

Análisis por teledetección de superficies de agua altamente variables en zonas húmedas

Pena-Regueiro, J.⁽¹⁾, Sebastiá-Frasquet, M.T.⁽¹⁾, Estornell, J.⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, C/Paraninfo, 1, 46730 Grau de Gandía, España. jepere@doctor.upv.es

⁽²⁾Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

Resumen: Es importante desarrollar metodologías que permitan el seguimiento de ecosistemas altamente vulnerables como las zonas húmedas para conocer su estado. El objetivo de este trabajo es determinar la superficie de lámina de agua de una zona húmeda litoral a partir de imágenes Sentinel-2. La resolución espacial y temporal de Sentinel-2 es clave para poder estudiar la variabilidad espacial y temporal de estos ecosistemas. La metodología propuesta debería ser considerada como herramienta de gestión para conocer la superficie real de inundación, antes de aplicar medidas que tal vez sean innecesarias, como el bombeo de elevados caudales al mar.

Palabras clave: Sentinel-2, humedal, superficie inundada, NDWI, precipitación, evapotranspiración.

Analysis of highly variable water surfaces in humid areas using Remote Sensing

Abstract: It is important to develop methodologies that allow monitoring of highly vulnerable ecosystems such as wetlands to know their status. The objective of this study is to determine the water sheet surface of a coastal wet zone from Sentinel-2 images. The spatial and temporal resolution of Sentinel-2 is vital to study the spatial and temporal variability of these ecosystems. The proposed methodology should be considered as a management tool to know the actual flood surface, before applying measures that may be unnecessary, such as pumping high flows into the sea.

Keywords: Sentinel-2, wetland, flooded surface, NDWI, precipitation, evapotranspiration.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas húmedas son de vital importancia por la gran variedad de servicios ecosistémicos que generan. A nivel hidrológico son una importante reserva de agua dulce, zona de recarga de aguas subterráneas y zona de mitigación de crecidas e inundaciones. En los últimos años existe un creciente interés en desarrollar indicadores para monitorear el cambio ambiental en estas áreas (Tiner, 2004). Una gran cantidad de estudios científicos han abordado el tema del mapeo y monitoreo de hábitats naturales a través de sensores remotos y la obtención de indicadores sobre su estado de conservación (Tiner, 2004). Una de las variables de interés para su seguimiento es la superficie de láminas de agua o superficie inundada. La Convención de Ramsar representa el principal marco mundial para la protección ambiental de los humedales. La Convención estableció un Sistema de Clasificación de Tipos de Humedales que identifica 42 tipos agrupados en 3 categorías principales: marinos y costeros, continentales y artificiales. Así pues, una determinada zona húmeda se identifica con un tipo principal de humedal según su predominancia, pero puede tener presentes más de un tipo, siendo esto lo más común. La Marjal de la Safor (Valencia, España) es un humedal costero, en el que se encuentran los siguientes subtipos continentales y artificiales: turberas no arboladas, manantiales de agua dulce (conocidos localmente como *ullals*), tierras de regadío (cítricos) y canales de transportación y de drenaje, zanjas (acequias y rasas). Cada uno de estos subtipos

se caracteriza por su tamaño, morfología, vegetación y período de permanencia de la lámina de agua. Esta gran variabilidad dificulta el seguimiento del estado de estos humedales, principalmente por el reducido tamaño de algunas superficies que dificulta su detección y cuantificación (Gallant, 2015). En este trabajo proponemos la utilización de imágenes Sentinel-2 (ESA) que teniendo en cuenta su resolución espacial permiten salvar esta dificultad. El objetivo es realizar un seguimiento temporal y espacial de la superficie de lámina de agua de la Marjal de la Safor mediante imágenes Sentinel-2. Para detectar el cambio interanual y trimestral se calcula el índice de anomalía de la superficie de lámina de agua. Además, para interpretar los cambios observados se calcula el índice de anomalía de la precipitación y de la evapotranspiración.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La Marjal de La Safor (Valencia, España) tiene una superficie de 1244,86 ha que se extiende por cuatro municipios: Gandía, Xeresa, Xeraco y Tavernes de la Valldigna (Figura 1). Esta zona húmeda tiene varias figuras de protección: zona ZEPA, Lugar de Interés Comunitario (LIC) con código ES5233030 y a nivel regional forma parte del Catálogo Valenciano de Zonas Húmedas. Contiene los hábitats: “Lagos distróficos naturales”, “Ríos mediterráneos de caudal permanente”, “Turberas calcáreas de *Claudium mariscus* y *Carex davalliana*”, “lagos eutróficos naturales” y “prados mediterráneos de hierbas altas y juncos”.

