

La utilización de imágenes Landsat-5 TM para la estimación y seguimiento de áreas de monocultivo arrocero y su vinculación a espacios naturales

M^a J. Prados.

Dpto. Geografía Humana. Universidad de Sevilla. 41004 Sevilla

RESUMEN

El empleo combinado de índices de vegetación y métodos de clasificación supervisada son dos métodos plenamente validados en el análisis y estimación de las superficies cultivadas. En este artículo se utilizan ambos métodos para la observación y el análisis de un área de monocultivo arrocero próxima al Parque de Doñana en dos campañas agrícolas diferentes, y en las que las condiciones hídricas fueron determinantes en relación a la extensión finalmente alcanzada por la superficie cultivada de arroz en regadío. Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de la metodología empleada y su interés de cara al seguimiento de áreas cultivadas próximas a espacios naturales.

PALABRAS CLAVE: Índices de vegetación, Landsat-5 TM, arrozal, espacios naturales.

ABSTRACT

Vegetation index and supervised classification of satellite images are the most usefull methods used in remote sensing for agricultural analysis. This paper combines both in order to detect and analized a plantation of rice close to natural reserve of Doñana, in two different years and different hydrologycal situations too. The study area is located at the south of Spain, where the irrigation water availability is necessary for the growth of rice and consequently was determined over the cultivated area.

KEY WORDS: Vegetation index, Landsat-5 TM, rice fields, natural reserves.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y las aplicaciones de las imágenes captadas por los satélites de observación terrestre ha estado ligada a la discriminación y estimación de superficies cultivadas. De hecho, los primeros proyectos puestos en marcha por la N.A.S.A. iban dirigidos a evaluar las posibilidades de los primeros satélites de observación terrestre para el análisis de grandes regiones cerealísticas en América, U.R.S.S. y Asia Meridional (Prados, 1995). En los inicios de la carrera espacial y en plena Guerra Fría, hay que reconocer que estos trabajos exploratorios iban dirigidos al control de áreas productoras en los países del Bloque Socialista, y que dejaron a un lado la evaluación de otros cultivos también importantes en extensión y rendimientos a nivel mundial.

Este parece haber sido el caso del arroz, que pese a su condición de cultivo fundamental para la alimentación

humana no estaba incluido dentro de estos primeros proyectos y aunque la metodología establecida podía ser igualmente válida. De hecho, los trabajos sobre estimación de superficies y rendimientos del arroz emplean imágenes captadas desde los Landsat, y combinan el análisis multispectral de imágenes Thematic Mapper mediante diversos índices de vegetación y ensayos de clasificación supervisada (véanse los trabajos citados, por ejemplo, en el artículo de Tennakoon y otros, (1992). Estos trabajos han tenido como escenario grandes áreas arroceras del sudeste asiático donde la metodología podía ofrecer resultados contrastados desde el punto de vista metodológico y socioeconómico, siendo puntuales las referencias a investigaciones referidas a otras zonas productoras europeas también muy importantes aunque de menor extensión (Gandía S. y otros, 1986; Gilabert A. y Melia J. 1987).

En este artículo analiza un área de monocultivo arrocerero de más de 30.000 has. emplazada en las antiguas Marismas del Guadalquivir, donde a partir de la década de 1920 se ha llevado a cabo una ambiciosa transformación para el cultivo del arroz primero, y a partir de 1940 la desecación y puesta en riego de toda su margen izquierda y parte de la derecha para la creación de tres zonas regables al amparo de las leyes de colonización de la Dictadura. Para ello se han empleado una serie de imágenes Thematic Mapper pertenecientes a dos campañas agrícolas diferentes, y en combinación con la metodología descrita y el trabajo de campo se ha logrado la delimitación de las superficies realmente cultivadas de arroz en dos campañas agrícolas diferentes y que superan las áreas en principio dedicadas a este cultivo.

