamiento y análisis de datos a gran escala y en tiempo real, generando información actualizada y relevante para dar apoyo a las obligaciones de información y seguimiento en distintos marcos normativos a los gestores, contribuyendo así a la mejor toma de decisiones en la gestión de humedales. A partir de las herramientas de GET, se ha realizado una aplicación web llamada *GreenEye Hub* (GEH) que ha permitido la visualización de forma organizada y sintética de los procesamientos basados en los datos de observación con el objetivo de que sea accesible y amigable para el usuario final, los gestores (ver Figura 1). De este modo, GEH muestra, como resultado de procesar una colección de imágenes de Sentinel-2, los índices espectrales anteriormente mencionados, su evolución temporal en forma de gráficas y, en forma de imagen, el hidropериodo anual y medio, la presencia máxima de agua anual y total y la frecuencia de inundación

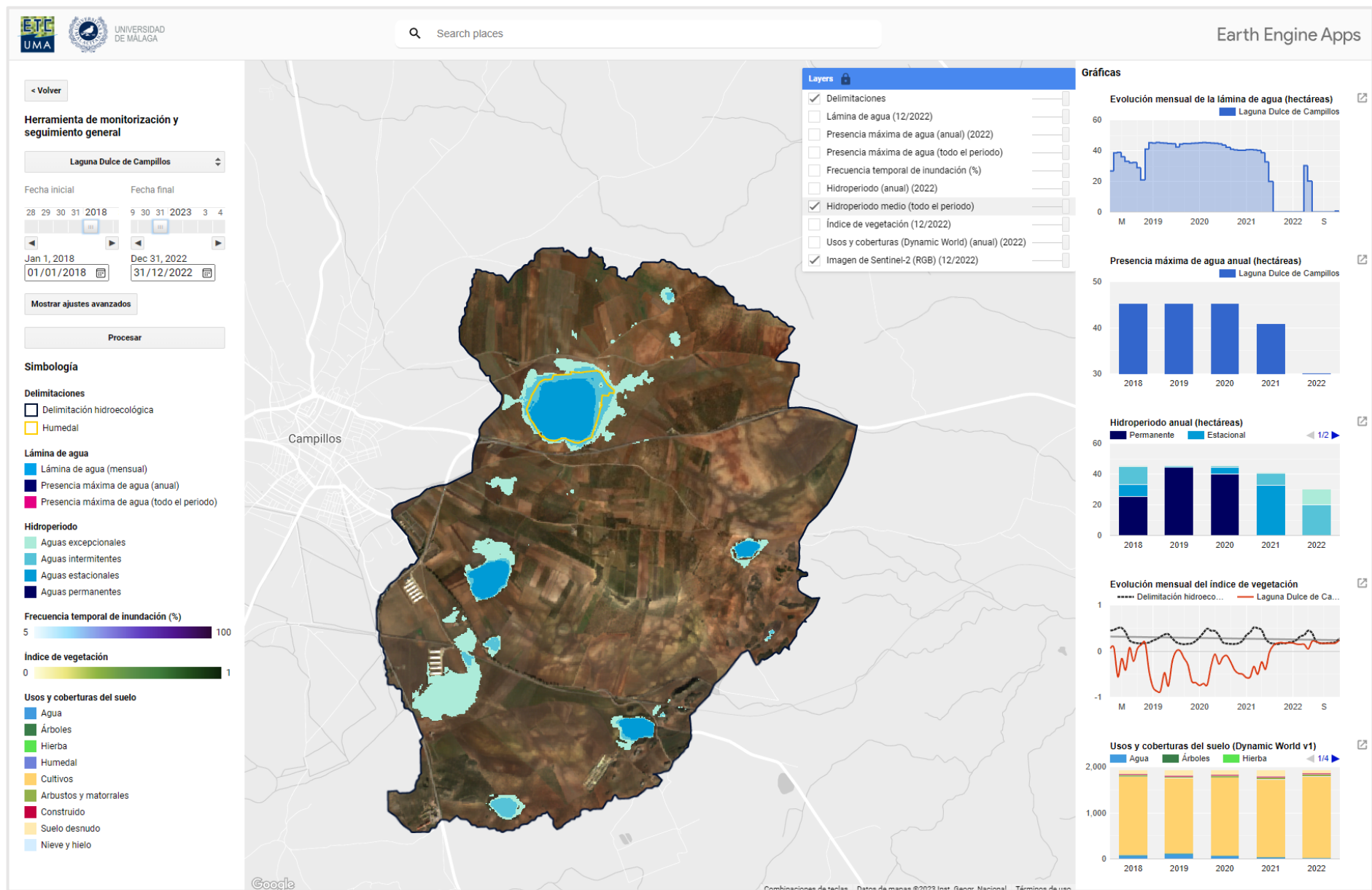


Figura 1. Vista general de la herramienta, ejecutando los procesos de análisis sobre la Laguna Dulce de Campillos desde 2018 hasta 2022. En el visualizador puede identificarse la delimitación oficial del humedal y la delimitación hidroecológica. A la izquierda, en la parte superior, se encuentra el panel de parámetros. Debajo, la leyenda compartida por todas las capas, ubicadas en un selector dentro del visualizador. A la derecha se encuentran las gráficas que se generan a partir de los parámetros introducidos

Este análisis puede realizarse sobre la colección completa de imágenes Sentinel-2 o para un periodo concreto definido por el usuario, de manera dinámica y obteniendo los resultados en tiempo real. A través de los diferentes comandos implementados en la herramienta web, el usuario, el gestor, tiene la opción de visualizar y exportar la información geoespacial generada a partir de las imágenes del Sentinel-2 y los gráficos de evolución.

Como ejemplo para ilustrar las herramientas en este trabajo, se ha procesado la Laguna Dulce de Campillos entre 2018 y 2022, utilizando los valores por defecto de todos los parámetros (los índices de agua y vegetación, el umbral para el índice de agua y el porcentaje máximo de nubes de cada escena de Sentinel-2). La herramienta tiene la capacidad de cartografiar todos los meses incluidos en el rango de fechas de análisis seleccionado por el usuario de la herramienta.

En la Figura 2 puede observarse un extracto de la cartografía de lámina de agua a lo largo del periodo, donde se pueden ver los efectos de las intensas precipitaciones que se produjeron en la zona a finales de 2018 y donde sus efectos se dejaron notar hasta el año siguiente.

