

## Desarrollo de un indicador para el seguimiento de los niveles de inundación en humedales Mediterráneos

Antonio Sánchez<sup>(1)</sup>, Dania Abdul Malak<sup>(1)</sup>, Anis Guelmami<sup>(2)</sup>, Christian Perennou<sup>(2)</sup> y Juan Francisco Martínez-Murillo<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro Temático Europeo, Universidad de Málaga, Edificio Ada Byron, C/ Francisco Peñalosa s/n, 29010-Málaga, España. Email: a\_sanchez@uma.es

<sup>(2)</sup> Tour du Valat, Centro de Investigación para la Conservación de los Humedales Mediterráneos, Le Sambuc, 13200-Arles, Francia. Email: perennou@tourduvalat.org

<sup>(3)</sup> Departamento de Geografía, Universidad de Málaga, Facultad de Filosofía y Letras, Campus Universitario de Teatinos s/n, 29071-Málaga, España. Email: jfmmurillo@icloud.com

**Resumen:** Los humedales representan ecosistemas sensibles que son objeto de amenazas antropogénicas. En las últimas décadas, los humedales costeros en el Mediterráneo han sufrido presiones considerables por el crecimiento urbano y la intensificación de prácticas agrícolas. Las técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas eficientes que pueden apoyar el seguimiento de humedales costeros del Mediterráneo. Estas técnicas han sido utilizadas para desarrollar un indicador de inundación para apoyar el seguimiento y control de humedales costeros en el sur de Francia. El indicador se basa en series temporales de imágenes del satélite Landsat, que cubren los años 2000, 2007 y 2012; y capas de referencia de usos del suelo para identificar y mapear los niveles de inundación anuales. La metodología combina el uso de índices de vegetación con un árbol de decisión para detectar la masa de agua que cubre los humedales en diferentes fechas dentro de un ciclo anual. Un proceso de validación es implementado para comprobar la fiabilidad del indicador comparándolo con los inventarios de humedales.

Los resultados indican que el área de estudio presenta un alto nivel de inundación a lo largo de todo el año. Durante el periodo de estudio, el 40% del área se encuentra permanentemente inundada. El nivel de inundación aumenta hasta el 56-62% cuando las inundaciones estacionales son consideradas. Los niveles más altos son detectados durante el invierno (lluvias) y en primavera (inundación de campos de arroz). Las comparaciones temporales en los niveles de inundación muestran que hay una tendencia decreciente con los años (62% en 2000; 59% en 2007; y 56% en 2012).

**Palabras clave:** humedales, inundación, indicador, árbol de decisión, transformación Tasseled Cap

### *Development of an indicator to monitor flooding levels in Mediterranean wetlands*

**Abstract:** Wetlands are sensitive ecosystems that are increasingly subjected to anthropogenic threats. In recent decades, coastal Mediterranean wetlands have suffered considerable pressure from urban growth and the intensification of agricultural. Remote sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) techniques are efficient tools that can support large-scale and prolonged monitoring of Mediterranean coastal wetlands.

We used these techniques to develop a wetland flooding indicator to support the monitoring of coastal wetlands in Southern France. The indicator is based on multi-temporal Landsat images, covering the years 2000, 2007 and 2012, and land use reference layers to monitor the development of annual flooding levels. The approach combines image classification techniques: namely vegetation indices and decision tree analysis to identify the water surface covered in wetland areas at different dates in a yearly cycle. A validation process is then implemented to check the reliability of the indicator compared to existing wetland inventories.

Results indicate that the study area shows a high degree of flooding throughout the year. During the study period, 40% of the area shows to be permanently flooded, increasing to between 56-62% whenever seasonal flooding is considered. Highest flooding levels are detected during winter (rainfall) and spring (flooding of rice fields). The temporal comparisons on flooding levels shows a slight decreasing tendency (62% in 2000; 59% in 2007; and 56% in 2012).

**Keywords:** wetlands, flooding, indicator, decision tree, Tasseled Cap transformation

### 1. INTRODUCCIÓN

La cartografía de recursos y la elaboración de inventarios son clave para identificar la ubicación, la productividad biológica y los posibles usos múltiples de los humedales (Taylor *et al.*, 1995). Los métodos tradicionales para inventariar los recursos a escala regional o nacional son caros y lentos (Rebelo *et al.*, 2009), y presentan limitaciones espaciales y temporales (Finlayson *et al.*, 1999) (Lehner y Doll, 2004). La convención Ramsar destaca la importancia de llenar los vacíos en los

inventarios y subraya el uso la teledetección y SIG (Davidson y Finlayson, 2007).

