



CASO PRÁCTICO

Estudio de las fluctuaciones del nivel del agua en la laguna de Gallocanta (Aragón, España) mediante imágenes satelitales de Sentinel-2

Samuel Morales, Miriam Ruiz, Juan M. Soria *

Departamento de Microbiología y Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Valencia. 46100 – Burjassot, España.

Resumen: En este estudio se ha realizado un seguimiento de cinco años mediante imágenes satelitales de Sentinel-2, en diferentes estaciones del año, de las fluctuaciones del nivel del agua de la Laguna de Gallocanta (entre las provincias de Teruel y Zaragoza. Aragón, España) considerado un humedal hipersalino y endorreico, el cual posee características que la hacen única en la zona geográfica en la que se encuentra, así como para el funcionamiento del sistema. Las precipitaciones en la zona poseen una amplia variación, dándose las máximas en los meses de mayo y junio y las mínimas en enero y febrero, produciéndose considerables fluctuaciones en el nivel del agua desde la desecación casi total de la laguna hasta el llenado con una profundidad aproximada de 3 metros.

Palabras clave: humedal, endorreico, salino, fluctuaciones, teledetección.

Study of water level fluctuations in Gallocanta Lake (Aragón, Spain) using Sentinel-2 imagery

Abstract: This study has been monitored for five years by Sentinel-2 satellite images, at different seasons of the year, of the fluctuations in the water level of the Gallocanta Lake (between the provinces of Teruel and Zaragoza, Spain) considered a hypersaline and endorheic wetland, which has characteristics that make it unique in the geographical area in which it is located, as well as for the operation of the system. Rainfall in the area has a wide variation giving the maximums in the months of May and June and the minimums in January and February, with considerable fluctuations in the water level from the almost total drying of the lagoon to the filling with a depth of approximately 3 meters.

Key words: wetland, endorheic, saline, fluctuations, remote sensing.

1. Introducción

Los humedales están formados por el conjunto de territorios donde el agua juega un papel principal en su funcionamiento ecológico. En general, se

asocian a una masa de agua, tal como un río, un lago o la proximidad a la línea de costa. Tienen un distinguido valor, tanto de uso como de no uso, que es debido a sus múltiples servicios que presta para el funcionamiento del sistema

To cite this article: Morales, S., Ruiz, M., Soria, J.M. 2021. Study of water level fluctuations in Gallocanta Lake (Aragón, Spain) using Sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, 58, 119-129. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.14246>

* Corresponding author: juan.soria@uv.es

como favorecer la existencia de biodiversidad, participar en la regulación del ciclo hidrológico, entre otras funciones. En humedales de interior, el funcionamiento se encuentra fuertemente ligado a las aguas subterráneas, de manera que son vulnerables ante acciones como la alteración o contaminación de los acuíferos, el incremento agrario, la expansión urbanística, etc. (Díaz de Arcaya et al., 2005).

Las áreas protegidas como los humedales poseen una designación internacional en el Convenio Ramsar, en el cual se promueve la formación de una red internacional de humedales y, con ello, la conservación de aquellos humedales incluidos en la Lista Ramsar por su interés para las aves. En total son 75 los humedales españoles inscritos en dicha lista sumando una superficie de 304 541 hectáreas, entre los que se encuentra la Laguna de Gallocanta desde el año 1994 (Arnaiz, 2013; Ramsar, 2020).

Los humedales son de relevante interés para la comunidad científica debido a su fragilidad, puesto que dan asiento temporal a especies migratorias y soporte a endemismos locales que se ven amenazadas por la vulnerabilidad que poseen estos ante eventos de sequía, asentamientos urbanos, fragmentación del ecosistema, desbalance hídrico, entre otros aspectos. Además de los grandes beneficios que proporciona para la sociedad y la biodiversidad, como sumidero del 40% del carbono, protección ante tormentas severas, control de fuertes vientos, estabilización de costas, etc. (Moya et al., 2005). Para contribuir a la conservación de los humedales, una herramienta útil es la teledetección dado que de una manera sencilla y óptima es posible realizar un seguimiento de sus variaciones, estudiar los usos y coberturas del suelo, así como tomar decisiones necesarias para la gestión del territorio (Jiménez et al., 2015).

La Laguna de Gallocanta es un tipo específico de zona húmeda rara en la actualidad en su zona biográfica, al ser una laguna endorreica de agua salada en la zona mediterránea del Paleártico Occidental (Casterad y Castañeda, 2009). Además, es considerada inusual debido a que el nivel de agua muestra diferente estacionalidad y mayor período de fluctuación comparado con

otros lagos salinos de España (Comín y Alonso, 1988). Todo ello, es de relevante interés para realizar más hincapié en esta laguna considerada como la mejor conservada de Europa Occidental,

Diversos son los trabajos en los que se han estudiado diferentes aspectos de la laguna mediante teledetección, así como otros lugares y fenómenos atmosféricos. Tenemos que destacar los estudios por teledetección en el área de la Laguna de Gallocanta a lo largo del tiempo. Pérez y García (2000) realizaron un estudio microclimático de la laguna en el que mediante imágenes satelitales TM del Landsat 5, AVHRR del NOAA y datos de campo se llegan a las conclusiones de que se produce un destacado efecto de amortiguación térmica y quedando registrado el comportamiento térmico del área de estudio. Posteriormente, volverán a cooperar en Pérez y García (2015) donde se muestra el seguimiento de las fluctuaciones de la laguna a partir de datos de campo y del satélite Landsat observándose las oscilaciones intraanuales e interanuales, además de su relación con las fluctuaciones de años secos y húmedos y los usos de las aguas de la cuenca. Al compás se realizaron dos artículos de interés por parte de Castañeda et al. (2015) consistente en realizar un estudio multitemporal de la laguna a través de la automatización del tratamiento de las imágenes satelitales disponibles en Landsat 5, así como el seguimiento de los cultivos presentes en el área perilagunar mediante el índice NDVI. Y por parte de Jiménez et al. (2015) en el que también mediante imágenes TM Landsat 5 se generaron mapas de humedad de relevante utilidad para la toma de decisiones sobre la gestión de la laguna ya que proporciona información necesaria para comprender su funcionamiento a través de los patrones de humedad, los rasgos edáficos o del paisaje. Finalmente, Lemenkova (2016) confirma que, tras el cálculo de la dirección y la longitud de flujo de la corriente en la cuenca de la laguna, ésta posee configuraciones hidrológicas sensibles que explican el ser más propensa a los cambios ambientales.