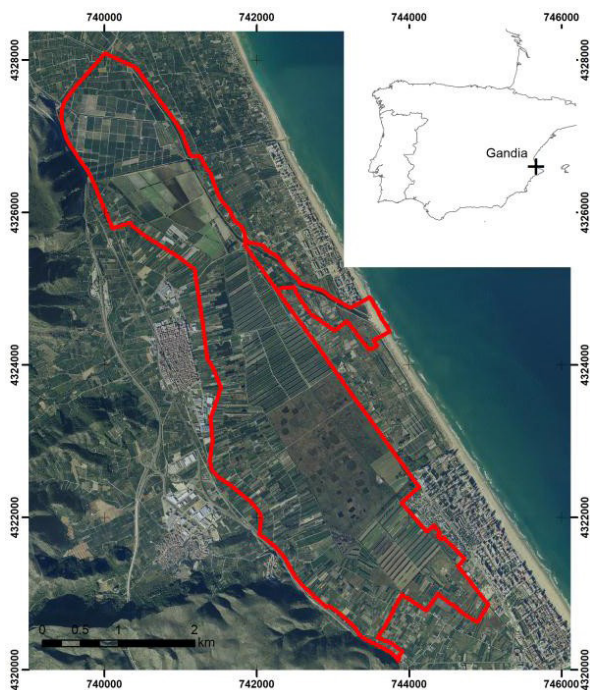


Figura 1. Límite zona húmeda “Marjal de la Safor”.

Se considera una de las zonas húmedas litorales de agua dulce mejor conservadas en la Comunidad Valenciana. El nivel freático en la Marjal fluctúa con cierta facilidad en función de las variaciones del nivel piezométrico de las aguas subterráneas. Cuando el nivel freático es elevado la capacidad de infiltración se ve inhibida y el agua acumulada desborda fácilmente sobre los límites habitualmente encharcados. Entre los usos del suelo actuales se distinguen zonas seminaturales caracterizadas por las láminas de agua y vegetación palustre, y áreas transformadas para el cultivo de cítricos, hortalizas y flores ornamentales.

2.2. Análisis

Los análisis se realizaron mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2A y B nivel 1C descargadas desde la web de Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) y de la web EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Se descargaron imágenes entre el 01/09/2015 y

Tabla 1. Listado de imágenes utilizadas en el estudio por fecha.

Mes	Año			
	2015	2016	2017	2018
Enero		12	16	01, 11, 21
Febrero			25	15, 25
Marzo		12	07	07, 27
Abril		01, 21	06, 16	
Mayo		01, 21	06, 16, 26	01, 16, 21
Junio			05, 15, 30	15, 25
Julio		30	05, 15, 30	05, 15, 30
Agosto		09	04, 24	04, 19, 29
Septiembre	14, 24	18	13	
Octubre	04	08	03, 13, 28	
Noviembre		07, 17	07, 17, 27	
Diciembre	03		02, 17, 22	

el 31/08/2018 para cubrir 3 años hidrológicos intentando disponer de tres imágenes por mes distribuidas de manera homogénea. Las imágenes se corrigieron atmosféricamente mediante la aplicación Sen2Cor (versión 02.05.05) implementado en SNAP (ESA, versión 6.0.0).

A partir de las imágenes corregidas atmosféricamente se calculó el índice de agua *Normalized Difference Water Index* (NDWI, McFeeters, 1996) para la extracción de las superficies de agua presentes en la zona de estudio (Ecuación 1).

Este índice se seleccionó tras un análisis estadístico en el que se compararon diferentes índices en diversos humedales y fechas. Las imágenes de NDWI se reclasificaron utilizando el umbral de mayor a -0,30 para extraer las láminas de agua. Este umbral se definió a partir de 60 puntos cuya clase tierra/agua se determinó a partir de ortofotos de alta resolución (30 sobre tierra y 30 sobre agua) tomados en 2016, 2017 y 2018 en 4 humedales de la Comunidad Valenciana (660 puntos en total). El umbral mostró consistencia para distintos niveles de inundación. Estos resultados forman parte de una investigación más amplia (artículo en revisión). Esta nueva capa se transformó a polígonos y las áreas de cada uno de ellos se calcularon obteniendo la superficie total de lámina de agua en cada imagen. Los datos de superficie se promediaron por trimestre calculando la anomalía de superficie de lámina de agua IAL_i (Ecuación 2).