EL ARROZ Y LOS CONDICIONANTES DE SU EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA EN RIEGO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Según fuentes de la Consejería de Agricultura en 1991, último año húmedo en lo que va de década, la superficie cultivada de arroz en la provincia de Sevilla alcanzó las 34.500 has. (Consejería de Agricultura y Pesca, 1992). Esas superficies se concentran en la cuenca baja del Guadalquivir, sobre unos antiguos suelos de marisma que como se ha dicho desde la década de 1920 han experimentado una intensa transformación para su puesta en cultivo en regadío. El monocultivo del arroz juega un importante papel en la transformación agraria de estas tierras, en primer lugar por su carácter pionero y por la buena adaptación del cultivo del arroz a un medio natural poco propicio a otro tipo de orientaciones culturales y, en segundo lugar como consecuencia de lo anterior, estaría el que la dedicación en régimen de monocultivo constituye a las Marismas en el primer centro productor de nuestro país, y uno de los tres primeros de entre los de la Unión Europea (González, 1989).

La introducción y posterior expansión del cultivo en esta zona no ha estado exenta de problemas. Tal y como se aprecia en el gráfico número 1, las superficies cultivadas presentan una línea ascendente continuada, con descensos bruscos coincidentes con campañas agrícolas marcadas por déficits pluviométricos y asociadas a una reducción de los volúmenes de agua asignados para riego, como así

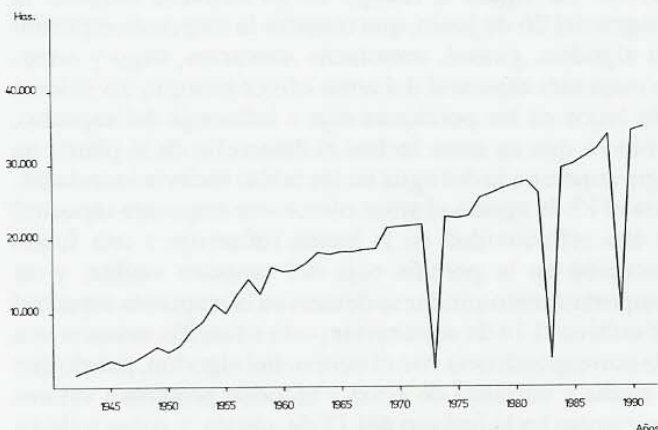
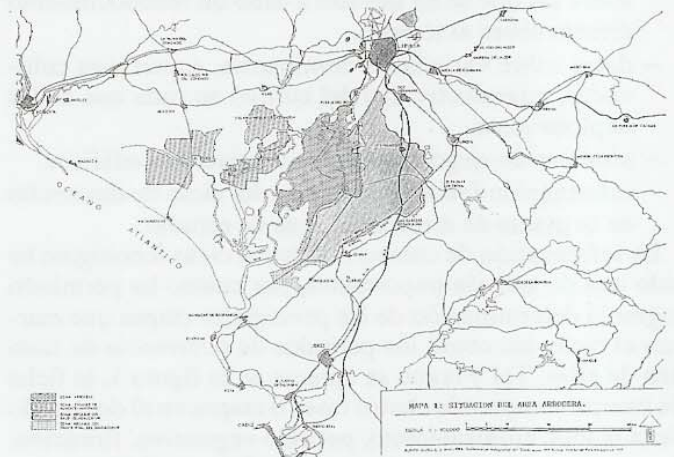


Gráfico 1: Evolución del cultivo de arroz en las marismas del Guadalquivir (has.)

ocurrió en las campañas de 1972, 1983 y 1989. La escasa capacidad de regulación que vienen padeciendo los embalses de la cuenca del Guadalquivir y los consiguientes problemas de disponibilidad de agua para riego convierten en situaciones críticas para el cultivo del arroz los años con escasez de precipitaciones.

Esta situación responde, en primer lugar, al hecho de que el arroz es un cultivo exigente en consumo de agua de riego, y en segundo lugar, a la necesidad de que el agua de riego no supere los límites de concentración salina tolerados por la planta. Ello ha llevado a la fuerte oposición de los actuales cultivadores a que se continúe autorizando la concesión de aguas para la puesta en riego de nuevas superficies de arroz, ante la imposibilidad demostrada por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir de asegurar los volúmenes de agua necesarios con las actuales condiciones de regulación con que cuenta la Cuenca (Rein Duffau y otros, 1984).