Siguiendo la dinámica del cálculo de la superficie máxima de agua de la laguna, la primera investigación data de 1926 en el que Francisco Hernández-Pacheco y Pedro Aranegui visitan la laguna, y tal como se indica en Galván

(2011) documentaron una extensión superficial aproximada de 20 km². Posteriormente, múltiples estudios muestran con imágenes satelitales la que es considerada la mayor superficie registrada, datada de 14,4 km² en la década de 1970 considerada una década especialmente húmeda (San Román et al., 2007; García et al., 2009; Arnaiz, 2013). En un estudio similar realizado por Castañeda y Herrero (2009) entre los años de 1987 y 1994, la máxima extensión de la laguna ha sido de 11,64 km² en junio de 1989.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar las fluctuaciones de la cobertura de agua de la Laguna de Gallocanta, mediante el uso de imágenes Sentinel-2, utilizando diferentes metodologías. De esta manera, a través de los satélites S-2A y S-2B de Copernicus se pretende renovar la información existente sobre el área de estudio, la cual lleva años paralizada, mediante imágenes satelitales que nos aportan conocimiento de la zona sin la presencia en la misma y sin perder calidad en la investigación.

2. Descripción del área de estudio

La Laguna de Gallocanta es un humedal endorreico y salino localizado entre las provincias de Zaragoza y Teruel (Díaz de Arcaya et al., 2005), concretamente en Aragón, entre las comarcas de Jiloca y Campo de Daroca (40° 58' N/01° 30' W), como se aprecia en la Figura 1, incluyendo los términos municipales de Gallocanta, Santed, Berruenco y Las Cuerlas (Zaragoza) y en Bello y Tornos (Teruel). Su extensión consta de 1924 hectáreas de Reserva Natural y 4553 hectáreas de Zona Periférica de Protección. Presenta una extensión de 14,4 km², con unas dimensiones de 2,8 km de ancho por 7,7 km de largo. Posee una capacidad máxima de 5 hm³ y una profundidad media de 45-50 cm, aunque puede alcanzar los 3 metros en época de aguas altas. (Comín, et al., 1991; Velasco, 2006; Arnaiz, 2013; Gracia y Castañeda, 2018). Su cuenca está comprendida entre una cota mínima y máxima de altitud de 995 metros y 1.085 metros, respectivamente (Gobierno de Aragón, 2020). Debido a su singularidad

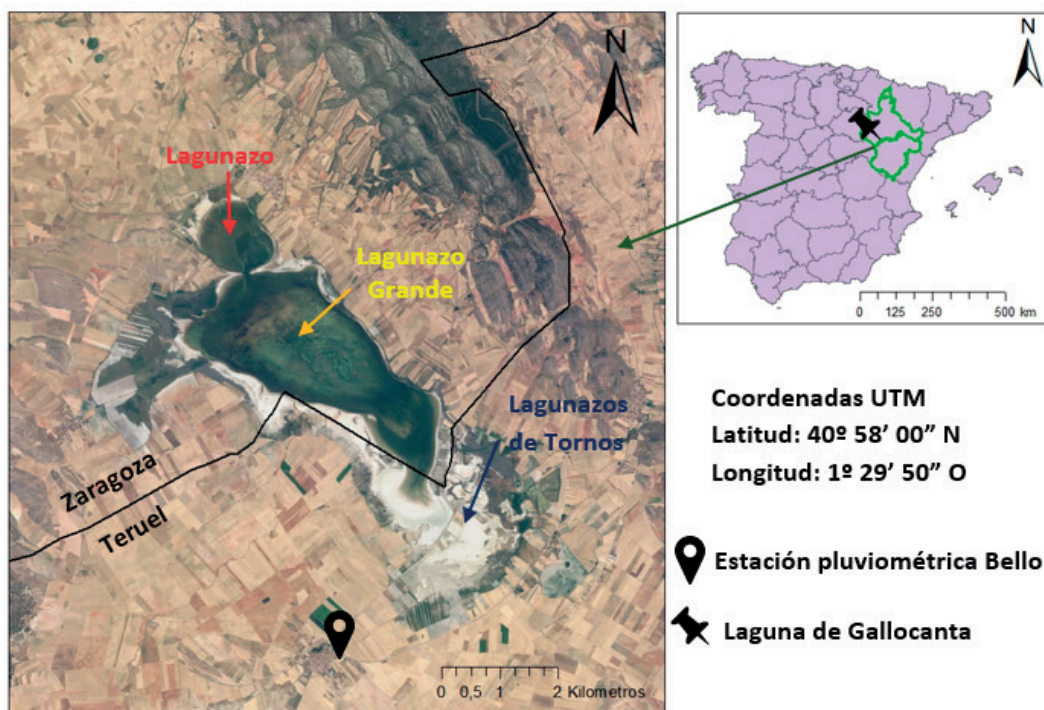


Figura 1. Mapa de situación de la Laguna de Gallocanta (Elaboración propia a partir de imagen de 2019 del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional de España).

biológica, geológica e hidrológica es considerada como uno de los ecosistemas más importantes en la Península Ibérica y de Europa Occidental. Por ello, este enclave posee ciertas figuras de protección como sitio Ramsar, L.I.C (Lugar de Importancia Comunitaria), Z.E.P.A (Zona de Especial Protección para las Aves), entre otras (Casterad y Castañeda, 2009; Arnaiz, 2013).