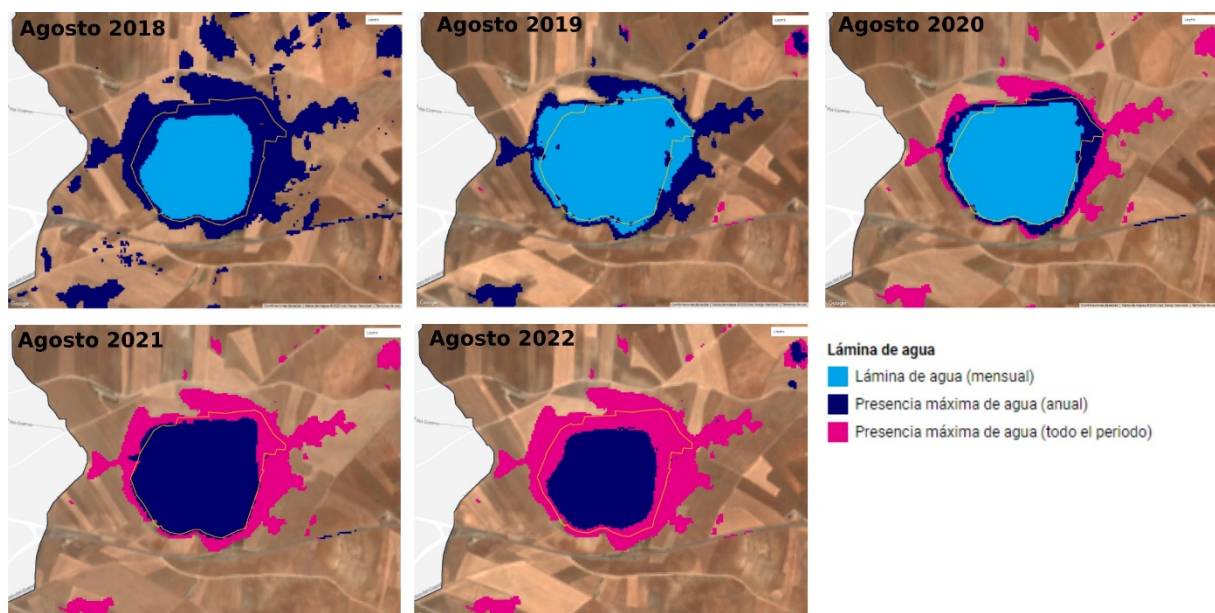


Figura 2. Extracto de la evolución de la lámina de agua de la Laguna Dulce de Campillos los meses de agosto calculada a partir del NDWI con un umbral de 0.05. En azul claro se ve representada la lámina de agua del mes de agosto de cada año, mientras que en azul oscuro se ve la superficie de la presencia máxima de agua, definida como aquella superficie con presencia de agua durante al menos un mes del año. En color magenta se observa, común en todas las imágenes, la presencia máxima de agua para el periodo 2018-2022, definida como aquella superficie con presencia de agua en al menos el 5 % del tiempo.

En la Figura 3 se representan, en forma de gráfica, todos los datos mensuales y anuales relativos a la extensión de la lámina de agua. La herramienta web funciona de manera tal que, al hacer clic con el puntero sobre uno de los datos, el visor actualiza la cartografía mostrada para representar la fecha específica que el usuario ha seleccionado en la gráfica. Es de esta manera como se han generado los datos cartográficos para los meses de agosto presentados en la Figura 2. A partir de los datos de lámina de agua, la herramienta genera datos y cartografía de hidropериodo tanto anual como medio para todo el periodo (Figura 4 y Figura 5), así como datos absolutos, expresados de manera porcentual, de inundación para todo el periodo (Figura 6).

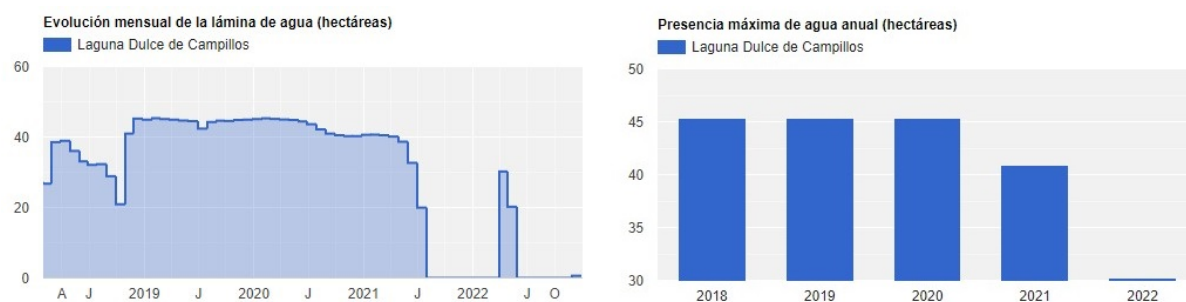


Figura 3. Evolución mensual de la lámina de agua y presencia máxima de agua anual de la Laguna Dulce de Campillos entre 2018 y 2022. En GreenEye Hub, las gráficas tienen un comportamiento dinámico y sirven para actualizar los datos mostrados en el visualizador cartográfico al que acompañan.

