

CARTOGRAFÍA DE LA SUPERFICIE INVADIDA POR *Azolla filiculoides* EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT

D. Aragón (*), R. Fernández-Zamudio (*), J. Bustamante (*), P. García-Murillo (**), R. Díaz-Delgado (*) y S. Cirujano (***)�

(*) Laboratorio de SIG y Teledetección (LAST-EBD), Estación Biológica de Doñana, CSIC.
Avda. Américo Vespucio s/n 41092 Sevilla, Spain. daragones@ebd.csic.es

(**) Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Farmacia. Universidad de Sevilla.
Apdo. 874. 41080 Sevilla, Spain.

(***) Real Jardín Botánico, CSIC. Plaza de Murillo 2. 28014 Madrid, Spain.

RESUMEN

Azolla filiculoides es un helecho acuático invasor, que fue detectado por primera vez en la marisma Doñana en el año 2000. Aparece como cubierta dominante o por debajo de helófitos. En las zonas invadidas termina cubriendo totalmente la lámina de agua, modificando las características reflectivas de la superficie. La biología de esta especie (escaso tamaño y hábito flotante) junto con las características propias de la marisma (gran extensión y dificultad de acceso) no facilitan el seguimiento tradicional de la invasión ofreciéndose la teledetección como una herramienta eficaz para su seguimiento. En la primavera de 2007, *Azolla* experimentó una explosión demográfica desconocida hasta el momento. Para este periodo se poseen 4 imágenes Landsat entre marzo y junio y datos de campo próximos a tres de las fechas. El objetivo de este trabajo es estimar la superficie invadida por *Azolla* con un alto porcentaje de recubrimiento (“densa”) mediante clasificación de imágenes Landsat en la marisma del Parque Nacional de Doñana, tanto en el momento de máxima actividad fotosintética y en presencia de agua, como cuando la marisma se seca y *Azolla* muere. Se estima que la superficie invadida por *Azolla* “densa” en el año 2007 para la zona sur de la marisma del Parque Nacional de Doñana fue de 669 ha.

ABSTRACT

Azolla filiculoides is an invasive aquatic fern that was first detected in the Doñana marshes in the year 2000. It appears either as dominant cover or below helophytes. Invaded areas completely covered by *Azolla* change dramatically their reflective characteristics. Both the biology of this species (floating habit and small size) and the marshland characteristics (large size and difficulty of access) prevent the traditional monitoring of the invasion process. Remote sensing appears as an effective tool for monitoring. In the spring of 2007, *Azolla* experienced a population bloom unknown so far. For this period, we acquired 4 Landsat images from March to June and ground-truth data for three of the dates. The aim of this study is to estimate the area occupied by high cover *Azolla* patches through Landsat images classification of Doñana National Park marshes; at maximum photosynthetic activity peak in flooded areas or for dried marshland when *Azolla* dies. It is estimated that the area invaded by high cover *Azolla* in 2007 in the southern area of the Doñana National Park marshes was around 669 ha.

Palabras clave: teledetección, Landsat TM y ETM+, *Azolla*, marisma, Doñana, especie invasora.

INTRODUCCIÓN

Azolla filiculoides Lam. es un pteridófito flotante originario de ecosistemas acuáticos americanos pero ampliamente distribuido por regiones tropicales, subtropicales y templadas de todo el mundo (Sculthorpe, 1967).

Las marismas de Doñana constituyen un humedal costero de importancia internacional, reserva de la Biosfera según la UNESCO, Zona Ramsar y zona especial de protección de las aves (ZEPA). Es una marisma de agua dulce que se inunda con las precipitaciones invernales y se seca totalmente en verano. Su dinámica de inundación, intra e interanual, representa un factor determinante

del estado de las comunidades vegetales, que dependen del patrón de precipitaciones y de la gestión humana de este espacio (Clemente, 2004).

La primera noticia de la presencia de *Azolla* en la marisma de Doñana data del año 2000. Al año siguiente, los técnicos del Parque Nacional detectaron su presencia en diversos puntos de la marisma (García-Murillo et al., 2004b; Fernández-Zamudio et al., 2006), donde no se conocía la existencia de ningún otro macrófito acuático invasor (García-Murillo et al., 2006). *Azolla* aparece en Doñana como cubierta dominante o por debajo de helófitos (usualmente castañuela o almajo), donde con frecuencia forma densos tapetes de más de 10 cm de espesor. En las zonas invadidas termina

cubriendo totalmente la lámina de agua, modificando las características reflectivas de la superficie (Figura 1).