Desde el punto de vista geológico la Laguna de Gallocanta se encuentra situada en el fondo de un antiguo *polje*, formando parte de una cuenca endorreica con un origen multifuncional, entre kárstico y estructural. Siendo el comienzo de su formación a finales de la Era Terciaria y continuando a lo largo de toda la Era Cuaternaria (Velasco, 2006; Arnaiz, 2013). Por lo tanto, la laguna es el sumidero de las escorrentías superficiales de su cuenca, acumulando el agua de lluvia, hasta que se pierde por evaporación o infiltración. Morfológicamente (Figura 1), la Laguna de Gallocanta se estructura en tres áreas (de norte a sur): el Lagunazo y el Lagunazo Grande, este último es el punto de máxima profundidad, unidos por el estrecho, y los Lagunazos de Tornos, al sur, los cuales constituyen un área palustre inundada, en aquellas ocasiones que el Lagunazo Grande sufre un rebosamiento (Casterad y Castañeda, 2009).

El clima presente en la laguna y su entorno es mediterráneo semiárido semicontinental, común en las estepas de latitudes intermedias. Las precipitaciones máximas suceden entre los meses de mayo y junio, mientras las precipitaciones mínimas se dan en los meses de julio, agosto, enero y febrero. En cuanto a las precipitaciones se encuentran alrededor de 500 mm, con una amplia variación pluviométrica, lo que produce fluctuaciones del nivel del agua entre la desecación total y casi los tres metros de profundidad (Gracia y Castañeda, 2018). Mientras la temperatura media anual es de 10,7°C, siendo la máxima media mensual registrada en el mes de julio con 21,1°C y la mínima en enero con 2,9°C. Además, posee una gran amplitud entre las temperaturas máxima y mínima absolutas, registradas en 39°C y -21°C, respectivamente. En cuanto a los vientos son frecuentes aquellos provenientes del noroeste (NW), alcanzando velocidades superiores a los 80 km/h (Pérez y García, 2000; Velasco, 2006).

3. Materiales y métodos

El objetivo de este estudio es el de llevar a cabo un análisis multitemporal entre los años 2015 y 2019, con la finalidad de obtener mayor información sobre el período de llenado-vaciado de la Laguna de Gallocanta. Para ello, se han descargado las escenas correspondientes a la cuadrícula UTM T30XL recogidas por Sentinel-2 de la ESA (Agencia Espacial Europea) desde el portal de Copernicus *Open Acces Hub* en <https://scihub.copernicus.eu/>. Así mismo, también fueron descargadas algunas imágenes del portal del *US Geological Survey* en https://earthexplorer.usgs.gov, al no estar disponibles en el servidor de la ESA en el momento de la realización del trabajo. Se ha preferido la descarga desde Copernicus de las imágenes en el nivel de procesado MSIL2A ya corregidas geométrica y atmosféricamente. Sin embargo, para determinados procesados ha sido necesario descargar en formato MSIL1C pues así lo requería la aplicación.

Las imágenes Sentinel-2 constan de trece bandas en diferentes zonas del espectro y se muestrean originalmente en tres tamaños de píxel diferentes. Sus características se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Bandas del satélite Sentinel-2A del programa Copernicus de la Comisión Europea y operado por ESA, indicando el valor de longitud de onda del punto central de cada banda, y resolución del píxel en metros.

Banda	Longitud de onda en el pto. central	Res. píxel (m)
Banda 1	443 nm (azul oscuro)	60 m
Banda 2	490 nm (azul claro)	10 m
Banda 3	560 nm (verde)	10 m
Banda 4	665 nm (rojo)	10 m
Banda 5	705 nm (rojo)	20 m
Banda 6	740 nm (ultrarrojo)	20 m
Banda 7	783 nm (rojo lejano)	20 m
Banda 8	842 nm (infrarrojo cercano)	10 m
Banda 8A	865 nm (infrarrojo cercano 2)	20 m
Banda 9	940 nm (infrarrojo lejano)	60 m
Banda 10	1375 nm (onda corta infrarroja)	60 m
Banda 11	1610 nm (onda corta infrarrojo)	20 m
Banda 12	2190 nm (onda corta infrarrojo 2)	20 m

Posteriormente, cada imagen se ha procesado mediante el software de procesamiento de imágenes SNAP (*Sentinel Application Platform*) utilizando las bandas B1-B8A, realizando un recorte de la escena al área de trabajo; a continuación un proceso de remuestreo a 10×10 m de píxel de

las bandas de menor resolución y la corrección atmosférica en las imágenes L1C por el método C2RCC implementado en SNAP. A continuación, se han calculado los índices de vegetación y agua, NDVI y MNDWI, respectivamente; así como una clasificación temática no supervisada del territorio por el método *K-Means Cluster Analysis*. En determinados periodos ha sido necesario utilizar el preprocesado IdePix implementado en SNAP con imágenes tipo L1C para separar la zona de agua clara y tierra clara (*Clear Water y Land*) útil en los momentos en que el nivel de agua en la laguna es muy bajo para discriminar la existencia o no de agua.

