

Estudio de la inundación otoñal en el Parque Natural de la Albufera de Valencia mediante imágenes de Landsat

Juan Miguel Soria García⁽¹⁾, Susana Romo⁽¹⁾, Tomás Aledón Catalá⁽¹⁾, José Flor Izquierdo⁽¹⁾, Sara Calvo García⁽¹⁾, Aida Pastor Palacios⁽¹⁾, Ana García Picazo⁽¹⁾ e Iván Arribas Fernández⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Microbiología y Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad de Valencia, Campus de Burjassot, 46100 – Burjassot, España. Email: juan.soria@uv.es

⁽²⁾ Departamento de Análisis Económico (IVIE – ERI-CES). Facultad de Economía, Universidad de Valencia, Campus de Tarongers, 46021 – Valencia, España.

Resumen: El lago de la Albufera de Valencia y su marjal circundante es uno de los humedales más importantes de nuestra península, por su intrínseco valor ecológico, por ser zona de invernada de aves acuáticas y por la producción y cultivo estival de arroz. A pesar de ello, la laguna en sí misma está muy alterada de su estado natural y presenta desde hace casi más de 50 años un estado hipertrófico, con valores de clorofila fitoplanctónica por encima de 100 µg/L. Las medidas aplicadas para mejorar su estado trófico de acuerdo con la Directiva Marco del Agua para el presente año 2015, distan de ser suficientes para conseguir el buen estado ecológico requerido. Esto puede ser parcialmente debido al descenso de las aportaciones de agua durante la inundación máxima del marjal en otoño. Los arrozales dentro del Parque actúan como un humedal temporal, que se inundan durante el otoño y parte del invierno, y se desecan durante la primavera para el comienzo del cultivo. El lago de la Albufera actúa como receptor del vaciado de los campos antes de desaguar al mar. Por medio de imágenes históricas de Landsat 5, 7 y 8 se han estudiado los cambios en la inundación del marjal. En este trabajo, se han comparado los resultados obtenidos mediante la aplicación de varios índices y se ha cuantificado los valores medios, máximos y mínimos de superficie y volumen de inundación del humedal. Las mediciones de satélite se han contrastado con datos de campo. Asimismo, se han evaluado los cambios del área y volumen de arrozal inundado a lo largo de una serie temporal. Los resultados muestran cambios que deben considerarse si se pretende mejorar la gestión y conservación del Parque Natural.

Palabras clave: serie temporal, arrozales, humedal, satélite, NDWI.

Monitoring autumnal flooding in the Albufera Natural Park (Valencia, Spain) by Landsat imagery

Abstract: The Albufera of Valencia lagoon and its surrounding marsh is one of the most important wetlands in the Iberian Peninsula because of its intrinsic ecological value, as a waterfowl wintering area, and its summer rice production. However, the lagoon has suffered far-reaching changes from its natural state and for almost more than 50 years it has been hypertrophic, with phytoplanktonic chlorophyll at concentrations of over 100 µg/L. The restoration measures carried out to improve its trophic state, in compliance with the Water Framework Directive for 2015, are still insufficient to achieve a good ecological status. In part, this may be due to the decline in the inputs of good water quality during the maximum autumnal flooding of the ricefields. The paddy fields in the Park are temporary wetlands, which are flooded in autumn and part of winter and dry in spring at the start of the rice crop. The drained water from the fields passes through the Albufera Lake before outflowing into the sea. Landsat 5, 7 and 8 imagery has been used to study the inundation changes in the wetland. In this work, we have compared the results obtained from several indexes and quantified the mean, maximum and minimum surface and volume of the flooding levels in the wetland. The results were contrasted with field measurements. The long-term changes in the extension and water volume of the wetland were also studied. The results highlighted significant changes needed to improve the management and conservation of the Natural Park.

Keywords: time series, ricefields, wetland, remote sensing, NDWI.