Para grandes escalas, estas técnicas se utilizan como herramientas rentables para mejorar el conocimiento sobre los tipos y condiciones de los humedales (Davidson y Finlayson, 2007; Ramsey, 1998) en el contexto de la normalización de los mecanismos de monitoreo, y para la gestión de grandes extensiones en el contexto de la Convención Ramsar (Mackay *et al.*, 2009).

La información espacial de precisión ha demostrado evaluar eficientemente los humedales naturales y

antropogénicos (Xie *et al.*, 2010), y las series de imágenes temporales, ser eficaces en el análisis de la dinámica de los humedales (Toyra y Pietroniro, 2005); por lo que las técnicas de teledetección son herramientas válidas para ser utilizadas por administradores e investigadores para el análisis de cambios.

Esta investigación apoya el programa RhoMeo (*Rhone Mediterranean Observatory*) en el desarrollo y ensayo de métodos para mejorar el análisis de los humedales mediante técnicas de teledetección. El objetivo de este estudio es desarrollar un indicador para detectar el grado de inundación de los humedales del Mediterráneo a nivel local basado en técnicas de teledetección y SIG.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

El marco espacial del estudio es la provincia Bouches-du-Rhône, conocida también como Departamento 13 (Dep.13), en la región Provenza-Alpes-Costa Azul (PACA), en el sureste de Francia.

La región PACA tiene una superficie de unos 3 millones de hectáreas, de las cuales alrededor de 156.000 están inventariados como humedales. Alrededor del 67% de esta superficie, 104.717 ha, se encuentran en el Dep.13, el cual está dominado por grandes zonas de humedales (un 19% de su superficie). Dentro de esta provincia se encuentra el Parque Natural Regional de la Camarga (PNRC), una zona de humedales de gran importancia internacional (reconocida por Ramsar).

Los campos de arroz en la región PACA se limitan al área del Dep.13 y tiene una importante presencia en el PNRC. En total cubren una superficie que oscila entre los 10.000 - 15.000 ha, dependiendo del año de estudio. Se incluyen en la categoría "humedales", siguiendo la definición de Ramsar utilizada a lo largo de este estudio. El tamaño de los humedales y masas de agua es muy variable. Los humedales son diversos, especialmente en el área del PNRC, donde hay una mezcla de humedales naturales y semi-naturales: lagunas de agua salobre, pantanos, salinas, etc.

## 3. MATERIAL Y MÉTODOS

### 3.1. Datos e información espacial

#### Imágenes de satélite

Las imágenes utilizadas en este estudio provienen de la serie de satélites Landsat (NASA, USGS), debido a que tiene la serie temporal más larga de observaciones de la Tierra desde el espacio (Ju y Roy, 2008) y posee un archivo de datos históricos de acceso libre para fines de investigación. Las imágenes utilizadas fueron captadas por el satélite Landsat 7 ETM+, con una resolución de 30 metros, y cubren los años 2001, 2007 y 2012. Estos años fueron seleccionados por dos motivos: 1) tenían imágenes libres de nubes, 2) sus fechas son comparables a las fechas de referencia de los mapas de uso de suelo del PNRC (2001, 2006, 2011). Además, el período entre los años seleccionados es válido para detectar cambios significativos en las inundaciones a lo largo del tiempo. Cinco imágenes fueron seleccionadas para el área de

estudio, cubriendo diferentes meses de los tres años. Se ha tratado de recoger imágenes en fechas similares, con especial atención al ciclo hidrológico y la estacionalidad de los humedales de la región PACA, con el fin de cubrir todas las estaciones del año y las diferentes etapas de inundación de los humedales de la región.

La transformación Tasseled Cap (TC) (Kauth y Thomas, 1976) se aplicó a las imágenes Landsat. La TC transforma las bandas del satélite Landsat en seis componentes principales: los tres primeros representan información importante de la imagen, mientras que los otros proporcionan información residual. Las variables de TC utilizadas en este estudio fueron el Verdor (Greenness, G) y la Humedad (Wetness, W), índices utilizados para separar las zonas de humedales y masas de agua del resto de las áreas. Estas variables tienen valores entre -1, como mínimo, y 1, como máximo. G está correlacionado con el vigor de la vegetación y W relacionada a la humedad de la vegetación y suelo.