El uso de los índices y clasificación se han aplicado en aquellas fechas más adecuadas, al menos una imagen al mes, con la finalidad de obtener la evolución de la superficie inundada y la máxima de la laguna en cada año. Posteriormente se ha observado con más detalle el periodo de desecación de la laguna y se ha precisado su duración, utilizando todas las imágenes disponibles en el servidor. En primer lugar, se utilizó el índice NDVI, pero fue rechazado por su poca utilidad para el agua ya que tiene como objetivo la diferenciación entre la vegetación y otros tipos de coberturas artificiales obteniendo como resultado un mapa de grises [rango -1, 1] que muestra el estado general de la vegetación. En segundo lugar, se utilizó el índice MNDWI que surge como respuesta ante la incapacidad de diferenciar los territorios cubiertos de agua por el índice NDWI original, de manera que, aunque

se presenta también un mapa de grises [rango -1, 1] se establece que los valores superiores a 0,1 corresponden a terreno cubierto por agua. En tercer lugar, se utiliza la clasificación no supervisada K-Means, con las bandas 2-3-4-8 y separando en siete clases; se identifica la clase que muestra la superficie cubierta de agua y así se estima el porcentaje de esta clase en la imagen. Se ha definido una zona de interés poligonal que abarca la laguna y la zona perimetral hasta el camino de lindero. Tras esto, se aplica el análisis estadístico mediante histogramas para obtener el tamaño (en píxeles) de la zona inundada y la conversión a metros cuadrados, puesto que al haber realizado con anterioridad el remuestreo 10×10 m, cada píxel equivale a 100 m².

Durante el periodo de laguna casi seca, debido a la reflectancia del suelo seco, ni el índice MNDWI ni el sistema de clasificación K-Means son capaces de identificar la presencia de agua en el área, por lo que se ha recurrido al preprocesado IdePix como sistema para validar la presencia o ausencia de agua en el área.

4. Resultados

Se ha descargado un total de 62 imágenes en fechas en que la laguna no está cubierta de nubes, de las cuales se ha procesado al menos una mensual con el fin de obtener la superficie inundada cuyo seguimiento se muestra en la Figura 2. La inundación de la laguna se ha relacionado con la pluviometría en la zona, al

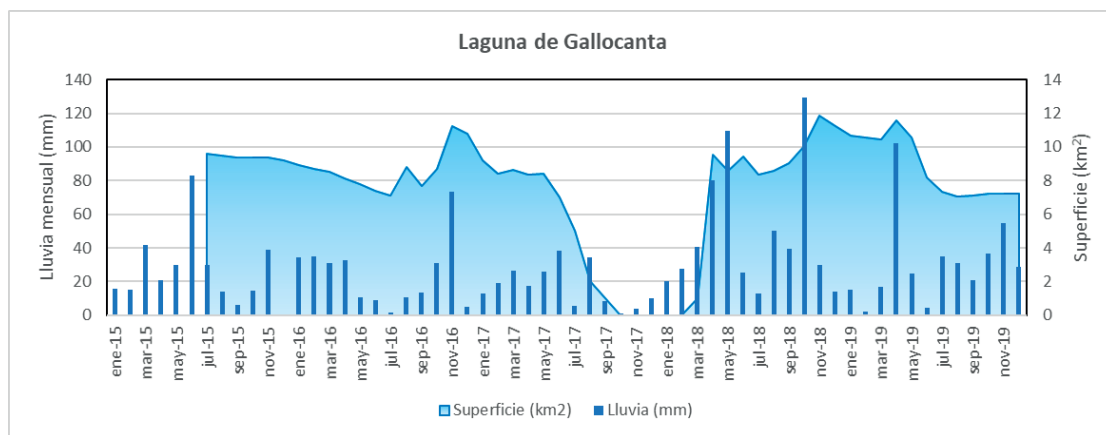


Figura 2. Evolución de la superficie inundada a partir de los valores de MNDWI y la precipitación mensual acumulada desde enero de 2015 hasta diciembre de 2019.

observar un periodo de desecación entre otoño de 2017 y primavera de 2018. Para ello se ha obtenido las precipitaciones acumuladas mensuales en la estación pluviométrica de Bello, distante unos 2 km de la laguna (Figura 1).

El estudio de la superficie inundada, así como del entorno de la laguna se ha realizado en primer lugar con el índice de agua MNDWI, considerando como agua los valores de índice superiores a 0,1. Para las clases de la clasificación K-means se ha seleccionado aquellas dos o tres clases que se encontraban dentro de la zona de interés de la laguna que correspondían con el agua. El índice de vegetación NDVI se ha utilizado para observar las tierras cultivadas y la vegetación subacuática cuando se ha presentado en fondo de la laguna. Se ha encontrado los valores de áreas inundadas, temporalmente cubiertas de agua, húmedas o secas y evidenciar su relación directa o indirecta con las fluctuaciones, además del cálculo de la superficie máxima de la laguna.

Cada año posee un ciclo hídrico distinto debido a la cantidad de lluvia recogida en la zona, presentada por meses en la Figura 2, sufriendo diversas fluctuaciones anuales e interanuales visibles en las imágenes satelitales. El año 2015 no se posee suficiente imágenes para conocer con exactitud el tiempo que ha estado inundada, aunque mediante la observación del parámetro de precipitación en la zona se puede dar por hecho que entre marzo y julio la laguna sufre una elevación del nivel del agua debido a precipitaciones en torno 20,8-83,0 mm; mientras el resto del año (agosto-febrero) se mantiene seca o con una mínima lámina de agua ya que no consigue superar los 15,6 mm mensuales, a excepción de noviembre que registra 38,6 mm lo que le otorga un respiro tras varios meses prácticamente seca. Durante el año 2016 se mantiene con gran cantidad de agua los cuatro primeros meses del año (enero-abril) con precipitaciones en torno a los 31,0-35,0 mm, los siguientes cuatro meses (mayo-agosto) fueron secos con precipitaciones entre 1,7 y 10,4 mm descendiendo su capacidad a una lámina de agua azulada y, finalmente, los últimos cuatro meses tornaron las lluvias, principalmente, en el mes de noviembre alcanzando el pico del año con 73,4 mm, los cuales no fueron suficientes para evitar las eflorescencias de la laguna. El año 2017 es considerado el más seco de los