Ello no ha impedido, sin embargo, que el arroz se haya extendido en explotaciones cercanas al área autorizada inicialmente. La superficie cultivada de arroz y que cuenta con la pertinente concesión de aguas ocupa la Isla Mayor y parte de los sectores VI y IX de la zona regable del Bajo Guadalquivir (véase mapa 1). Además de estas áreas de monocultivo, en los últimos años el arroz está siendo introducido en explotaciones agrícolas de particulares emplazadas parcialmente en el Parque Natural del Entorno de Doñana. A los problemas asociados a la competencia en el uso del agua entre los propios cultivadores y entre los usos agrícolas y aquellos vinculados a las necesidades de estos espacios naturales, se suman los derivados de la proximidad del arrozal al sector oriental del Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural del Entorno.



Mapa 1: Situación del área arrocerera.

El sistema de desagüe del área de producción arrocerera y el de abastecimiento de aguas superficiales de los espacios ecológicos vecinos forman una unidad hidrológica, lo que hasta ahora ha tenido consecuencias muy negativas para la avifauna que habita el Parque Nacional de Doñana. A la competencia por el consumo de agua hay que unir, por tanto, la de la calidad de las aguas, fuertemente alteradas en su composición química y en su ciclo por los retornos y la infraestructura de defensa y riego (Comisión Internacional de Expertos, 1992). Esta situación es fuente de conflicto a tres bandas entre, por un lado, el Instituto

Andaluz de Reforma Agraria como organismo encargado de regular la actividad agraria en la zona; en segundo lugar la asignación de aguas para riego a estas explotaciones que realiza la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir; y en tercer lugar, el interés por la preservación de los espacios de borde y protección del Entorno.

IMÁGENES DISPONIBLES Y METODOLOGÍAS

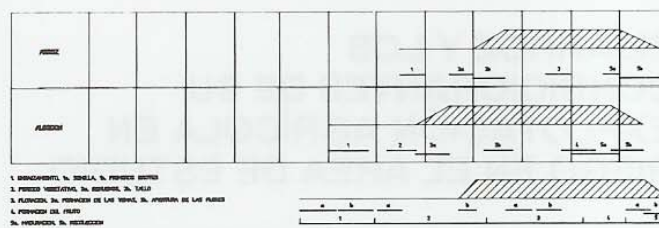
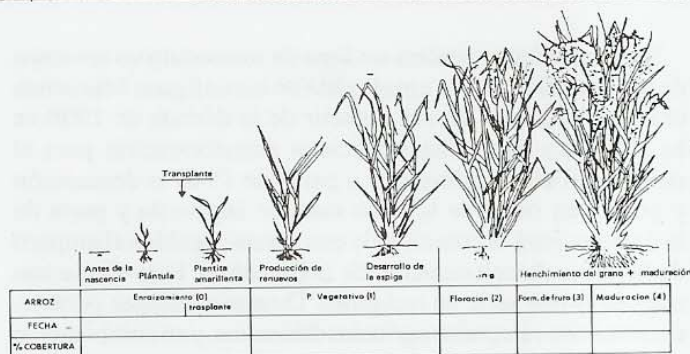
La metodología desarrollada en este trabajo ha ido dirigida a solventar algunos de los problemas detectados en la zona. De un lado estarían la localización precisa de las áreas cultivadas de arroz y el análisis de las competencias existentes en la ocupación agrícola de tierras pertenecientes a espacios de reconocido valor ecológico como son las Marismas. De otro lado, se pretende desarrollar una metodología para la cuantificación de las superficies cultivadas y el seguimiento de los cambios que tienen lugar en campañas deficitarias en agua de riego. Para ello se dispuso de tres imágenes de satélite captadas desde el satélite Landsat-5, correspondientes al 26 de junio, 13 de agosto y 14 de septiembre de 1991. Para la campaña de 1989, que como puede verse en el gráfico 1 sufrió una drástica reducción de la superficie cultivada, se dispuso de una única imagen tomada el 7 de agosto.