#### Datos de referencia

Se han utilizado dos referencias de la superficie en este estudio: los inventarios de humedales de la región PACA y los mapas de usos del suelo del PNRC.

El inventario de humedales muestra la superficie cubierta por las masas de agua y los humedales de la zona de estudio. Estos inventarios han sido validados a través de estudios de campo. En cuanto a las capas de usos del suelo, se han utilizado para analizar el área del PNRC debido a que aportan información sobre la cobertura de campos de arroz, cosa que incluyen los inventarios de este departamento. La capa de usos del suelo contiene información precisa y detallada sobre los usos de la tierra en el PNRC: tipos de agricultura, masas de agua, bosques, zonas urbanas, etc.

### 3.2. Descripción del indicador

El indicador de humedales tiene como objetivo analizar el nivel de inundación de los humedales, que según el estudio se define como el grado de agua contenida dentro de los humedales inventariados.

Un árbol de decisión, basado en la TC, se utilizó para cada imagen de satélite. El índice de Verdor (G) y de Humedad (W) se emplean para distinguir entre las zonas de agua ( $G < 0; W > 0$ ), y las zonas sin agua ( $G > 0; W < 0$ ). A fin de evitar clasificaciones erróneas, hay que establecer diferentes umbrales de G y W basándose en los datos de cada imagen de satélite, ya que el agua puede presentar diferentes respuestas espectrales según la época del año (profundidad del agua, partículas en suspensión, etc.). Las áreas identificadas como masas de agua por esta metodología constituyen las zonas inundadas del indicador.

La superficie detectada en cada fecha estudiada se contrastó con las capas de referencia (los inventarios y las capas de usos del suelo) para calcular el grado de inundación de los humedales: área y porcentaje de inundación.

El grado anual de inundación se calculó de tres formas diferentes con el fin de maximizar la información obtenida:

- **Media:** el valor promedio de área inundada durante los meses analizados en un año.
- **Máximo:** el valor máximo inundación en ese año.
- **Total anual:** la superficie total que se ha inundado en el año, que es la unión de todas las capas del indicador, es decir, las 5 imágenes mensuales.

Con el fin de estudiar la variabilidad estacional de la inundación dentro de un año, las superficies de agua mensuales detectadas para cada año estudiado se unieron en una sola capa mediante una suma. Se asigna el valor 1 a los píxeles del indicador de inundación, de manera que la suma de todas las capas oscila entre un valor mínimo de 0, que corresponde a las áreas que nunca se inundan, y un valor máximo de 5, que sería el caso de áreas que están inundadas de forma permanente durante todo el año según este enfoque.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los resultados mensuales del indicador expresados como superficie (hectáreas) y grado de inundación (porcentaje inundado). Los humedales en el Dep.13 presentan un alto grado de inundación a lo largo del año. El porcentaje de inundación mensual está entre el 46% y el 58% durante el periodo de estudio, siendo el promedio alrededor del 50%. Como era de esperar, los niveles de inundación parecen estar influenciados por la estacionalidad del Mediterráneo. Estos llegan a su máximo durante el invierno, probablemente influenciado por la lluvia, y la primavera, cuando se produce la inundación de los campos de arroz en la región PACA. Porcentajes más altos de inundación se dan en mayo de 2001 (57,77%), diciembre de 2007 (51,48%) y enero de 2012 (51,51%).

**Tabla 1.** Resultados del indicador de inundación expresados como superficie (ha) y porcentaje inundado.

| Año  | Mes        | Area (ha) | %     |
|------|------------|-----------|-------|
| 2001 | Enero      | 52.022    | 49,68 |
|      | Marzo      | 52.059    | 49,71 |
|      | Mayo       | 60.493    | 57,77 |
|      | Julio      | 51.314    | 49,00 |
|      | Octubre    | 50.504    | 48,23 |
| 2007 | Enero      | 53.789    | 51,37 |
|      | Marzo      | 52.002    | 49,66 |
|      | Abril      | 53.339    | 50,94 |
|      | Septiembre | 49.147    | 46,93 |
|      | Diciembre  | 53.910    | 51,48 |
| 2012 | Enero      | 53.939    | 51,51 |
|      | Marzo      | 50.104    | 47,85 |
|      | Junio      | 51.870    | 49,53 |
|      | Julio      | 49.186    | 46,97 |
|      | Septiembre | 48.130    | 45,96 |