estudiados, siendo los meses de junio y agosto las mayores precipitaciones medias mensuales con un valor de 38,2 y 34,6 mm respectivamente, que le otorgan una lámina de agua a la laguna tras un principio de año casi deseca. La desecación total llega en octubre hasta diciembre dada la escasez de precipitaciones produciendo una eflorescencia completa en la laguna. Con la entrada del 2018 vuelven las precipitaciones dándole un aspecto colorido y alcanzando amplia superficie a lo largo de todo el año siendo las imágenes de junio y noviembre las más destacables puesto que superan el mes anterior a cada una recibieron un aporte superior a 100 mm, sufriendo un paulatino descenso del nivel cada mes entre una y otra (julio-octubre). Finalmente, el año 2019, los primeros meses la laguna se mantiene llena y de un espectacular color verde, así como la laguna de La Zaida (temporal, próxima a Gallocanta), sobre todo tras las precipitaciones de abril donde la laguna alcanza su máximo de capacidad en el estudio, hasta junio donde con la entrada de la estación estival comienza a desecarse llegando a rozar la desecación en octubre.

De todo el periodo estudiado, destacamos tres momentos de superficie inundada (Figura 3), el primero en 31 de mayo de 2019, la Laguna de Gallocanta se encuentra con una gran capacidad de agua recogida siendo una de las mayores superficies de agua del estudio, producto de las precipitaciones sucedidas en la zona en dicho mes (24,5 mm) y, principalmente, el anterior (102,0 mm) dando fruto a una mayor acumulación de agua en la laguna, con el consecuente crecimiento de vegetación subacuática identificada por el índice NDVI y en la zona perilagunar.

En una situación intermedia, el 29 de julio de 2015, en este caso, el interior de la laguna se encuentra con diversas coloraciones aparentes siendo la zona externa blanca suelo desnudo por la eflorescencia salina, la zona azul verdosa evidencia una lámina de agua con diferentes profundidades según la zona y color, alcanzándose la máxima en la zona central de color verde, donde se ha desarrollado vegetación subacuática. El índice MNDVI muestra la profundidad diferencial típica señalando zonas más profundas y zonas más someras, de forma similar a como se comporta en otros estudios en arrozales y zonas de aguas de profundidad inferior a 1 m (Soria et al. 2015).