1. INTRODUCCIÓN

La Albufera de Valencia es la laguna costera más extensa de nuestra península y se encuentra separada del mar Mediterráneo por una restinga de aproximadamente un kilómetro de anchura. Se originó por el cierre de una bahía, debido a las aportaciones de sedimentos fluviales durante la época romana y en una segunda fase durante la Edad Media. Su superficie original, en torno a los 150 km², se ha visto reducida en la actualidad a 22,3 km² de laguna abierta, con una profundidad media de 0,9 m. Se encuentra rodeada por un humedal antaño natural, pero que ahora está principalmente modificado para el

cultivo del arroz. Los arrozales funcionan como un humedal temporal con un ciclo hidrológico de inundación estival mínima durante el crecimiento del arroz y de vaciado en septiembre para su recogida. El agua pasa parcialmente por el lago en su camino al mar durante el vaciado. En octubre, los campos se vuelven a inundar (inundación máxima) para dar cobijo a las aves acuáticas invernantes. En enero y febrero, el agua se drena pasando de nuevo por el lago, para finalmente iniciar en marzo y abril la nueva siembra en los arrozales secos. La Albufera fue incluida en los años 70 en el listado elaborado en el Convenio de Ramsar y en 1986 fue declarada Parque Natural, con una superficie

protegida de 211,2 km², que incluye los arrozales, la laguna y la restinga. Posteriormente, esta zona se ha catalogado dentro de la Red Natura 2000 de la Unión Europea, por su carácter de Lugar de Interés Comunitario (LIC) y como Zona de Especial Protección de Aves (ZEPA). La laguna ha pasado por un proceso de eutrofización cultural acelerado por el vertido de las aguas residuales de una extensa cuenca hidrográfica (de unos 917 km²) (Romo *et al.* 2005). En 1971 se citaron valores de clorofila fitoplanctónica de 5-10 µg/L y en 1980 de 800 µg/L (Soria, 2006). Las medidas implementadas por los gestores de la cuenca, derivando los vertidos hacia estaciones depuradoras dotadas de tratamiento terciario han reducido los niveles de eutrofia a valores por debajo de 300 µg/L de clorofila *a* y rara vez son inferiores a 60 µg/L dentro del lago. El estado hipertrófico se mantiene por varios procesos, como son las entradas de agua procedentes de las depuradoras ricas entre otros compuestos, en nitrógeno inorgánico y debido también al reciclaje interno de los nutrientes acumulados en el sedimento, especialmente de fósforo. Las aportaciones de aguas superficiales procedentes de escorrentías y de sobrantes de riego se han reducido paulatinamente con la mejora de los sistemas de gestión hídricos y la implantación del regadío localizado en cultivos arbóreos. Uno de los principales problemas en el Parque Natural de la Albufera es la falta de aportes de agua de calidad que aceleren sus tasas de renovación y mejoren su estado ecológico (Romo *et al.* 2013). Las mayores tasas de renovación del agua en el lago se dan a finales de invierno con el drenaje de los arrozales. Sin embargo, la inundación otoñal actual pudiera ser inferior a la de años anteriores, lo que haría disminuir los aportes de aguas relativamente de buena calidad al lago (Romo *et al.* 2013). La serie larga de imágenes de Landsat ofrece la posibilidad de realizar un seguimiento desde 1984 de la inundación otoñal de los arrozales, permitiendo conocer con precisión la extensión de la inundación y diferenciar niveles de profundidad de la lámina de agua (Prados, 1995; Bustamante *et al.* 2005). El objetivo de este estudio es procesar las imágenes disponibles de una serie temporal entre 1984 y 2014, durante los meses de máxima inundación otoñal (noviembre y diciembre), para evaluar la extensión y el volumen de agua almacenado en esas lagunas temporales artificiales que son el arrozal en el Parque Natural de la Albufera. Estos resultados ayudarán a comprender mejor los ciclos de renovación del agua en el lago y a una mejor gestión y conservación del Parque.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Los análisis se han realizado con imágenes recogidas por Landsat 5, 7 y 8, pertenecientes a la fila (row) 33 de las pasadas (path) 198 y 199 y descargadas con licencia desde la web de USGS. Las fechas seleccionadas abarcaron desde noviembre de 1984 hasta diciembre de 2014. El archivo de imágenes Landsat proporcionó un total de veintidós imágenes para trece años dentro del periodo estudiado. Para algunos años no hay imágenes disponibles o utilizables en los archivos. En el presente

estudio, sólo se han utilizado imágenes sin nubes (o con cirros altos tenues).