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \tag{1}$$

Siendo $B3$ la reflectividad de la banda 3 (560 nm) de Sentinel 2 y $B8$ la reflectividad de la banda 8 (842 nm).

$$IAL_i = \frac{A_{LAI} - A_{LAmedio}}{\sigma_{LAmedio}} \tag{2}$$

Siendo IAL_i el índice de la Anomalía de Lámina de Agua para un trimestre i , A_{LAI} es la superficie media de lámina de agua en el trimestre i , $A_{LAmedio}$ es la superficie media de lámina de agua en el trimestre del periodo analizado (01/09/2015-31/08/2018) y $\sigma_{LAmedio}$ es la desviación estándar de la superficie de lámina de agua en el trimestre del periodo analizado. A partir de estos valores se analizaron los trimestres con anomalías positivas y negativas. Además, se obtuvieron los valores de precipitación y evapotranspiración potencial de la estación meteorológica más cercana a la zona de estudio, Gandia-Marxuquera (<http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos>). Con estos valores se calcularon el Índice de Anomalía de Precipitación, IAP_i (Ecuación 3) (Valencia et al., 2017) y el índice de Anomalía de Evapotranspiración Potencial $IAETP_i$ (Ecuación 4).

$$IAP_i = \frac{P_i - P_{medio}}{\sigma_{Pmedio}} \tag{3}$$

Siendo IAP_i el índice de la Anomalía de Precipitación para un trimestre i , P_i es la precipitación media en el trimestre i , P_{medio} es la precipitación media en el trimestre del periodo analizado (01/09/2015-31/08/2018) y σ_{Pmedio} es la desviación estándar de la precipitación en el trimestre del periodo analizado.

$$IAETP_i = \frac{ETP_i - ETP_{medio}}{\sigma_{ETPmedio}} \tag{4}$$

Siendo $IETP_i$ es el índice de la Anomalia de Evapotranspiración potencial para un trimestre i , ETP_i es la evapotranspiración potencial media en el trimestre i , ETP_{medio} es la evapotranspiración media en el trimestre del periodo analizado y $\sigma_{ETP_{medio}}$ es la desviación estándar de la evapotranspiración potencial en el trimestre del periodo analizado.

Finalmente se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables superficie de agua, precipitación y evapotranspiración por trimestres (Tabla 2).

3. RESULTADOS

El cálculo de los índices de anomalías trimestrales (Figura 2) permite observar la relación directamente proporcional entre la superficie de agua y la precipitación, e inversamente proporcional entre superficie de agua y evapotranspiración. El periodo de estudio analizado comienza en el primer trimestre del año hidrológico 2016 (Tabla 3), de septiembre a noviembre de 2015, con un IAL_i positivo que se corresponde con un trimestre de elevada precipitación (258,6 mm) y baja evapotranspiración. Durante los siguientes cuatro trimestres el IAL_i fue negativo coincidiendo con el periodo de bajas precipitaciones (282,8 mm acumulados). Del segundo trimestre de 2017 al primero de 2018 (Tabla 3) se observa un periodo con un IAL_i positivo que inicia tras las gotas frías del periodo de diciembre a febrero con 459,0 mm acumuladas.

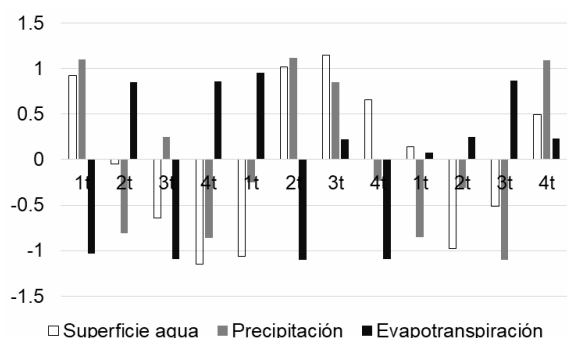


Figura 2. Índice de anomalías trimestrales de superficie de agua, precipitación y evapotranspiración.

La relación observada en la Figura 2 se confirma con los coeficientes de correlación de Pearson resumidos en la Tabla 2. En general se observa una elevada correlación de la superficie de agua con la precipitación y la evapotranspiración entorno a 0,70.

Tabla 2. Índice de correlación de Pearson trimestral entre superficie de agua (S_a) - precipitación (P) y superficie de agua (S_a) - Evapotranspiración (ETP).