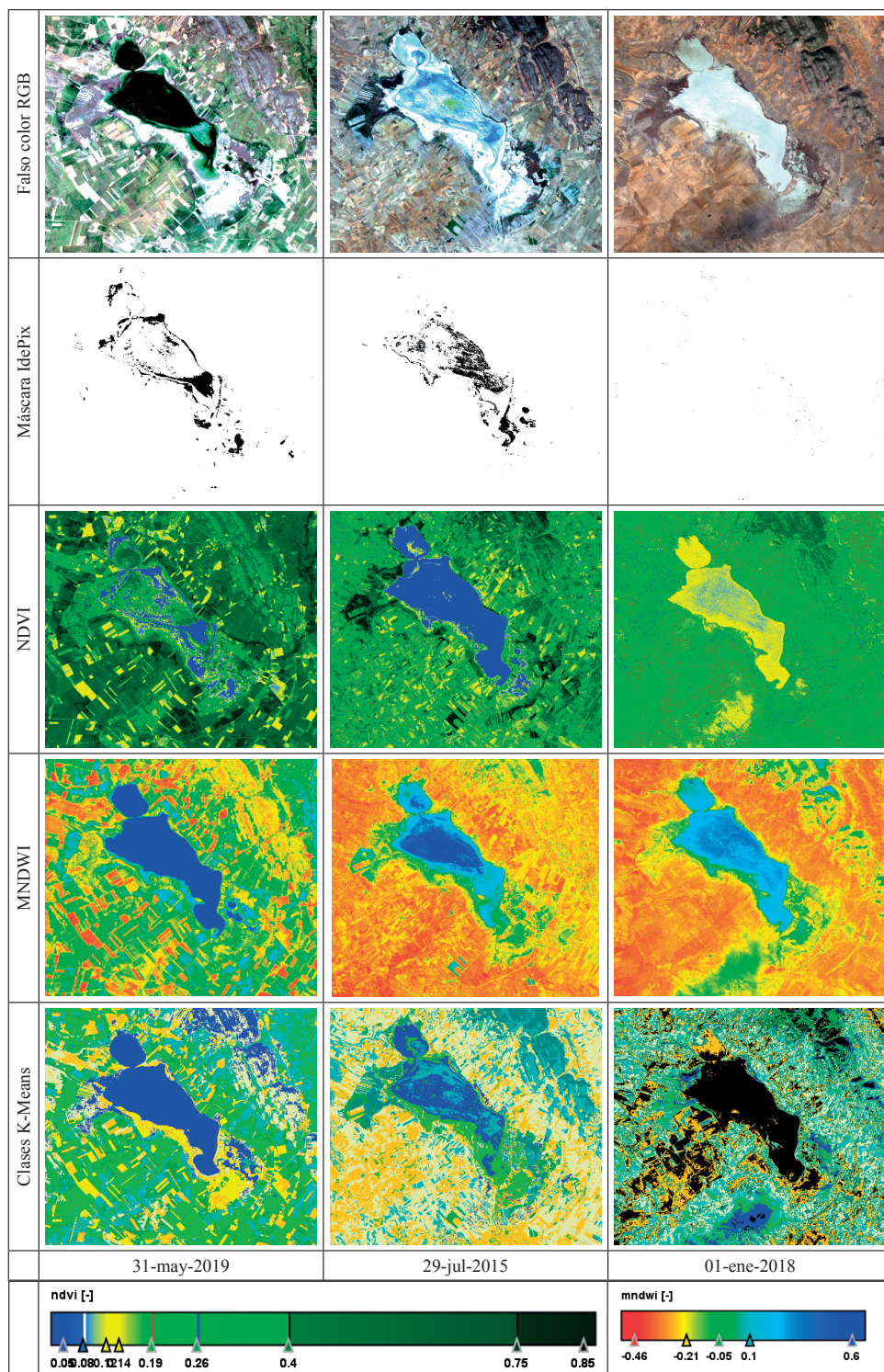


Figura 3. Comparación de la laguna de Gallocanta en tres situaciones distintas: la primera columna el 31 de mayo de 2019, momento próximo a la máxima inundación; la columna central el 29 de julio de 2015, en una situación al 80 % de extensión, pero con nivel bajo de agua; la tercera columna el 1 de enero de 2018, prácticamente en seco, con una pequeña zona con agua en el Lagunazo. En cada fila se presenta: en la primera el falso color RGB; a continuación, la máscara de agua clara según IdePix; índice NDVI, índice MNDWI y clasificación K-means. Se ha utilizado el mismo tratamiento e intervalos de color en las tres fechas.

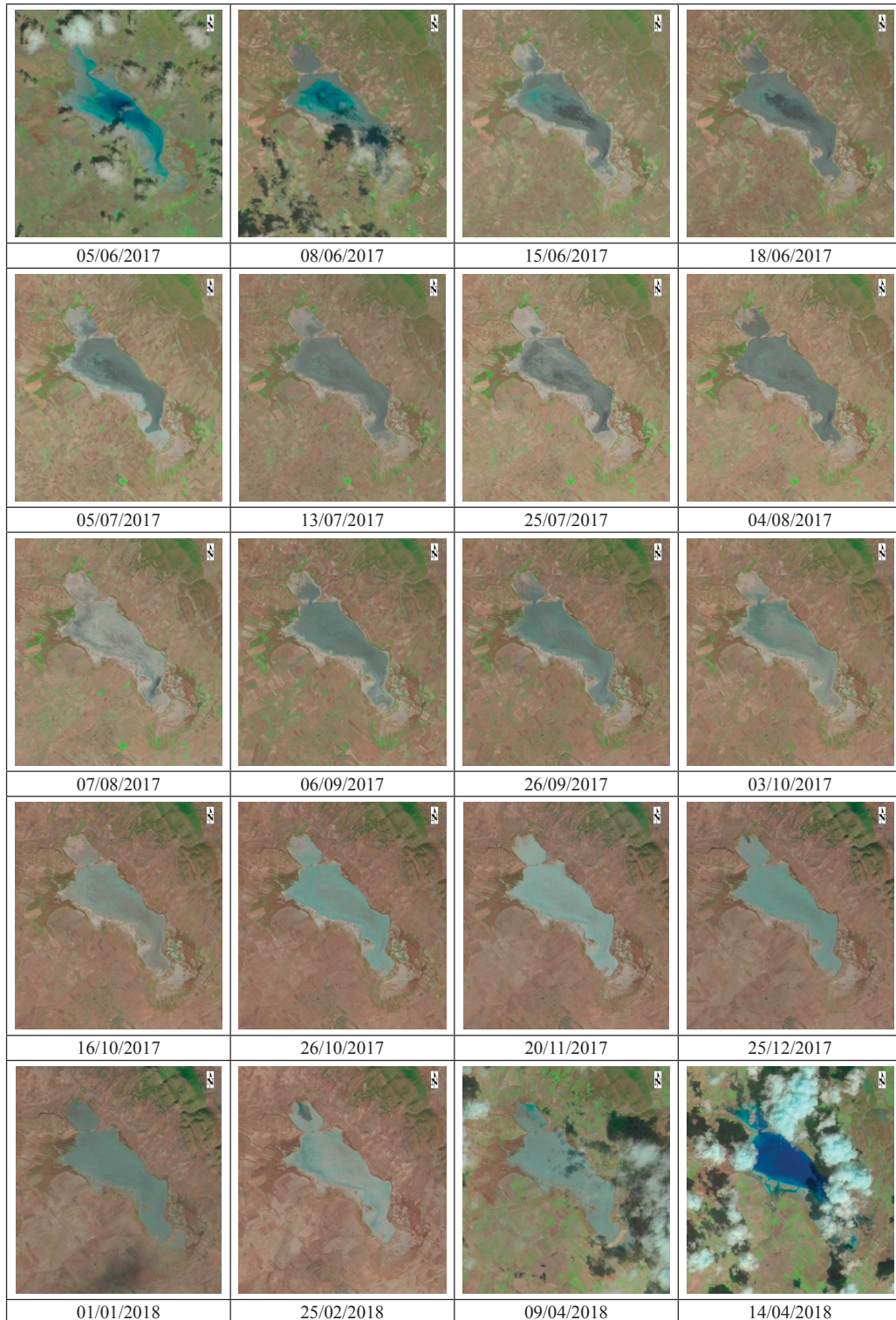


Figura 4. Secuencia de secado de la laguna desde junio de 2017 hasta inicios de 2018. El nivel del agua se va reduciendo y desde finales de octubre el nivel de agua es muy reducido, o enjuto, hasta febrero que se observa entrada por el norte, el 9 de febrero ya hay lámina de agua y el 14 de abril ya está completamente llena por el deshielo de una gran nevada primavera en la zona, apreciándose entre las nubes. Imágenes en falso color natural de Sentinel-2 procedentes de NASA-USGS.