El trabajo de campo se llevó a cabo a lo largo de todo el periodo de desarrollo fenológico del arroz, lo que ha permitido recoger una información muy útil acerca de la explotación agrícola del área arroceras en relación a:

- la selección de explotaciones en el área de estudio y sobre las que se ha llevado a cabo un reconocimiento directo sobre el terreno.
- datos sobre variedades dominantes, superficies cultivadas, y productividad del cultivo en cada una de las explotaciones.
- sistemas de riego empleados y caracteres edáficos.
- información fenológica acerca del ciclo de desarrollo de la planta de arroz en el área de estudio.

La información de campo relativa al ciclo fenológico ha sido una de las más importantes, por cuanto ha permitido lograr la determinación de las principales etapas que marcan el ciclo, así como los periodos de ocurrencia de cada una de ellas. Tal y como se aprecia en la figura 1, la ficha de campo comprende cuatro fases o etapas en el desarrollo de la planta: enraizamiento, periodo vegetativo, floración, formación del fruto y maduración; la ficha también incluye datos no estrictamente fenológicos pero que pueden resultar muy útiles para la identificación del arroz en la imagen de satélite como, por ejemplo, la época en la que la planta emerge sobre el nivel de inundación de las tablas. La información recogida en las fichas de campo ha permitido la construcción de un calendario de cultivos, en el que se especifican las fechas de inicio y fin de cada una de las etapas.

En la campaña de 1991 la siembra tuvo lugar durante el mes de mayo, y entre los meses de julio y septiembre la floración y maduración del fruto, por lo que las imágenes seleccionadas coinciden con la época en la que el cultivo alcanza su desarrollo y puede ser identificado con mayor facilidad. El calendario de cultivos también recoge el desarrollo fenológico del algodón, cultivo muy repre-



M.L. Prados Velasco

Fig. 1. Ficha del cultivo de arroz y calendario de cultivos. Campaña 1991.

sentativo de los regadíos que circundan al área arroceras, y que presenta cierta coincidencia cronológica en su ciclo fenológico con el del arroz. La discriminación entre ambos ha sido, por tanto, uno de los principales problemas para la determinación del área arroceras.

En lo que respecta al procesamiento de las imágenes digitales y dado que para la campaña de 1991 se realizaron análisis multitemporales, se ha insistido especialmente en la corrección atmosférica de las imágenes al objeto de homogeneizar las diferentes condiciones de iluminación presentes en cada una de ellas. Asimismo se llevaron a cabo correcciones geométricas que permiten georreferenciar las imágenes de satélite respecto a la cartografía topográfica y digitalizar sobre ellas las explotaciones muestreadas durante el trabajo de campo.

Una vez corregidas las imágenes, el primer paso consistió en la lectura de la respuesta espectral de los cultivos representativos del área de estudio y que podrían estar presentes en las fechas de adquisición de las imágenes de satélite. La figura 2 recoge en su extremo derecho la imagen del 26 de junio, que muestra la respuesta espectral del algodón, girasol, remolacha azucarera, trigo y arroz. La respuesta espectral del arroz ofrece siempre los valores más bajos en las porciones roja e infrarroja del espectro, debido a que en estas fechas el desarrollo de la planta no logra superar a la del agua en las tablas todavía inundadas. Para el 13 de agosto el arroz ofrece una respuesta espectral de alta reflectividad en la banda infrarroja y una fuerte absorción en la porción roja del espectro visible, y un comportamiento similar se detecta en la respuesta espectral del cultivo del 14 de septiembre; esta situación muestra una alta correspondencia con el cultivo del algodón, puesto que la media y varianza de arroz y algodón presentan valores semejantes en la imagen del 13 de agosto, y sobre todo en la del 14 de septiembre cuando ambos se encuentran ya maduros y próximos a la recolección.