Correlación	1t	2t	3t	4t
$S_a - P$	0,58	0,74	0,69	0,69
$S_a - ETP$	-0,98	-0,71	0,25	-0,80

En la Figura 3 se presentan imágenes representativas del periodo de estudio. De izquierda a derecha, agosto de 2016 con una superficie de agua de 94,6 ha, enero de 2017 con una superficie de 170,6 ha y mayo de 2017 con 93,3 ha. En agosto de 2016 y mayo de 2017 la superficie de agua se limita prácticamente a la zona húmeda artificial, canales de drenaje y riego (acequias y rasas). En enero de 2017 el incremento del nivel piezométrico en el acuífero cársico debido a las precipitaciones y el aumento del drenaje hacia la Marjal produce el aumento de inundación de la zona de turberas calcáreas y prados mediterráneos.

Tabla 3. Equivalencias periodos de estudio entre año hidrológico y trimestres.

Años Hidrológicos	1t	2t	3t	4t
2016	Sep-Oct- Nov 15	Dic15/ Ene- Feb 16	Mar-Abr- May 16	Jun-Jul- Ago 16
2017	Sep-Oct- Nov 16	Dic16/ Ene- Feb 17	Mar-Abr- May 17	Jun-Jul- Ago 17
2018	Sep-Oct- Nov 17	Dic17/ Ene- Feb 18	Mar-Abr- May 18	Jun-Jul- Ago 18

4. DISCUSIÓN

La resolución espacial y temporal de las imágenes Sentinel-2 ha permitido detectar y cuantificar las superficies de agua en la época de mínima (Figura 3, agosto 2016) y máxima superficie inundada (Figura 3, enero 2017). La superficie permanente de agua en la zona húmeda artificial,



Figura 3. Imágenes representativas de la variabilidad de la superficie de agua inundada de la Marjal de la Safor. Composición en falso color R (B08), G (B04) y B (B03).

acequias y rasas, de pequeñas dimensiones, sería difícilmente observable con otros sensores de menor resolución espacial. La zona con mayor variabilidad de superficie de agua es la zona húmeda de vegetación palustre (turberas y prados).

La correlación entre superficie inundada, precipitación y evapotranspiración es en general elevada dado el funcionamiento hidrológico de la Marjal. Los episodios de precipitación producen la recarga del acuífero cárstico y un aumento de la descarga hacia el acuífero detrítico, con el consecuente aumento del nivel freático. Asimismo, la elevada evapotranspiración, coincidente con los meses más secos del año, explica la reducción de la superficie inundada. Sin embargo, puntualmente el coeficiente de correlación es bajo (Tabla 2). Es el caso de la correlación entre superficie de agua y la evapotranspiración del tercer trimestre. Cabe destacar que en la Marjal de la Safor es muy importante la regulación artificial de la superficie inundada. Principalmente tras los episodios de precipitación se bombea agua al mar para tratar de descender el nivel freático e impedir la inundación de los cultivos de cítricos y de zonas urbanizadas (Sebastiá *et al.*, 2012). Además, hay catalogados al menos catorce pozos importantes, para el abastecimiento de aguas potables de la playa de Gandía y el municipio de Xeresa y de agua de riego a la Comunidad de Regantes de Gandía. El caudal extraído varía mucho en función de la estación, siendo máximo durante el verano, período de mayor afluencia turística.

Estas actuaciones antrópicas explican que la correlación observada no sea mayor. Este estudio es un paso fundamental en el mejor entendimiento del funcionamiento hídrico de la Marjal. La metodología propuesta debería ser considerada como herramienta de gestión para conocer la superficie real de inundación, antes de aplicar medidas, que tal vez sean innecesarias, como el bombeo de elevados caudales al mar, y que puedan resultar dañinas para el ecosistema. Uno de los mayores valores ecosistémicos de las zonas húmedas es que son una importante reserva de agua dulce. Aplicar medidas de gestión basadas en metodologías científicas y no en costumbres no adaptadas al escenario actual pueden llevar a la pérdida de un recurso hídrico muy necesario antes los futuros escenarios de cambio climático.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Gallant, A., 2015. The challenges of remote monitoring of wetlands. *Remote Sensing*, 7(8), 10938-10950.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1425– 1432.
- Sebastiá, M.T., *et al.* 2012. Influence of nutrient inputs from a wetland dominated by agriculture on the phytoplankton community in a shallow harbour at the Spanish Mediterranean coast. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 152, 10-20.
- Tiner, R.W. 2004 Remotely-sensed indicators for monitoring the general condition of “natural habitat” in watersheds: an application for Delaware’s Nanticoke River watershed, *Ecological Indicators* 4 (4), 227-243.

Valencia, J. *et al.* 2017. Anomalías de vegetación asociadas con el fenómeno del ENOS en el valle geográfico del río Cauca, Colombia. *Revista de Teledetección*, 50, 89-99.