El tratamiento de las escenas se ha realizado con el programa ENVI 5.0.3 (de Exelis Visual Information Solutions). La corrección atmosférica se ha realizado con el procedimiento QUAC implementado en ENVI. Se recortaron las imágenes a las áreas correspondientes al Parque Natural de la Albufera. Posteriormente se aplicó el procedimiento de ENVI denominado SPEAR – LOC Water que generaba las imágenes correspondientes al índice de agua NDWI (*Normalized Difference Water Index*). También se aplicó una clasificación no supervisada por el procedimiento IsoData implementado en ENVI (Verpoorter *et al.* 2012) sobre la imagen de las cuatro primeras bandas y el resultado fue la clasificación de la escena en siete clases, que se interpretaron posteriormente por el nivel de agua. Se ha definido una sola zona de interés (ROI) para realizar los estadísticos del área de arrozales, limitando el borde externo de los cultivos y la vegetación perilagunar del lago (Rivera *et al.* 2013), sin incluir el propio lago de la Albufera, y se ha estimado la superficie a partir de las clases obtenidas en la clasificación IsoData.

En el campo, se ha determinado la profundidad de las láminas de agua en los arrozales del entorno de la Albufera en cuarenta y siete puntos (coincidiendo con las fechas de paso del satélite del invierno de 2014-2015), para obtener una serie de puntos de medida representativa de nivel de agua y el tipo de cobertura de vegetación acuática. Estos datos se correlacionaron con los valores de los diferentes índices considerados para evaluar el nivel de agua correspondiente a cada pixel de la superficie de agua en cada escena estudiada.

3. RESULTADOS

3.1. Superficie inundada

La superficie de referencia de los arrozales estudiada corresponde al área total de arrozales existente en 1984, estimada en 143,7 km². A partir del trazado vectorial con los límites de los arrozales, se ha creado una región de interés (ROI) sobre la cual obtener las estadísticas. La tabla 1 muestra el listado de los años con imágenes disponibles de noviembre y/o diciembre (en ocasiones de finales de octubre) y el valor estimado de la superficie inundada. Este valor se ha obtenido a partir del recuento de los píxeles que pertenecen a las clases 1 a 5 del análisis IsoData. El calibrado con datos de campo permite separar en clases los niveles de las láminas de agua.

El valor de superficie de los arrozales no ha variado sensiblemente entre los años estudiados. Algunos arrozales de la zona norte, próxima a la ciudad han dejado de serlo y algunos situados en el extremo suroeste, la zona más elevada, han sido transformados en huertas. Sin embargo, otras parcelas en el interior del Parque Natural han vuelto a ser arrozales, por lo que la superficie de arrozal para 2014 ha sido de 140 km², lo cual supone tan sólo un descenso del 2,5 % en los treinta años transcurridos (3,7 km²).

Sin embargo, con el área inundada durante el periodo invernal existe variabilidad interanual (tabla 1).

Tabla 1. Fechas de las imágenes procesadas, superficie inundada en invierno del arrozal (km²) y porcentaje referido a la superficie total de arrozal.

Fecha	Superficie	% del total
24-nov-84	127,7	88,8%
19-dic-84	114,0	79,3%
20-dic-87	118,6	82,5%
18-nov-90	111,8	77,7%
19-nov-99	124,0	86,3%
05-dic-99	117,1	81,5%
27-oct-00	132,7	92,3%
21-nov-00	114,9	74,1%
23-dic-00	95,5	66,5%
08-nov-01	110,8	76,9%
26-dic-01	117,0	81,4%
26-oct-02	119,1	82,9%
29-dic-02	114,1	79,4%
13-nov-04	114,7	79,8%
14-nov-06	125,1	81,9%
16-dic-06	105,0	73,1%
03-nov-08	121,5	84,5%
08-dic-09	109,0	75,9%
16-nov-10	117,1	73,2%
24-nov-13	106,7	74,2%
10-dic-13	114,6	79,7%
06-dic-14	118,7	82,6%

El índice NDWI nos proporciona los valores para los diferentes estados de humedad del suelo y el nivel de agua de los arrozales y el lago. En la escena de la figura 1, máxima inundación registrada en el periodo estudiado (27 de octubre de 2000), los valores obtenidos fueron desde -0,30 en zonas someras menores de 10 cm de agua, hasta cerca de 0,40 en parcelas con más de 50 cm de nivel de agua. El mar Mediterráneo presenta valores del índice superiores a 0,50, para la zona costera próxima a la Albufera. Las zonas con vegetación presentan valores inferiores a -0,50.