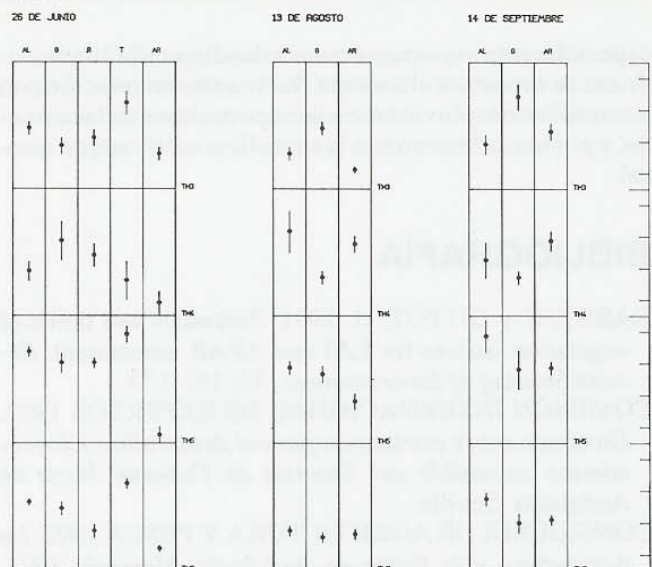


Fig. 2. Respuesta espectral de los cultivos en el área de estudio en las porciones roja e infrarroja del espectro electromagnético.

El mejor indicador de cobertura vegetal se encuentra por tanto en la combinación de las bandas TM-3 y TM-4, a partir del empleo de índices de vegetación que permitan realzar las características de la vegetación sana y desarrollada, al tiempo que atenúan la respuesta espectral del suelo. Existen diferentes tipos de índices de vegetación desarrollados con diversos objetivos y recogidos en la literatura científica existente sobre el tema (Tucker, 1979; Baret y Guyot, 1991; Wiegand y otros, 1991), e incluso combinaciones de bandas destinadas de forma expresa a la mejora de la discriminación del arroz (Gilbert y Meliá, 1988; Panigrahy y Parihar, 1992). Para la discriminación del área arrocerá cultivada durante la campaña de 1991 se empleó el Índice de Vegetación Normalizado y el Índice de Vegetación Transformado, de aplicación sencilla y con una buena aptitud ante la normalización de la respuesta espectral de la vegetación.

$$\text{Índice de Vegetación Normalizado } \frac{IRC-R}{IRC+R}$$

$$\text{Índice de Vegetación Transformado } \frac{((IRC-R)/(IRC+R)+0.5)^{1/2} * 100}$$

La disponibilidad de tres imágenes para la campaña de 1991 permitió realizar análisis multitemporales consistentes en la combinación de los Índices de Vegetación Transformados aplicados a las imágenes del 26 de junio, 13 de agosto y 14 de septiembre, en un denominado *Índice Multitemporal de Biomasa*. Para la campaña de 1989 y dado que sólo se contaba con una única imagen del desarrollo del cultivo del arroz, se procedió directamente a realizar diversos ensayos de clasificación supervisada sobre el Índice de Vegetación Normalizado.

El siguiente paso metodológico consistió en la clasificación supervisada de las imágenes resultantes de los índices de vegetación aplicados. La ilustración de la fig. 3 muestra, en primer término, los resultados del clasificador de máxima verosimilitud sobre la imagen de agosto de 1989, en la que si bien no ha sido posible discriminar cultivos por disponer de una única imagen, es fácil llevar a cabo la identificación visual de la clase arroz dadas las especiales

condiciones requeridas por el cultivo. La determinación de las áreas cultivadas de arroz y la estimación de las superficies cultivadas se realizó mediante el empleo de máscaras sobre las porciones de imagen que quedan fuera del área arrocerá. En último lugar y con la ayuda de las explotaciones muestreadas durante el trabajo de campo, se realizaron ensayos de clasificación supervisada sobre la imagen restante, empleando finalmente el clasificador de máxima verosimilitud. La verificación de los resultados obtenidos tras la clasificación se realizó a partir de matrices de confusión, que ofrecen buenas correlaciones con las superficies dedicadas a arrozal recogidas en las estadísticas disponibles para esta campaña.