Sin embargo, en la imagen de 1 de enero de 2018, la Laguna de Gallocanta se observa en seco debido a un año extremadamente seco unido a una secuencia de meses sin precipitaciones considerables (septiembre 8,4 mm, octubre 1,2 mm, noviembre 4,0 mm). En la imagen, la laguna se encuentra completamente de un color blanquecino debido a la eflorescencia salina provocada al encontrarse en el mínimo hídrico anual y el carácter kárstico que posee la zona. La máscara IdePix no es capaz de detectar ningún píxel de agua clara; el índice NDVI presenta el espacio lagunar con valores similares a los campos secos en la imagen de verano. El índice MNDWI presenta sólo nivel del agua en una pequeña zona del lagunazo de arriba y el resto de la superficie como tierra húmeda presentada en el tono azul claro en la imagen coloreada. La clasificación no supervisada es incapaz de separar el espacio lagunar del resto del territorio próximo, cosa que no sucede cuando hay presencia de agua.

El estudio con detalle del periodo de secado entre el verano de 2017 y la primavera de 2018 (Figura 4) nos permite apreciar la pérdida de nivel de agua desde junio hasta agosto; un nivel ligeramente superior durante septiembre y la pérdida de nivel hasta el secado. Desde febrero a abril hay una pequeña entrada de agua, y las imágenes nos han permitido establecer como momento de llenado súbito entre el 9 y el 14 de abril de 2018, a partir de las observaciones de esas fechas. Coincide con

el deshielo tras una importante nevada en la zona, cuyas acumulaciones de nieve se observaban claramente en las montañas próximas (fuera del fragmento seleccionado en la figura).

5. Discusión

El resultado obtenido como valor de máxima inundación en el periodo de estudio a partir del índice MNDWI según la imagen de 29 de abril de 2019, de 11,58 km² es similar al área máxima conocida dada por Castañeda y Herrero (2009) de 11,64 km² en primavera de 2009. Sin embargo, ambas cifras quedan lejos de los 19 km² que indica el Gobierno de Aragón en la creación de la Reserva Natural; consideramos que posiblemente el estudio en que se basa cubre la curva de nivel máximo teórico de la laguna que sólo se alcanzará en circunstancias muy excepcionales, pues en el mapa oficial se observa como abarca también el humedal adyacente (Departamento Agricultura, Gobierno de Aragón, 2020).

El índice de agua MNDWI y la clasificación no supervisada K-Means proporcionan superficies de agua que están relacionadas de forma significativa ($r=0,896$; $n=8$; $p<0,01$); pero sistemáticamente el valor dado por la clasificación en clases es siempre más elevado, aunque están relacionados significativamente (Figura 5).

El valor obtenido con MNDWI es más próximo a la superficie real dado que es más fácil

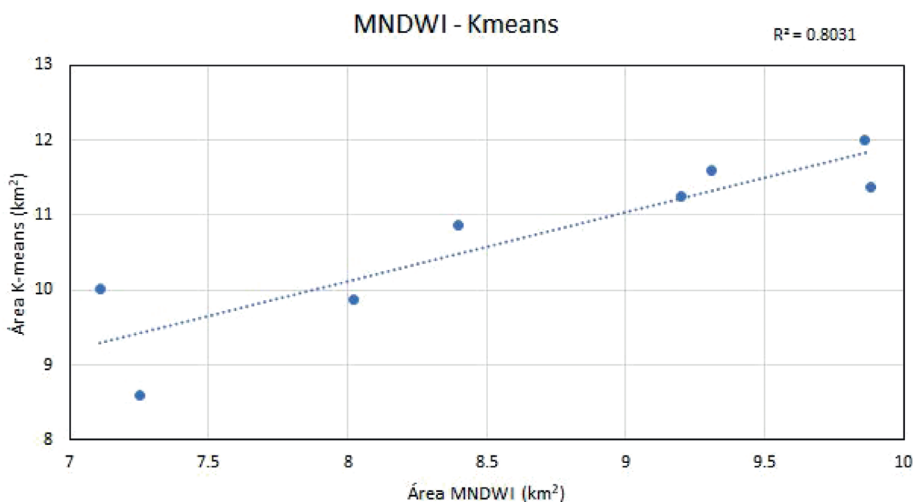


Figura 5. Relación entre la superficie medida por el índice de agua MNDWI y la clasificación no supervisada K-means.

seleccionar el rango con presencia en agua, frente a la clasificación K-means donde el resultado es dependiente del número de clases y la superficie de agua; por tanto, también afecta a la estima de la superficie total obtenida de la laguna. La utilidad del índice NDWI está concordante con los trabajos de Dusabimana et al. (2014), donde se monitorizan los arrozales utilizando este índice, así como los de Mansaray et al. (2017) en los cuales también se hace un seguimiento de la extensión de arrozales con este índice, siendo un ejemplo de la utilidad en aguas someras.

En este caso, se ha podido realizar un estudio para la evaluación de las fluctuaciones anuales del nivel de agua en la Laguna de Gallocanta sin la necesidad de realizar un muestreo en campo, aunque no por ello lo exime de ser necesario para un conocimiento superior del terreno y un resultado más detallado en el estudio. La ventaja de la utilización de Sentinel-2 radica en la sensibilidad suficiente de las bandas existentes y la buena resolución para estudios con zonas de un tamaño como esta laguna, así como la disponibilidad de las imágenes. Sería deseable en futuros trabajos ensayar la capacidad de las clasificaciones no supervisadas empleando más bandas y más clases en la clasificación; o utilizar *Maximum Likelihood* y *Random Forest* (Rodríguez-Valero y Alonso-Sarriá, 2019) e incluso la posibilidad de emplear el Análisis de Componentes Principales sobre la imagen: pero todo ello requiere una capacidad computacional mayor.

