

Estimación de áreas de monocultivo arrocero a partir del empleo de índices de vegetación y clasificación supervisada de imágenes multitemporales

M^a José Prados Velasco

Dpto. Geografía Humana
Universidad de Sevilla

RESUMEN

El empleo combinado de índices de vegetación y métodos de clasificación supervisada tiende a ser cada vez más frecuente en el análisis y estimación de las superficies cultivadas mediante teledetección. En este artículo se utilizan ambos métodos para la observación y el análisis de un área de monocultivo arrocero 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.

ABSTRACT

Vegetation indexes and supervised classification of satellite images are the most usefull methods used in remote sensing for agricultural annalysis. This paper combines both methods in order to detect and annalized a plantation of rice in two differents years, and different hidrological 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.

Introducción

Este trabajo forma parte de un proyecto desarrollado durante 1993 en el Departamento de Geografía Humana de la Universidad de Sevilla, gracias a un Convenio de Cooperación propiciado por el Servicio de Estudios de la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía. El trabajo ha consistido en la aplicación de imágenes Thematic Mapper al estudio de un área de una extensión aproximada a las 110.000 has. dedicada a cultivos agrícolas en riego, principalmente cereales, cultivos industriales y hortofrutícolas. La combinación del trabajo de campo y la disponibilidad de un conjunto de imágenes pertenecientes a dos campañas agrícolas diferentes, permitió la realización de análisis multitemporales destinados a la estimación de las superficies ocupadas por los principales cultivos en regadío (Prados Velasco, M.J., 1993).

En concreto, este trabajo se centra en el análisis de una de las orientaciones productivas más representativas del área de estudio. Se trata de una extensa área de monocultivo arrocero, que sin duda constituye una de las más dinámicas e importantes desde el punto de vista territorial y productivo del conjunto del área de estudio. Emplazada en la cuenca baja del Guadalquivir, a caballo entre dos de las zonas regables más extensas de todo el país –Bajo Guadalquivir y Almonte-Marismas–, comprende un conjunto de islas cuya dedicación al cultivo del arroz se remonta a la década de 1920. La intervención de la iniciativa privada ha sido decisiva en la puesta en cultivo de unos suelos de marismas, en los que las especiales condiciones edáficas y de humedad que la planta necesita, y las prácticas culturales comúnmente empleadas explican la fuerte concentración espacial y la homogeneidad parcelaria del arrozal (Bahr W., 1973).

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 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 ya 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 Comunidad Económica Europea (González Arteaga J., 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 la consiguiente reducción de los volúmenes de agua asignados para riego, como así ocurrió en las campañas de 1972, 1983 y 1989. Los problemas de disponibilidad de agua para riego en la cuenca del Guadalquivir convierten en situaciones críticas para el cultivo del arroz los años con escasez de precipitaciones, debido en primer lugar a 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 (del Moral Ituarte L., 1991). Esta situación 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

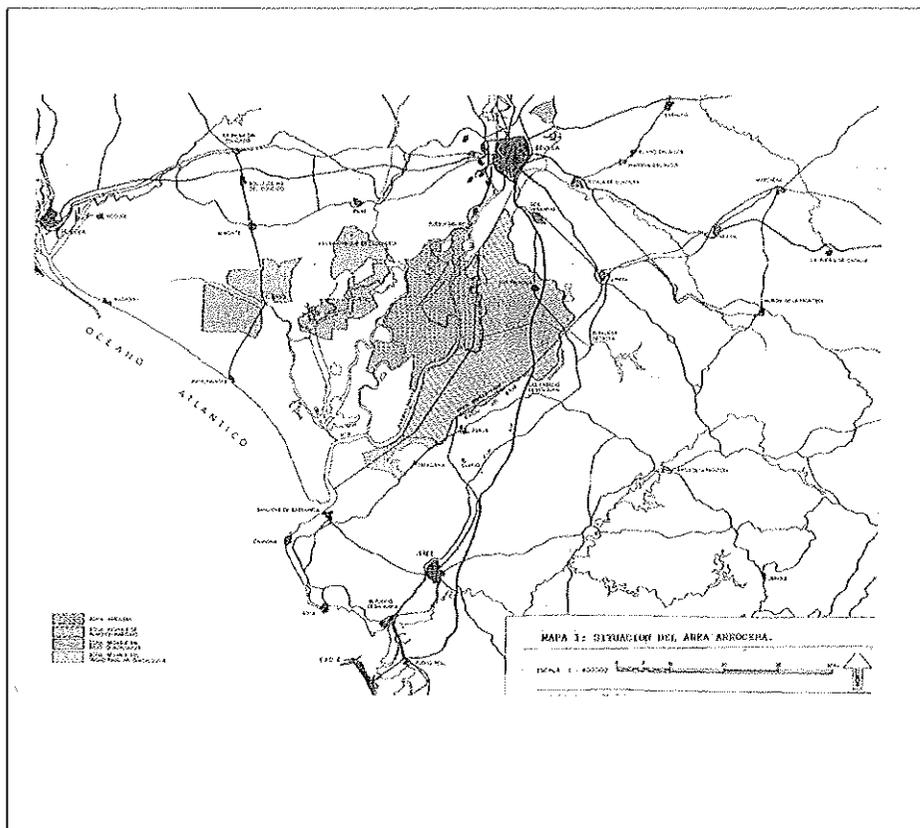
de agua necesarios con las actuales condiciones de regulación con que cuenta la cuenca del Guadalquivir (del Moral Ituarte L., 1991).