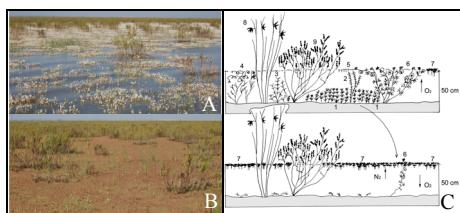


Figura 1.-Vegetación acuática del lucio del Rey en Abril (A) y mayo (B) de 2007. Esquema de la evolución de la vegetación acuática (C). 1, Praderas de *Chara galiooides*; 2, *Callitrichia truncata*; 3, *Zannichellia obtusifolia*; 4, *Ruppia drepansis*; 5, *Lemna minor*; 6, *Ranunculus peltatus* subsp. *fucoides*; 7, *Azolla filiculoides*; 8, *Scirpus maritimus*; 9, *Arthrocnemum macrostachyum*. Extraido de Cirujano et al (2008).

Azolla comienza a desarrollarse en el mes de enero, y aumenta la producción de su biomasa hasta alcanzar máximos en los meses de mayo y junio, dependiendo de la permanencia del agua (Cirujano & al., 2008). Según este autor, *Azolla* comienza a comportarse como invasor a concentraciones de 0,69-0,99 mg P/l, produciéndose la extinción del 90% y del 100% respectivamente de la vegetación sumergida de Doñana (Figura 1). Aunque la legislación vigente permite un valor máximo para las aguas que vierten las depuradoras de 2 mg P/l, dicho valor es claramente perjudicial para la marisma ya que supera con mucho el límite que dispara el crecimiento invasivo de *Azolla*. Esto supone una amenaza para la alta diversidad de la comunidad vegetal acuática que habita en este espacio protegido (García Murillo et al, 2006) así como para la integridad de todo el ecosistema.

La biología de esta especie (escaso tamaño y hábito flotante) junto con las características propias de la marisma (gran extensión y dificultad de acceso) no facilitan el seguimiento tradicional de la invasión, ofreciéndose la teledetección como una herramienta eficaz para su seguimiento.

El objetivo de este artículo es estimar la superficie invadida por *Azolla* con un alto porcentaje de recubrimiento (“densa”) a partir de la clasificación de imágenes Landsat en la marisma del Parque Nacional de Doñana, tanto en el momento de máxima actividad fotosintética y en presencia de agua, como cuando la marisma se seca y *Azolla* muere.

MATERIAL Y MÉTODOS

En la primavera del año 2007, la marisma alcanzo una superficie máxima inundada de 23648 ha y *Azolla* experimentó una explosión demográfica desconocida hasta el momento en Doñana que coincidió con una descarga de las aguas que salen de la depuradora de El Rocío que superaron el límite de los 2 mg P/l, (10.26 mg P/l) como ocurrió el 16.04.2007 (Cirujano et al., 2008).

El Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD) adquirió 3 imágenes Landsat TM y 1 ETM+ de la primavera del 2007 (18 de marzo, 5 de mayo, 29 de mayo y 22 de junio).

Los días 18 de marzo y 23 de junio se realizaron transectos a pie para la toma de datos de verdad terreno en campo. El LAST-EBD junto con el Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de Doñana organizaron una prospección a caballo el 11 de mayo de 2007 para tomar puntos de verdad terreno con GPS en algunas de las manchas identificadas en la imagen del 5 de mayo, reconociendo las distintas comunidades de vegetación e indicando si había presencia de *Azolla* y si estas eran manchas dispersas o densas cubriendo totalmente el suelo o el agua.

Las imágenes fueron corregidas geométrica, radiométricamente y normalizadas, según el tratamiento descrito por Aragón et al. (2004). Tras realizar diversas pruebas no satisfactorias de clasificación supervisada y no supervisada para cada una de las fechas, se optó por realizar una clasificación no supervisada (isodata) multitemporal incluyendo todas las bandas de las cuatro fechas, salvo la banda térmica. Este procedimiento se realizó solo en el área de estudio, zona sur de la marisma, donde la guardería del Parque Nacional y el Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la EBD detectaron *Azolla* de forma predominante, (Figura 2).