3.2. Niveles de agua y cambios en el tiempo

Los niveles de profundidad en los arrozales variaron entre la simple humedad del suelo y 70 cm de profundidad de lámina de agua. Los valores del NDWI correspondientes a los puntos de medida en el humedal oscilaron entre -0,89 y +0,11. El ajuste entre los valores obtenidos con el índice NDWI y las mediciones de nivel de agua (figura 2) fue significativo con un coeficiente de correlación de Pearson $r=0,7934$ ($n=47$, $p<0,001$). El error típico fue de 0,12.

Sin embargo, no se realizó la estimación de nivel de agua en los humedales utilizando sólo los valores de la ecuación de la regresión. La variabilidad del índice NDWI, para un mismo lugar de características invariables puede oscilar hasta 0,3 en diferentes imágenes. Por ello, se ha escogido una imagen de cada año, la que presenta la mayor área inundada en noviembre o diciembre. Se han ajustado los valores del índice con treinta y seis puntos de calibrado en cuatro zonas de reflectividad invariable del entorno del Parque Natural en cada una de las trece imágenes consideradas.



Figura 1. Escena del 27 de octubre de 2000 del índice NDWI. La línea discontinua blanca delimita el ROI estudiado. El lago de la Albufera es la zona central. En su interior y su borde se aprecia con un sombreado más oscuro la vegetación helófila. La restinga arenosa situada entre el lago y el mar, está cubierta por el bosque de la Devesa. Se observan también los tres canales de drenaje que comunican la laguna y los arrozales con el mar.

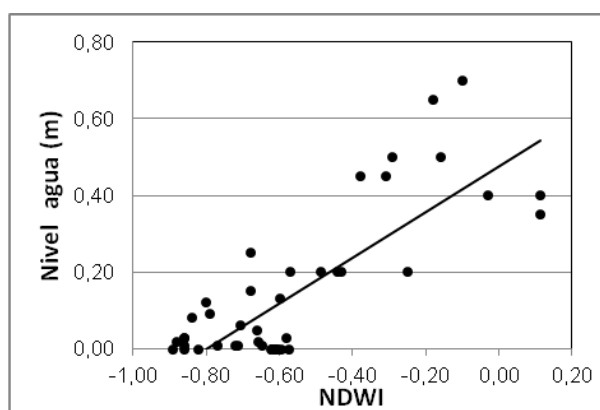


Figura 2. Ajuste entre los valores obtenidos con el índice NDWI y las mediciones de nivel de agua realizadas en 47 puntos.

A partir del índice se ha obtenido el volumen de agua en el humedal para las diferentes fechas (figura 3). Los valores han oscilado entre 72,84 hm³ en la máxima inundación extraordinaria registrada con las lluvias de octubre de 2000 (213 mm el 24-oct), y los 54 hm³ en

noviembre de 2006. El promedio se sitúa en 57,8 hm³ y la desviación típica en 4,1 hm³. El procedimiento se repitió para todas las imágenes disponibles hasta 2014, de tal manera que se ha podido determinar la inundación otoñal del arrozal en la serie temporal (figura 3). En ella se observa una alternancia de máximos influida por la proximidad de las lluvias otoñales a la escena (caso del 13-nov-2004 con 12 mm la víspera o el 3-nov-2008 con 101 mm durante la semana anterior).

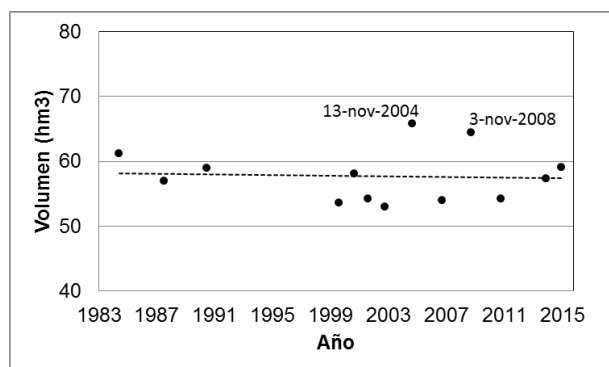


Figura 3. Volumen de agua estimada en la inundación otoñal de los arrozales entre 1984 y 2014, señalando las fechas máximas. La línea de tendencia no tiene significación estadística.