Los resultados anuales del indicador (tabla 2) muestran que el agua cubre al menos el 50% de la superficie inventariada durante el período estudiado. El valor máximo de las inundaciones es notable en el caso de 2001, siendo significativamente más alto que los otros

años (58% frente a 51,5%). Cuando se considera las inundaciones estacionales (Total anual), el grado de inundación de los humedales aumenta, cubriendo alrededor del 56 al 62% de la superficie inventariada.

**Tabla 2.** Grado anual de inundación de expresados.

| Año  | Mes         | Area (ha) | %     |
|------|-------------|-----------|-------|
| 2001 | Media       | 53.278    | 50,88 |
|      | Máximo      | 60.493    | 57,77 |
|      | Total anual | 65.377    | 62,43 |
| 2007 | Media       | 52.437    | 50,08 |
|      | Máximo      | 53.910    | 51,48 |
|      | Total anual | 61.449    | 58,68 |
| 2012 | Media       | 50.646    | 48,36 |
|      | Máximo      | 53.939    | 51,51 |
|      | Total anual | 58.630    | 55,99 |

De las tres formas de calcular el indicador anual, el valor medio tiene la menor variabilidad en el tiempo. Por el contrario, el total anual tiene las mayores variaciones. Al comparar los valores en el periodo de estudio, se observa una tendencia a la baja, sobre todo en el caso del total anual. Los niveles de inundación son un 6,44% menor entre 2001 y 2012.

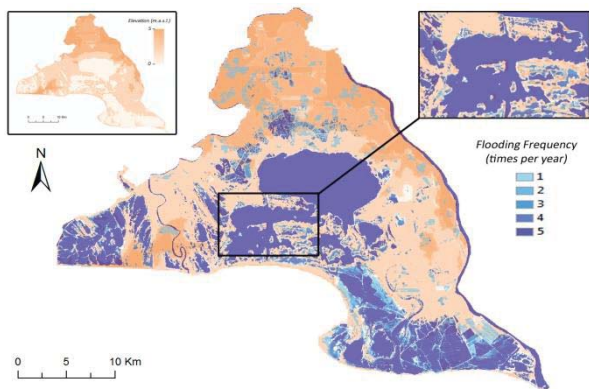
En cuanto a la frecuencia (tabla 3), los resultados muestran que la mayor parte de la superficie corresponde a áreas que siempre están inundadas, las cuales representan sobre el 40% de los humedales inventariados en el Dep.13. Los resultados muestran que menos del 10% de los humedales se inundan sólo una vez al año. La frecuencia de inundación también muestra una tendencia a la baja. Las zonas inundadas permanentemente muestran un descenso del 2,67% entre 2001 y 2012. En el caso de las zonas de baja frecuencia, la disminución es similar (2,34%).

**Tabla 3.** Análisis de frecuencia de inundación.

| Año  | Frecuencia | Area (ha) | %     |
|------|------------|-----------|-------|
| 2001 | 1          | 9.632     | 9,2   |
|      | 2          | 3.639     | 3,47  |
|      | 3          | 3.481     | 3,32  |
|      | 4          | 4.086     | 3,9   |
|      | 5          | 44.539    | 42,53 |
| 2007 | 1          | 6.549     | 6,25  |
|      | 2          | 3.011     | 2,88  |
|      | 3          | 2.770     | 2,65  |
|      | 4          | 4.286     | 4,09  |
|      | 5          | 44.832    | 42,81 |
| 2012 | 1          | 7.182     | 6,86  |
|      | 2          | 3.622     | 3,46  |
|      | 3          | 2.541     | 2,43  |
|      | 4          | 3.547     | 3,39  |
|      | 5          | 41.737    | 39,86 |

La figura 1 muestra un ejemplo del mapa de frecuencia de inundación del PNRC en el año 2007, junto al modelo digital del terreno producido por el Instituto Nacional de Geografía de Francia. Se observa que los humedales se localizan principalmente en zonas de poca altitud, donde las inundaciones son mucho más frecuentes. También se aprecia que las áreas cercanas y conectadas a la costa son regiones más inundadas (debido a las contribuciones de las mareas).