Se propusieron 20 categorías para la clasificación isodata, de todas ellas se seleccionaron solo aquellas identificables con localizaciones conocidas de *Azolla* tanto viva como seca en la imagen. Las categorías seleccionadas se cruzaron con los datos de verdad terreno de *Azolla* de las tres fechas de campo obteniéndose la matriz de confusión de la clasificación. Asimismo, los datos de verdad terreno se cruzaron con la cartografía de *Azolla* generada por Cirujano et al (2008) para el año 2007 mediante delineación cartográfica sobre el terreno.

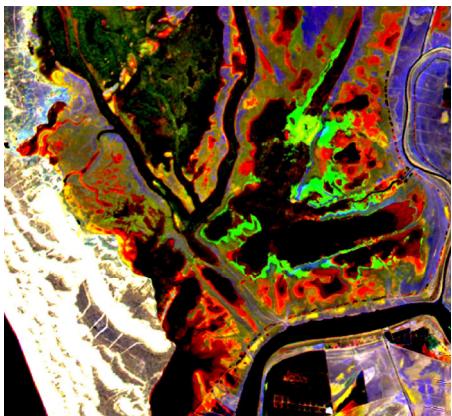


Figura 2.- Recorte de la imagen multitemporal para el área de estudio composición Rojo banda 4 del 18/03, Verde banda 4 del 29/05 y Azul banda 4 del 22/06. Se identifican en color verde las zonas con *Azolla*.

RESULTADOS

La figura 3 muestra los cambios en la superficie cubierta por *Azolla* durante la primavera del 2007. En la imagen del día 18 de marzo (A) solo se detecta incipientemente las primeras zonas con *Azolla* densa. En la imagen del día 5 de mayo (B) se aprecian grandes zonas con alta actividad fotosintética (mayor reflectividad en la banda del infrarrojo cercano) y se detectan las primeras zonas con *Azolla* seca. En la imagen del día 29 de mayo (C) las manchas de *Azolla* viva se encuentran en zonas más bajas donde todavía queda agua, estando seca en las zonas más altas. En la imagen del día 22 de junio (D) se observa mayoritariamente *Azolla* seca (descenso del 50 % de la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano) quedando solo manchas de *Azolla* viva en las zonas mas profundas que todavía mantienen agua.

La superficie de *Azolla* “densa” estimada mediante la clasificación multitemporal no supervisada en el año 2007 en el sur de la marisma del Parque Nacional de Doñana es de 669 ha (Figura 4), con un porcentaje de acierto global de 80,35 % y coeficiente Kappa de 0,605 I.C. 95% (0.556 – 0.654) (Tabla 1), mientras que el porcentaje de acierto global para la cartografía de Cirujano et al (2008) fue de 64,71 % y coeficiente Kappa de 0.32 I. C. 95% (0.268 – 0.380) (Tabla 2).

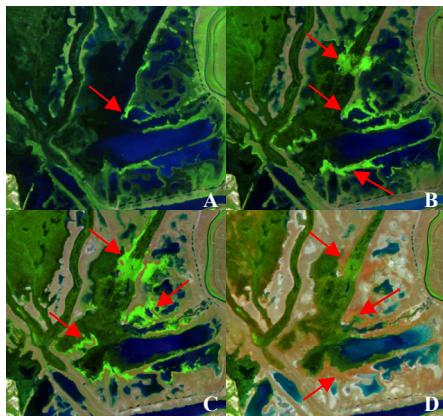


Figura 3.- Recorte del área de estudio de imágenes Landsat para las fechas A) 18/03/2007 B) 05/05/2007 C) 29/05/2007 y D) 22/06/2007 composición RGB bandas 543. Las flechas rojas indican las zonas con *Azolla* (viva en color verde intenso y seca en color marrón anaranjado).

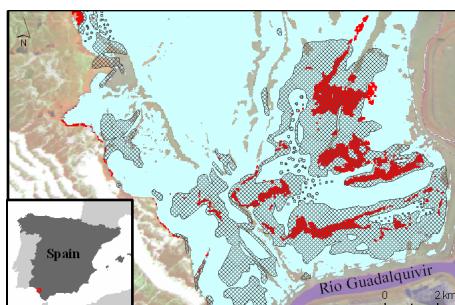


Figura 4.- Superficie clasificada como *Azolla* “densa” (rojo), superficie delineada por Cirujano et al (2008) (trama gris) y superficie inundada (celeste) en la primavera de 2007 en el área de estudio.