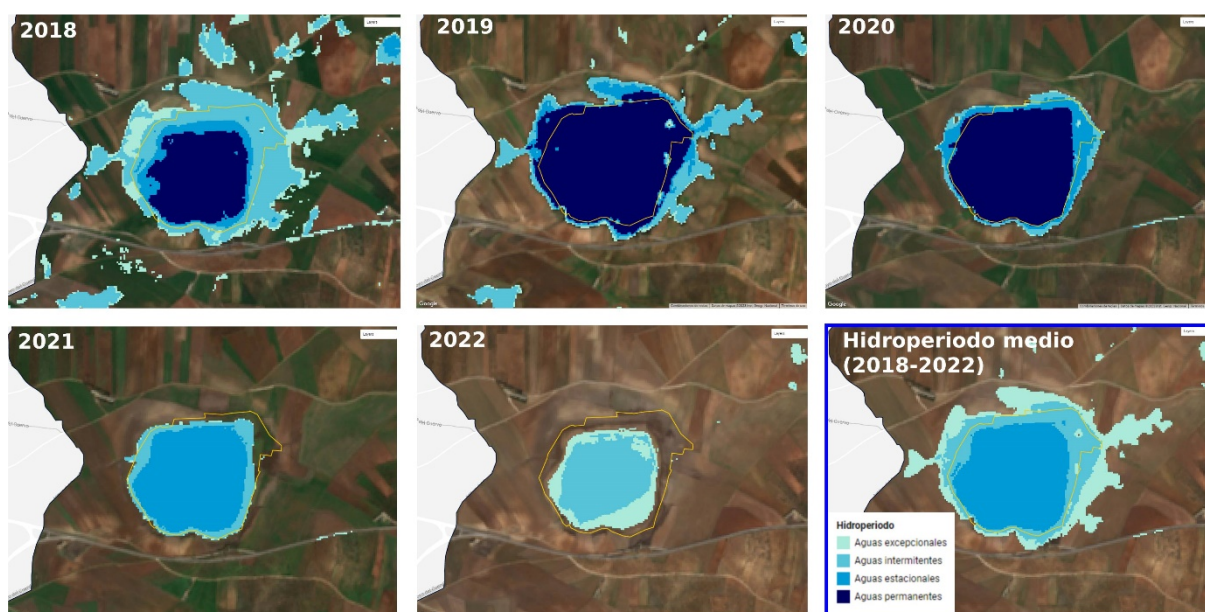


Figura 4. Cartografía del hidroperiodo anual de la Laguna Dulce de Campillos entre 2018 y 2022. En el recuadro inferior derecho, destacado con un marco azul, se representa el hidroperiodo medio para todo el periodo de tiempo.

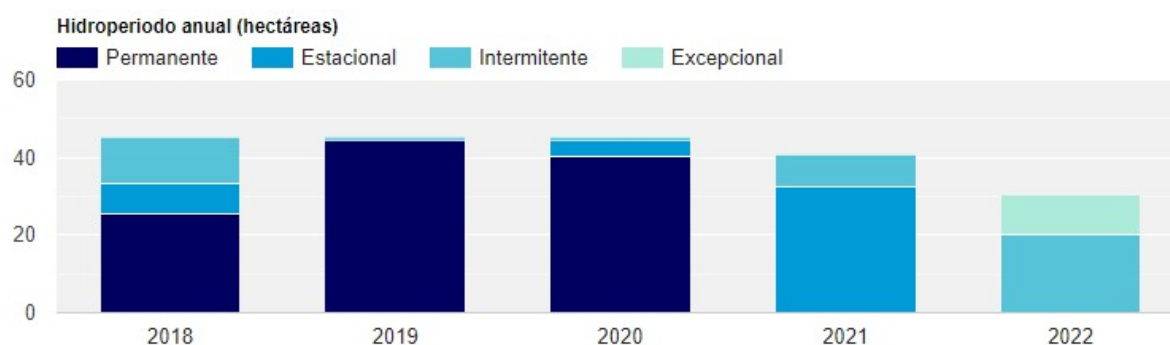


Figura 5. Hidroperiodo anual de la Laguna Dulce de Campillos entre 2018 y 2022. La superficie inundada se calcula exclusivamente dentro de los límites definidos para el humedal por el Inventario de Humedales de Andalucía.