6. Conclusiones

El procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2 mediante el software de SNAP, así como su uso han sido de gran ayuda en el trabajo pudiéndose realizar un trabajo de gabinete efectivo sin la necesidad de desplazarse al área de estudio temporalmente para la supervisión del humedal. La aplicación para el estudio de la inundación en la Laguna de Gallocanta proporciona un valor de máxima superficie de la laguna coincidente con los resultados de otros trabajos realizados con Landsat anteriores a éste. El índice de agua MNDWI proporciona un resultado más adecuado que el uso del sistema de clasificación no supervisado K-means, aunque ambos métodos dan resultados correlacionados significativamente. Futuras líneas de investigación deberían ir relacionadas con la

necesidad de toma de datos de campo durante los diferentes períodos estacionales para validar los resultados y, con ello, la mejora de la clasificación no supervisada de los usos del suelo y la zona lagunar.

Referencias

- Arnaiz, S.L. ARA075: Laguna de Gallocanta. *Instituto Geológico y Minero de España*. Último acceso: 21 de julio, 2020, recuperado de <http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=ARA075>
- Castañeda, C., Herrero, J. 2009. Teledetección de cambios en la Laguna de Gallocanta. En Casterad, M.A., Castañeda, C. *La Laguna de Gallocanta Medio natural, conservación y teledetección* (pp. 103-126). Madrid: Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural.
- Castañeda, C., Jimenez, A., Latorre, B., Luna, E. 2015. Tratamiento automático de imágenes Landsat en entorno SIG para gestión de espacios protegidos: Laguna de Gallocanta, España. En: *Actas XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Sevilla, España, 21-23 Octubre 2015, 36-39. <http://hdl.handle.net/10261/128025>
- Casterad, M.A., Castañeda, C. 2009. *La Laguna de Gallocanta Medio natural, conservación y teledetección*. Madrid: Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural.
- Comín, F.A., Alonso, M. 1988. Spanish salt lakes: Their chemistry and biota. *Hydrobiologia*, 158, 237-245. <https://doi.org/10.1007/BF00026281>
- Comín, F.A., Julià, R., Comín, P. 1991. Fluctuations, the key aspect for the ecological interpretation of saline lake ecosystems. *Oecologia aquatica*, 10, 127-135.
- Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Reserva Natural Dirigida Laguna de Gallocanta. *Gobierno de Aragón*. Último acceso: 20 de julio, 2020, recuperado de <https://www.aragon.es/-/reserva-natural-de-la-laguna-de-gallocanta#anchor1>
- 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. Último acceso: 20 de julio, 2020, recuperado de <http://www.aet.org.es/revistas/revista24/AET24-11.pdf>
- Dusabimana, M.R., Blach, D., Mwiza, F., Muzungu, E., Swaminathan, R., Tate, Z. 2014. Utilizing NASA Earth Observations to Monitor Land Management Practices and the Development of Marshlands to Rice Fields in Rwanda. *AGUFM 2014*, B33C-0199.

- Galván, R. 2011. Evolución histórica de la laguna de Gallocanta. Un análisis documental. *Xiloca*, 39, 69-98.
- García, M.A., San Román, J., Blasco, O., Coloma, P. 2009. Hidrogeología de la Laguna de Gallocanta e implicaciones ambientales. En *La Laguna de Gallocanta Medio natural, conservación y teledetección* (pp. 77-101). Madrid: Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural.
- Gracia, F.J., Castañeda, C. 2018. Interpretación y cartografía de paleolíneas de costa lacustres mediante fotografías aéreas de alta resolución y datos LiDAR en la Laguna de Gallocanta (NE España). *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1-2), 31-51. <https://doi.org/10.17735/cyg.v32i1-2.62066>
- Instituto Aragonés de Estadística. Clima/ Datos climatológicos. IAEST. Último acceso: 27 de julio, 2020, recuperado de <https://servicios3.aragon.es/iaexi/tabla.do?path=/14/05/02/&file=14050201.px&type=pcaxis&L=0>
- Jiménez, A., Luna, E., Castañeda, C. 2015. Integración de datos territoriales de la Reserva Natural de la Laguna de Gallocanta como base para su gestión. *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 1689-1698.
- Lemenkova, P. 2016. Using GIS for Monitoring Lacustrine Ecosystem: a Case Study of Laguna de Gallocanta, Spain. En: *Proceedings of the Russian National Scientific Conference 'Problems of the Environmental Landscape Planning'*, Novocherkassk, Russia, 25-27 Abril. pp. 237-240.
- Mansaray, L. R., Huang, W., Zhang, D., Huang, J., Li, J. 2017. Mapping rice fields in urban Shanghai, southeast China, using Sentinel-1A and Landsat 8 datasets. *Remote Sensing*, 9(3), 257. <https://doi.org/10.3390/rs9030257>
- Moya, B.V., Hernández, A.E., Elizalde, H. 2005. Los humedales ante el cambio climático. *Investigaciones Geográficas*, 37, 127-132. <https://doi.org/10.14198/INGEO2005.37.07>
- Pérez, M.E., García, M.P. 2000. Estudio Microclimático de la Laguna de Gallocanta. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*, 102-114.
- Pérez, M.E., García, M.P. 2015. Fluctuaciones hídricas de la laguna de Gallocanta analizadas a partir de teledetección. *Eria*, 96, 97-106. <https://doi.org/10.17811/er.96.2015.97-106>
- Ramsar. España. *Ramsar*. Último acceso: 21 de julio, 2020, recuperado de <https://www.ramsar.org/es/humedal/espana>
- 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>
- San Román, J., García, M.A., Blasco, O., Coloma, P. 2007. Hidrogeología de la laguna de Gallocanta. *Xiloca*, 35, 65-86.
- Soria, J.M., Romo, S., Aledón, T., Flor, J., Calvo, S. 2015. Estudio de la inundación otoñal en el Parque Natural de la Albufera de Valencia mediante imágenes de Landsat. En: *Actas XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Sevilla, España, 21-23 Octubre 2015, 370-373.
- Velasco, R.A. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Último acceso: 21 de julio, 2020, recuperado de https://www.miteco.gob.es/images/es/29_fir_gallocanta_0_tcm30-202998.pdf