Como se ha dicho, en la campaña de 1989 las condiciones hídricas estuvieron marcadas por la escasez de precipitaciones y la consiguiente reducción de los volúmenes de agua asignados para riego -- 2.200 m³/ha. Esta situación repercutió negativamente sobre las superficies cultivadas de arroz y que finalmente se clasificaron en la imagen; en 1989 sólo se cultivaron 11.820 has. que representan algo menos del 70% de las superficies dedicadas a arroz durante la campaña de 1991. Esta disminución en la dedicación arrocerá se explica tanto por las deficitarias condiciones hídricas de la campaña, como por el hecho de que los propios cultivadores acordaron limitar las superficies cultivadas ante la situación de carestía (Moral, 1991).

En la fig. 3 la ilustración de la derecha muestra los resultados del Índice Multitemporal de Biomasa aplicado a los Índices de Vegetación Transformados en las imágenes de 1991. Como en la imagen anterior, es posible distinguir el grado de ocupación del área central de cultivo y en menor medida las superficies cultivadas en la zona regable del Bajo Guadalquivir y entre dos de los sectores de los riegos de Almonte-Marismas. La fuerte concentración espacial del cultivo del arroz y las especiales condiciones hidrológicas en las que la planta se desarrolla han facilitado en gran medida la discriminación frente a otros cultivos que como el algodón ofrecen una respuesta espectral similar en estas fechas, y finalmente han hecho posible la estimación de las superficies cultivadas de arroz a partir de la clasificación supervisada del Índice Multitemporal de Biomasa.

La superficie cultivada de arroz en la campaña de 1991

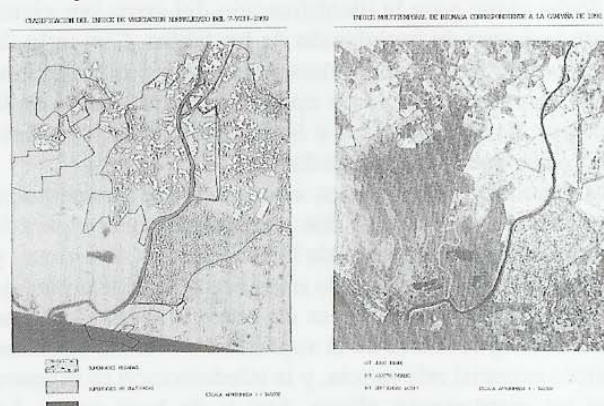


Fig. 3. Clasificación del índice de vegetación (7-8-1989). Índice multitemporal de biomasa, campaña 1991.

alcanza las 36.060 has. repartidas entre la zona central de las antiguas Marismas y parte de las zonas regables del Bajo Guadalquivir e inmediaciones del Plan Almonte-Ma-

rismas, respectivamente sobre las márgenes izquierda y derecha del Guadalquivir. La superficie total clasificada en la zona central suma 27.903 has., lo que representa un porcentaje de ocupación de un 88% sobre la superficie total delimitada en el mapa 1. En la zona regable del Bajo Guadalquivir la superficie cultivada se ciñe a los sectores VI y IX, habiéndose clasificado 6.718 has. frente a las 6.004 has. que junto a las de Isla Mayor cuentan con la concesión de aguas para riego de arroz (Rein y otros, 1984).