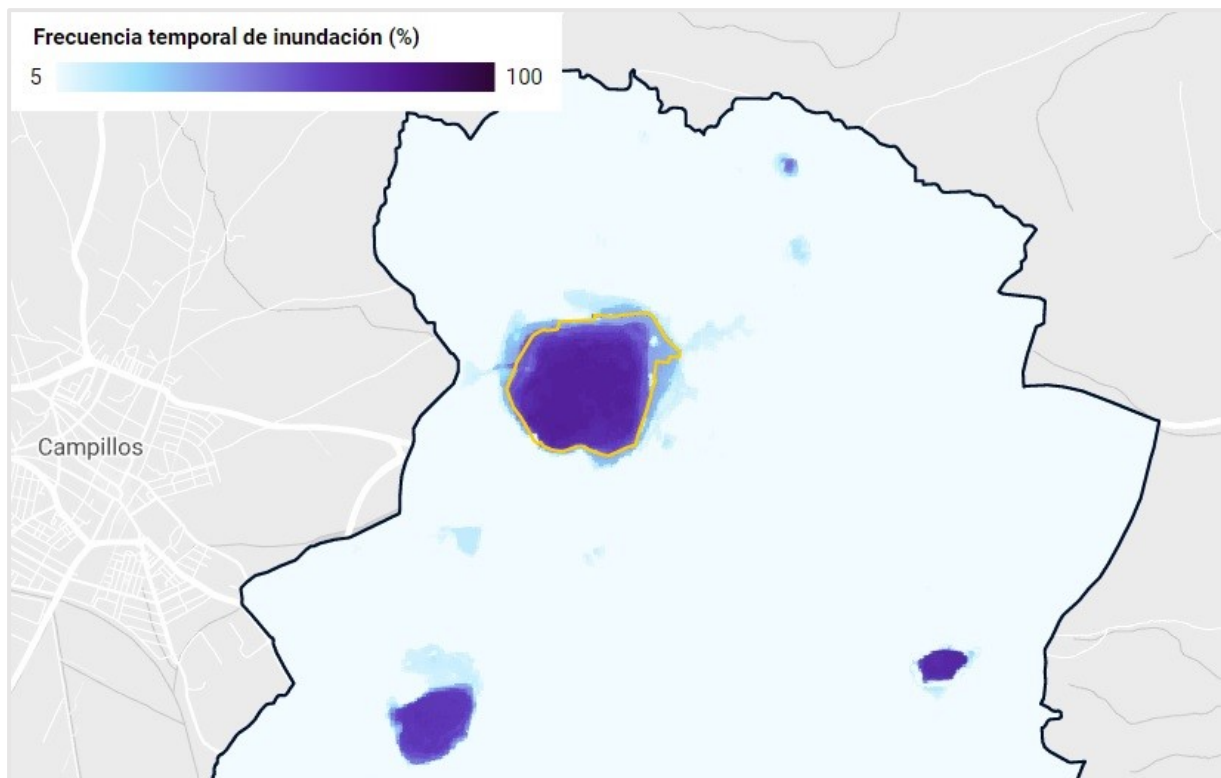


Figura 6. Frecuencia temporal de inundación, expresado en porcentaje, de la Laguna dulce de Campillos para el periodo 2018-2022.

Además de datos sobre dinámicas de agua superficial, la herramienta calcula, también para cada mes y para todos los años analizados, datos sobre la evolución de la vegetación, dentro y fuera de la delimitación del humedal. En la Figura 7 puede observarse cómo el índice de vegetación, en los meses de abril de 2018, 2020 y 2022, muestra los efectos en la vegetación de unas condiciones anuales más secas cada año. Puede observarse también cómo comienza a desarrollarse vegetación dentro de la delimitación del humedal a causa de la progresiva disminución de la superficie inundada (Figura 8).