Tabla 1.- Matriz de confusión de la superficie clasificada como *Azolla* “densa” calculada con los datos de verdad terreno de las tres fechas de campo.

		Azolla Observada		
Acierto global	822	Si	No	Total
Azolla	Si	372	118	490
Predicha	No	83	450	533
Total	455	568	1023	
		% Acierto Global (P0)	0.8035	
		Kappa	0.6052	

Tabla 2.- Matriz de confusión de la superficie cartografiada como *Azolla* para el 2007 según Cirujano et al (2008) calculada con los datos de verdad terreno de las tres fechas de campo.

		<i>Azolla</i> Observada		
Acierto global	662	Si	No	Total
<i>Azolla</i>	Si	404	311	715
	No	50	258	308
Total	454	569	1023	
% Acierto Global (P0)		0.6471		
Kappa		0.3244		

DISCUSIÓN

El trabajo presentado constituye un análisis preliminar que demuestra la utilidad de las imágenes de los sensores Landsat TM y ETM+ para discriminar grandes extensiones de *Azolla* “densa” en la marisma de Doñana. La clasificación no supervisada de una imagen multitemporal puede ser un paso inicial de una clasificación mixta, en donde a partir de las firmas espectrales y con las agrupaciones de clusters se obtengan unos mejores resultados.

La estima de superficie utilizando una única escena, la imagen del 5 de mayo, mediante clasificación supervisada fue de 380 has. Algunas zonas cubiertas por este helecho invasor a principios de la primavera fueron progresivamente desapareciendo mientras que otras fueron invadidas. Este aspecto pone de manifiesto la importancia de abordar la cartografía de la superficie mediante análisis multitemporal.

La cartografía generada por Cirujano et al (2008), obtienen una superficie máxima de 4363 ha, realizadas sobre el terreno, mediante delineación cartográfica, independientemente del porcentaje de recubrimiento de las manchas de *Azolla*. Los resultados obtenidos mediante clasificación digital de las imágenes Landsat permiten discriminar manchas densas de *Azolla* de un tamaño mínimo de un píxel Landsat TM o ETM+ (900 m^2). Los datos de acierto global y el coeficiente kappa calculados para esta cartografía son peores que para la clasificación no supervisada multitemporal.

BIBLIOGRAFIA

Aragonés, D., Díaz-Delgado, R. and Bustamante, J. 2005. Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana. XI

Congreso Nacional de Teledetección, Tenerife 407-410.

Cirujano S. (Coord). 2008. Estudio y control del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* en los humedales del Parque Nacional de Doñana. *Informe técnico inédito*. 201 pp.

Clemente, L., Venturao-Garcia, L., Espinar, J.L., Cara, J.S. and Moreno, A. 2004. Las marismas del Parque Nacional de Doñana. *Investigación y ciencia*, Mayo.

Fernández Zamudio, R., Cirujano, S., Espinar, J.M., Rubio, A., López Bravo, M.J., Lobo, M.D. and García Murillo, P. 2006. Datos preliminares sobre la biología y ecología de *Azolla filiculoides* en el Parque Nacional de Doñana. *II Congreso nacional sobre Especies Exóticas Invasoras*. León, España.

García Murillo, P., cobo, M.D., Sánchez Gullón, E. and Garrido, H. 2004. Una planta acuática americana invade Doñana. *Quercus* 218: 46-47.

García Murillo, P., Fernández Zamudio, R., Cirujano, S. and Sousa A. 2006. Aquatic macrophytes in Doñana protected area (SW spain): an Overview. *Limnetica* 25 (1-2): 71-80.

Sculthorpe, C. D. 1967. Biology of aquatic vascular plants. *E. Arnold*. London. 610 pp.

AGRADECIMIENTOS

El Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana y la guardería del Parque Nacional de Doñana, prestaron su ayuda en el trabajo de campo. Los proyectos de investigación “Reconstrucción histórica de la dinámica de inundación de las marismas de Doñana mediante teledetección” Ref: CGL2006_02247 financiado por el MEC, el proyecto “Applicability of hyperspectral sensors to map the spread of invading plant species”, financiado por la Unión Europea dentro de la red EUFAR-Net, y el proyecto “Estudio y control del helecho acuático invasor *Azolla filiculoides* en los humedales del Parque Nacional de Doñana” financiado por el OAPN, han permitido realizar los trabajos encaminados a mejorar el conocimiento de *Azolla* en Doñana.