Comparando la serie temporal a lo largo de treinta años, se observa que el Parque Natural de la Albufera no sólo ha reducido su superficie de humedal, sino que también lo ha hecho el agua embalsada en el invierno. Mientras que el descenso de la superficie de cultivo del arrozal ha sido del 2,5 %, la superficie inundada en otoño es menor que antaño y el volumen de agua de la inundación ha descendido en promedio un 6 % (unos 4 hm³). Sin embargo, el descenso no tiene una tendencia lineal y presenta una oscilación entre mínimos y máximos que puede llegar hasta 20 hm³ entre años consecutivos, en función de la meteorología y las precipitaciones.

4. DISCUSIÓN

La utilización de las imágenes de Landsat ha sido muy útil para realizar estimas y recabar información hidrológica del humedal de la Albufera de Valencia. El análisis discriminante utilizado por Moré *et al.* (2011) en arrozales del Delta del Ebro permitía separar en zonas con mayor o menor inundación; en nuestro caso, el uso de la clasificación IsoData ha mostrado igualmente la separación en clases, con un procedimiento automatizado no supervisado. En un segundo paso, el índice NDWI previamente ajustado, permitió estimar con precisión los niveles de agua en los arrozales del Parque. Los resultados obtenidos constatan una reducción de la superficie y el volumen de agua en la inundación otoñal de los arrozales. Si bien la reducción de la superficie inundada del arrozal fue del 2,5 %, la reducción en volumen de agua durante el máximo anual fue de unos 4 hm³, lo que representa un 15 % volumen del lago, disminuyendo por tanto la renovación en el mismo. Se evidencia también que, en

algunos años como 1999 o 2002, el área inundada puede mantenerse igual, pero el volumen de agua en los arrozales son los mínimos de la serie estudiada. El organismo gestor de la cuenca hidrográfica (Confederación Hidrográfica del Júcar) determina en última instancia los aportes hídricos que recibe el Parque con la regulación del río Júcar. Los resultados de este estudio resultan interesantes para definir un plan de gestión de las aguas adecuado para el Parque Natural de la Albufera. Actualmente, es necesario determinar parámetros de calidad del agua y volúmenes ecológicos necesarios para la correcta restauración y conservación del Parque y por tanto de la laguna, pues no se establece ningún tipo de caudal ecológico a la misma a lo largo del año, tan sólo los sobrantes de riego y las escorrentías superficiales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bustamente J., Díaz-Delgado R. y Aragonés D. 2005. *Determinación de las características de masas de agua someras en las marismas de Doñana mediante teledetección*. Revista de Teledetección, 24: 107-111.
- Moré G., Serra P. & Pons X. 2011. *Multitemporal flooding dynamics of rice fields by means of discriminant analysis of radiometrically corrected remote sensing imagery*. International Journal of Remote Sensing, 32 (7): 1983-2011. DOI: 10.1080/01431161003645816
- Prados M. J. 1995. *La utilización de imágenes Landsat 5 TM para la estimación y seguimiento de áreas de monocultivo arrocero y su vinculación a espacios naturales*. Revista de Teledetección, 5: 43-47.
- Rivera S., Landom K. & Crawl T. 2013. *Monitoring macrophytes cover and taxa in Utah Lake by using 2009-2011 Landsat digital imagery*. Revista de Teledetección, 39: 1-10.
- Romo S., Villena M.J., Sahuquillo M., Soria J., Giménez M., Alfonso T., Vicente E. & Miracle R. 2005. *Response of a shallow Mediterranean lake to nutrient diversion: does it follow similar patterns as northern shallow lakes?* Freshwater Biology, 50, 1706-1717.
- Romo S., Soria J., Fernández, F., Ouahid, Y. & Barón-Sola A. 2013. *Water residence time and the dynamics of toxic cyanobacteria*. Freshwater Biology, 58: 513-522. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2012.02734.x
- Soria J. M. 2006. *Past, present and future of la Albufera of Valencia Natural Park*. Limnetica, 25 (1-2): 135-142.
- Verpoorter C., Kutser T. & Tranvik L. 2012. *Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data*. Limnology and Oceanography Methods, 10: 1037-1050. DOI: 10.4319/lom.2012.10.1037