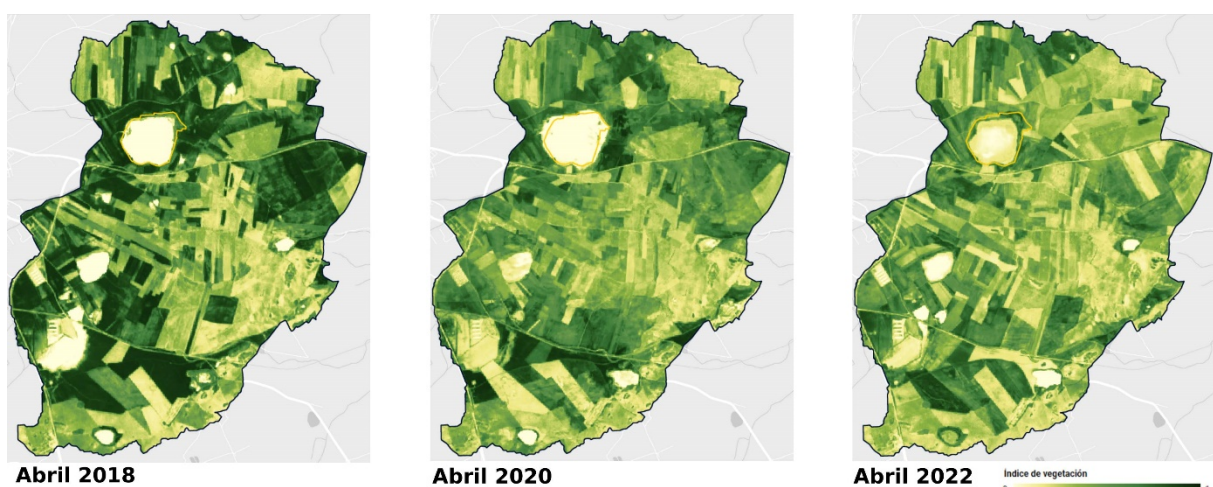


Figura 7. Índice de vegetación en la delimitación hidroecológica de la Laguna Dulce de Campillos, simbolizada en un rango de valores 0-1 para destacar exclusivamente el desarrollo de la vegetación.

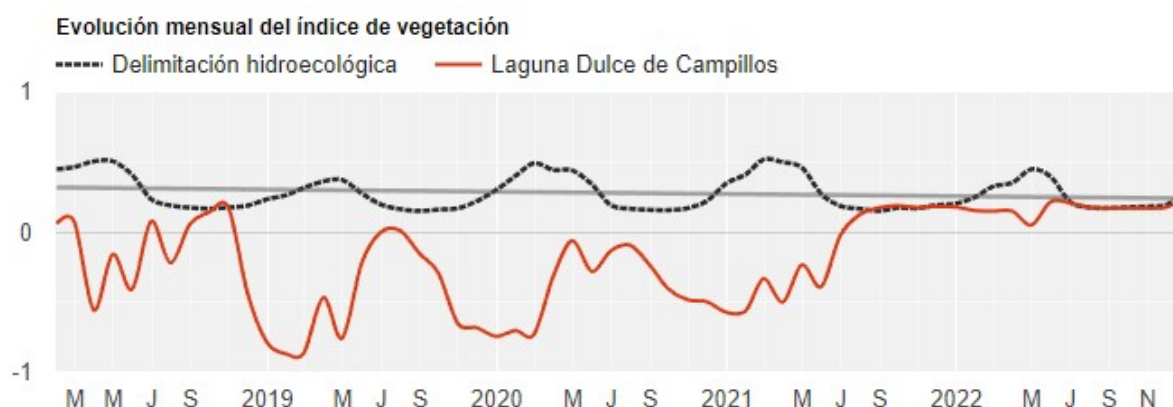


Figura 8. Evolución mensual del índice de vegetación en la Laguna Dulce de Campillos y en su delimitación hidroecológica para el periodo 2018-2022.

5. DISCUSIÓN

La pérdida y la degradación de los humedales es una realidad que en la actualidad sigue vigente a pesar de las políticas de conservación y restauración que se han puesto en marcha en las últimas décadas pero que no han sido eficientemente implementadas a la vista del estado actual de muchos de ellos. Los humedales constituyen ecosistemas complejos con un fuerte dinamismo temporal y espacial que se ve acentuado en un entorno como el mediterráneo donde el régimen de precipitaciones es cambiante inter e intraanualmente y donde, además, hay una importante presión de explotación de las aguas subterráneas que alimentan a muchos de estos humedales. Por tanto, el seguimiento de estos ecosistemas para evaluar el estado de conservación, el impacto de las medidas de gestión y restauración que se llevan a cabo en el marco de la política ambiental, y otras sectoriales, es una necesidad real y actual.