En lo que respecta a las superficies cultivadas de arroz en explotaciones colindantes a la zona regable de Almonte-Marismas, la extensión clasificada asciende a 1.439 has. Conocida la problemática de esta zona en relación a la competencia en el uso del agua dado el elevado consumo que demanda el arroz en relación a las superficies cultivadas más próximas -- entre 1,2 y 3 l/sg/ha --, y la ocupación de tierras agrícolas muy próximas al Parque Nacional de Doñana (Prados, 1991), se entiende la importancia de la discriminación lograda en estas áreas de cultivo. Las consecuencias de la localización de estos riegos hay que ponerlas también en relación con el hecho de que se trata de explotaciones privadas regadas con sus propios pozos, por lo que las medidas de control son menos practicables dada la autonomía con la que cuentan en la extracción y consumo de agua.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de orden metodológico que se extraen de esta aplicación de la teledetección son la validez de la combinación del reconocimiento sobre el terreno con la aplicación de índices de vegetación y la clasificación supervisada de imágenes de satélite para la localización precisa de las áreas cultivadas de arroz, y la estimación de la extensión total alcanzada por el cultivo en campañas agrícolas con diferentes condiciones hídricas. El disponer de imágenes multitemporales hace posible la discriminación del arroz frente a otros cultivos de regadío como el algodón con el que coincide en las fases de su ciclo fenológico, si bien las especiales condiciones del cultivo no hacen imprescindible este tipo de análisis siempre que exista una imagen en buenas condiciones y adquirida en una fecha clave para la identificación del arroz por ejemplo, en la época de inundación de las tablas. Con todo, la combinación de análisis multitemporales y multispectrales con el trabajo de campo optimiza los resultados de la aplicación de las imágenes a la discriminación y evaluación de las superficies ocupadas.

Los resultados alcanzados conceden una importancia destacada al desarrollo de los medios adecuados para la delimitación y localización de las superficies de arrozal, y el control periódico y ágil de unas áreas de cultivo colindantes con espacios naturales de especial fragilidad. Las labores de seguimiento de la superficie dedicada adquiere entonces especial relevancia, y la teledetección se muestra como un instrumento eficaz, ágil y de bajo costo. La posibilidad real de clasificar áreas cultivadas de arroz fuera de las inicialmente planificadas y muy próximas a espacios de alto valor ecológico, plantea la necesidad de articular mecanismos de control sobre las áreas de cultivo existentes y las que puedan ir surgiendo. Esta situación es

especialmente importante cuando las disponibilidades hídricas se muestran altamente fluctuantes en relación con las condiciones pluviométricas imperantes en cada campaña, y por tanto determinan la superficie cultivada de arrozal.

BIBLIOGRAFÍA

- BARET, F. y GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
- COMISIÓN INTERNACIONAL DE EXPERTOS 1992. *Dictámen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del Entorno de Doñana*. Junta de Andalucía. Sevilla.
- CONSEJERÍA DE AGRICULTURA Y PESCA 1992. *La Agricultura y la Pesca en Andalucía. Memoria 1991*. Junta de Andalucía. Sevilla.
- GANDIA, S. y otros 1986. Spectral signatures of rice fields using Landsat-5 TM in the mediterranean coast of Spain. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Remote Sensing for Resource Development and Environmental Management*, ISPRS. Enschede (Países Bajos), pp. 257-260.
- GILABERT, A. y MELIA, J. 1988. Estudio de índices de vegetación relacionados con la productividad del arroz, 2^a Reunión Científica del Grupo Español de Teledetección. Valencia, pp. 247-258.
- GONZALEZ ARTEAGA, J. 1989. *Las Marismas del Guadalquivir: etapas de su aprovechamiento económico*. Departamento de Geografía (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla. Sevilla.
- MORAL ITUARTE, L. 1991. *Diagnóstico de la actividad agraria*, vol. II. Comisión Internacional de Expertos. Sevilla.
- PANIGRAHY, S. y PARIHAR, J. S. 1992. Role of middle infrared bands of Landsat Thematic Mapper in determining the classification accuracy of rice. *International Journal on Remote Sensing*, 13: 2943-2949.
- PRADOS VELASCO, M. J. 1991. *Diagnóstico de la actividad agraria*, vol. I. Comisión Internacional de Expertos. Sevilla.
- PRADOS VELASCO, M. J. 1995. *Teledetección, Agricultura y Medio Ambiente. El Empleo de Imágenes Landsat-5 en el Seguimiento y Evaluación Estadística de los Regadíos en el Entorno de Doñana*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, en prensa.
- REIN, L. y otros 1984. *Informe sobre el sector arrocero de Sevilla y la incidencia de la sequía durante la campaña 1983/1984*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla (documento interno).
- TENNAKOON, S. B. y otros 1992: Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 13: 427-439.
- TUCKER, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 105-119.
- WIEGAND, C. L. y otros 1991. Vegetation Indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35: 105-119.