**Figura 1.** Ejemplo de mapa de frecuencia de inundación.

## 5. CONCLUSIONES

Esta investigación proporciona una visión general de los beneficios de un indicador espacial utilizando imágenes de satélite y técnicas de teledetección para identificar, inventariar y monitorear áreas de inundación de los humedales. Las imágenes Landsat de 30 m resultan eficientes para identificar las inundaciones y el cálculo de la superficie total ocupada por el agua. El uso de imágenes de mayor calidad podría mejorar la precisión de los resultados en la zona de estudio.

El enfoque funciona bien para los humedales permanentes en áreas planas, pero no tanto en las zonas con una topografía compleja o con pequeños humedales. A pesar de esto, a escala regional, tanto la superficie del agua detectada como la distribución espacial de los humedales se corresponden en gran medida con los inventarios existentes. Por lo tanto, los resultados generales parecen apropiados para estimar el grado de inundación de los humedales a escala regional. Sin embargo, a efectos de control, es decir, para detectar e interpretar los cambios en los humedales a lo largo del tiempo, se necesitan mejoras metodológicas. Por su construcción, este indicador necesita muchas imágenes de buena calidad para analizar un año completo con resultados confiables. Esto podría ser una limitación importante cuando se utiliza la misma metodología en otros ámbitos, como la parte montañosa de la región PACA, que presenta dificultades debido a la topografía y a la meteorología por la aparición de sombras, nubes y nieve. Esto dificulta el análisis de las imágenes, ya que genera confusiones en el proceso de clasificación (Giles, 2001). Las limitaciones en la distribución temporal de las imágenes de satélite también harían difícil calcular el indicador periódicamente en este tipo de áreas.

La aplicación de teledetección por radar para los departamentos del norte podría resolver algunas de estas limitaciones. Las imágenes de radar permiten detectar la humedad del suelo, el agua y la nieve sin perturbación de nubes u otros agentes meteorológicos (Inggs y Lord, 2001). Futuros análisis podrían realizarse incluyendo datos climáticos como la precipitación. Sería posible buscar tendencias relacionadas con estas variables climáticas, el grado de inundación y el tipo de humedal para mejorar los resultados y su interpretación.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Davidson, N.C., Finlayson, C.M. 2007. *Earth Observation for wetland inventory, assessment and monitoring*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 17: 219-228.
- Finlayson, C.M., Davidson, N.C., Spiers, A.G., Stevenson, N.J. 1999. *Global wetland inventory – status and future priorities*. Marine and fresh water research 5: 717-727.
- Giles, P.T. 2001. *Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain*. Photogrammetric engineering and remote sensing, July: 833-839.
- Inggs, M.R., Lord, R.T. 2001. *Applications of Satellite Imaging Radar*. Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, South Africa.
- Ju, J., Roy, D.P. 2008. *The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally*. Remote Sensing of Environment Vol. 112(3): 1196-1211.
- Kauth, R.J., Thomas, G.S. 1976. *The tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT*. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Purdue University of West Lafayette, Indiana. pp. 4B41-4B51.
- Lehner, B., Doll, P. 2004. *Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands*. Journal of Hydrology 296: 1-22.
- MacKay, H., Finlayson, C.M., Fernández-Prieto, D., Davidson, N., Pritchard, D., Rebelo, L.M. 2009. *The role of Earth Observation (EO) technologies in supporting implementation of the Ramsar Convention on Wetlands*. Journal of environmental management 90: 2234-42.
- Ramsey, E.W. 1998. *Radar remote sensing of wetlands*. In: Lunetta RS, Elvidge CD editors. Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications. Ann Arbor Press, Michigan, US. pp 211-243.
- Rebelo, L.-M., Finlayson, C. M., and Nagabhatla, N. 2009. *Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis*. Journal of environmental management, 90, pp. 2144–53
- Taylor, A.R.D., Howard, G.W., Begg, G.W. 1995. *Developing wetland inventories in Southern Africa: A review*. Vegetatio 118: 57-79.
- Toyra, J., Pietroniro, A. 2005. *Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques*. Remote Sensing of Environment 97: 174-191.
- Xie, Z., Xu, X., Yan, L. 2010. *Analyzing qualitative and quantitative changes in coastal wetland associated to the effects of natural and anthropogenic factors in a part of Tianjin, China*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 86: 379-386.