Los enormes servicios de datos remotos proporcionados por varios programas de Observación de la Tierra, como Copernicus que es el usado aquí, apoyados por potentes plataformas y nuevas tecnologías, han empujado a la comunidad investigadora a explorar nuevos métodos y enfoques para el seguimiento de los ecosistemas en todo el mundo, incluyendo los humedales. En este trabajo se ha presentado un sistema de seguimiento, con un enfoque operacional y aplicado, basado en datos de observación terrestre, imágenes Sentinel-2, públicos y gratuitos. El uso de *Google Earth Engine* permite el procesamiento de una gran cantidad de imágenes de forma eficiente sin comprometer la capacidad de procesamiento del usuario. Además, la herramienta ha sido diseñada pensando en el usuario final, el gestor de humedales. Así, a través de la consola de visualización se muestra la información más relevante de forma sintética y ordenada facilitando el análisis y exportación de los datos para complementar, por ejemplo, los informes Ramsar. Estos resultados pueden contribuir a los indicadores ecológicos “orientados a los resultados” para evaluar la aplicación efectiva de la Convención de Ramsar, concretamente los indicadores C “Tendencias en la calidad del agua” y K “Tendencias en la cantidad de agua” (Convenio de Ramsar, 2005).

La herramienta que se ha presentado en este documento se encuentra en una fase operativa y funcional para la región andaluza con posibilidad de escalado al ámbito nacional o transferencia a otra región. Además, la flexibilidad del sistema permite la integración de módulos adicionales para la obtención de información derivada de observación remota que pudiese ser de interés para el gestor. Del mismo modo, aunque esta herramienta no es un sistema de seguimiento en tiempo real, la alta resolución temporal de las imágenes de Sentinel-2 (5 días) y el análisis de tendencias que realiza el

propio sistema permite que sea fácilmente transformable a un sistema de alerta temprana una vez que se determinen, mediante datos in-situ, los valores umbrales para cada indicador.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra algunas de las posibles aplicaciones de la herramienta que se ha diseñado en el marco de este estudio para el apoyo a la gestión de los humedales y que está basada *Google Earth Engine*. La herramienta, implementada a escala de Andalucía, tiene la capacidad de analizar y procesar de manera automática una gran cantidad de datos, proporcionando cartografía e información relevante para los usuarios, los gestores, de lo que sucede tanto dentro de la delimitación oficial de los humedales como en su entorno. Además, es lo suficientemente versátil como para adaptarse a las características específicas de los humedales cuando así se requiera, tanto a través de la modificación de una serie de parámetros en GreenEye Hub (fecha de inicio y final de análisis, qué índice espectral se calcula para el agua y para la vegetación, el umbral que transforma el índice espectral en lámina de agua y el porcentaje de nubosidad en las imágenes de Sentinel-2 de origen) como a través de la modificación de todos los parámetros y variables de las propias herramientas de cálculo de GreenEye Tools.

También se pretende demostrar que es factible en la actualidad desarrollar un sistema de seguimiento de humedales a escala regional a partir de datos gratuitos accesibles, y cómo esta herramienta constituye un proceso de transferencia del conocimiento desde la ciencia a la gestión.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto *Infraestructuras científicas para el seguimiento y adaptación ante el cambio global en Andalucía* - INDALO, Programa Operativo Plurirregional de España FEDER 2014-2020 para la realización de actividades relacionadas con el Consorcio Europeo LifeWatch ERIC, WP3: Centros temáticos de excelencia vinculados a ecosistemas y Redes Locales de Observación del Cambio Global, nodo de Humedales. Se agradece la información aportada por el equipo del Inventario de Humedales de Andalucía de la Junta de Andalucía y por el equipo del Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA).

REFERENCIAS

- Abdul Malak, D., Sánchez, A. y Schröder, C. (2016): Guidelines for the delimitation of wetland ecosystems. Satellite-based Wetland Observation Service (SWOS). DOI: 10.13140/RG.2.2.24578.02242.
- Asokan, A. y Anitha, J. (2019): Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. *Earth Science Informatics* 12: 143–160. DOI: 10.1007/s12145-019-00380-5
- Comisión Europea (2020): Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Estrategia de la UE sobre la biodiversidad de aquí a 2030. Reintegrar la naturaleza en nuestras vidas. COM/2020/380 final. eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0380

- Convenio de Ramsar (2005): Marco Conceptual para el uso racional de los humedales y el mantenimiento de sus características ecológicas. Resolución IX.1, Anexo A, de la 9ª Reunión de la COP de Ramsar, Kampala, Uganda.
https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/res/key_res_ix_01_annexa_s.pdf
- Convenio de Ramsar (2018): Perspectiva mundial sobre los humedales: estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas. Secretaría del Convenio de Ramsar, Gland, Suiza.
- Convenio de Ramsar (2021): *Perspectiva mundial sobre los humedales: Edición especial de 2021*. Secretaría del Convenio de Ramsar, Gland, Suiza.
- Convenio de Ramsar (2022): Guía de campaña para socios, organizadores de eventos y educadores. Guía Informativa del Convenio de Ramsar (Día Mundial de los Humedales 2022). Secretaría del Convenio de Ramsar, Gland, Suiza.
- Davidson, N. (2014): How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*. 65: 934-41. DOI: 10.1071/MF14173
- DECRETO 98/2004, de 9 de marzo, por el que se crea el Inventario de Humedales de Andalucía y el Comité Andaluz de Humedales. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, 66, de 5 de abril de 2004: 8.477-8.480. <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2004/66/boletin.66.pdf>
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J. y Wu, L. (2017): A Review of Wetland Remote Sensing. *Sensors* (Basel), 17(4):777. DOI: 10.3390/s17040777.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services-IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.
https://ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf
- Kislik, C., Dronova, I., Grantham, T. E. y Kelly, M. (2022): Mapping algal bloom dynamics in small reservoirs using Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. *Ecological Indicators*, 140(109041). DOI: 10.1016/j.ecolind.109041.
- Lambin, E.F. (2001): Remote Sensing and Geographic Information Systems Analysis. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Pergamon, 13150-13155. DOI: 10.1016/B0-08-043076-7/04200-5.
- Mahdianpari, M., Brisco, B., Salehi, B., Granger, J., Mohammadimanesh, F., Lang, M. y Toure, S. (2022): Toward a North American continental wetland map from space: wetland classification using satellite imagery and machine learning algorithms on Google Earth Engine. *Earth Observation, Radar Remote Sensing*, 357-373. DOI: 10.1016/B978-0-12-823457-0.00021-5
- McFeeters, S. K. (1998): The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17:1425-1432.
- MITECO (2023): Plan Estratégico de Humedales a 2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.
https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/planes-y-estrategias/planestrategicodehumedalespublicacionoficial_tcm30-548431.pdf
- Morant, D., Perennou, C. y Camacho, A. (2021): Assessment of the Pressure Level over Lentic Waterbodies through the Estimation of Land Uses in the Catchment and Hydro-Morphological Alterations: The LUPLES Method. *Applied Sciences*, 11(4):1633. DOI: 10.3390/app11041633

- OZHM, MedWet & Tour de Valat (2018): Les zones humides méditerranéennes: enjeux et perspectives 2. Solutions pour des zones humides méditerranéennes durables. Tour du Valat, France. <https://medwet.org/fr/publications/med-wetlands-outlook-2-2018/>
- Rebelo, L.M., Finlayson, C.M., Strauch, A., Rosenqvist, A., Perennou, C., Tøttrup, C., Hilarides, L., Paganini, M., Wielaard, N., Siegert, F., Ballhorn, U., Navratil, P., Franke, J. y Davidson, N. (2018): The use of Earth Observation for wetland inventory, assessment and monitoring: An information source for the Ramsar Convention on Wetlands. Ramsar Technical Report No. 10. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat.
- Sánchez-Espinosa, A. y Schröder, C. (2019): Land use and land cover mapping in wetlands one step closer to the ground: Sentinel-2 versus Landsat 8. *Journal of Environmental Management*, 247: 484-498. DOI:10.1016/j.jenvman.2019.06.084
- Weise, K., Höfer, R., Franke, J., Guelmami, A., Simonson, W., Muro, J., O'Connor, B., Strauch, A., Flink, S., Eberle, J., Mino, E., Thulin, S., Philipson, P., van Valkengoed, E., Truckenbrodt, J., Zander, F., Sánchez, A., Schröder, C., Thonfeld, F., Fitoka, E., Scott, E., Ling, M., Schwarz, M., Kunz, I., Thürmer, G., Plasmeijer, A., Hilarides, L. (2020): Wetland extent tools for SDG 6.6.1 reporting from the satellite-based wetland observation service (SWOS). *Remote Sensing of Environment*, 247(111892). DOI: 10.1016/j.rse.2020.111892