A los problemas asociados a la competencia en el uso del agua hay que unir los derivados de la proximidad del arrozal al sector oriental del Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural del Entorno. La superficie cultivada de arroz y que cuenta con la pertinente concesión de aguas ocupa en su mayor parte la Isla Mayor del Guadalquivir y parte de los sectores VI y IX de la zona regable creada sobre las marismas de la margen izquierda durante las décadas de 1960 y 1970 —vid. 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. 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. El sistema de desagüe del área de producción arrocera y el de abastecimiento de aguas superficiales de los espacios ecológicos vecinos forman una unidad hidrológica 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).

Imágenes disponibles y metodologías

Ante esta situación de contexto, la teledetección puede contribuir a solventar algunos de los problemas planteados, como son de un lado 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 y, de otro lado, desarrollar la metodología para la cuantificación mediante teledetección de las superficies cultivadas y 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 durante todo el período de desarrollo fenológico del arroz, lo que ha permitido recoger una información muy útil acerca de la explotación agrícola del área arrocera en relación a



MAPA 1
Situación del área arrocerá

- 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 períodos 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, período vegetativo, floración, formación del

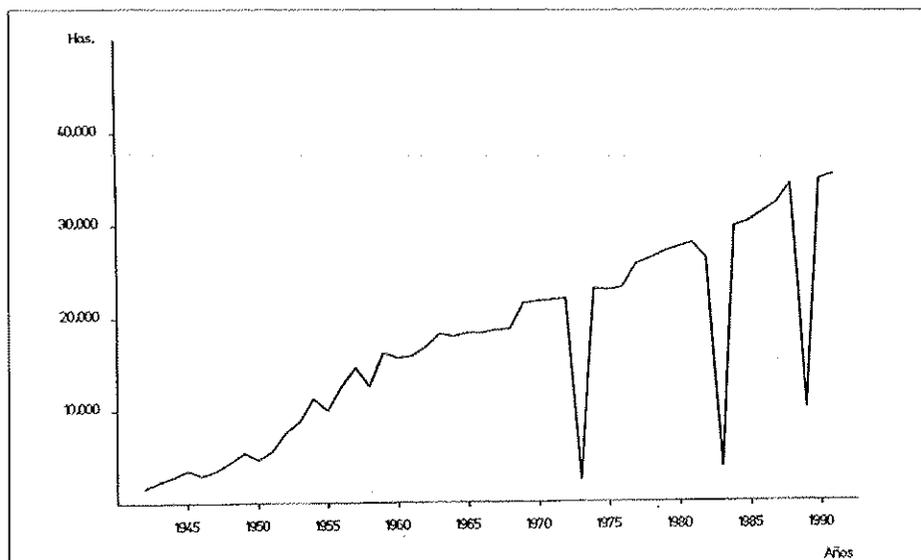


GRÁFICO I

Evolución del cultivo de arroz en las Marismas del Guadalquivir (has.)

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. Durante la campaña de 1991, la siembra tuvo lugar en 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 representativo de los regadíos que circundan al área arrocerera, 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 arrocerera.

En lo que respecta al procesamiento de las imágenes digitales y dado que para la campaña de 1991 se han realizado 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 georeferenciar las imágenes de satélite 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. El gráfico situado a la derecha correspondiente a la imagen del 26 de junio 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 el 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.

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 atenúen 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 C.J., 1979; Baret F. y Guyot Gr., 1991; Wiegand C.L. y otros, 1991), e incluso combinaciones de bandas destinadas de forma expresa a la mejora de la discriminación del arroz (Gilabert A. y Meliá J., 1988; Panigrahy S. y Parihar J.S., 1992). Para la discriminación del área arrocería 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.

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

La disponibilidad de tres imágenes para la campaña de 1991 llevó a 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 adquirida durante el desarrollo del cultivo del arroz, se procedió directamente a realizar diversos ensayos de clasificación supervisada sobre el Índice de Vegetación Normalizado.

La ilustración a color muestra, en primer término, los resultados del clasificador de máxima verosimilitud empleado sobre la imagen de agosto de 1989. Al disponer de una única imagen no ha sido posible discriminar cultivos, si bien y dadas las espe-

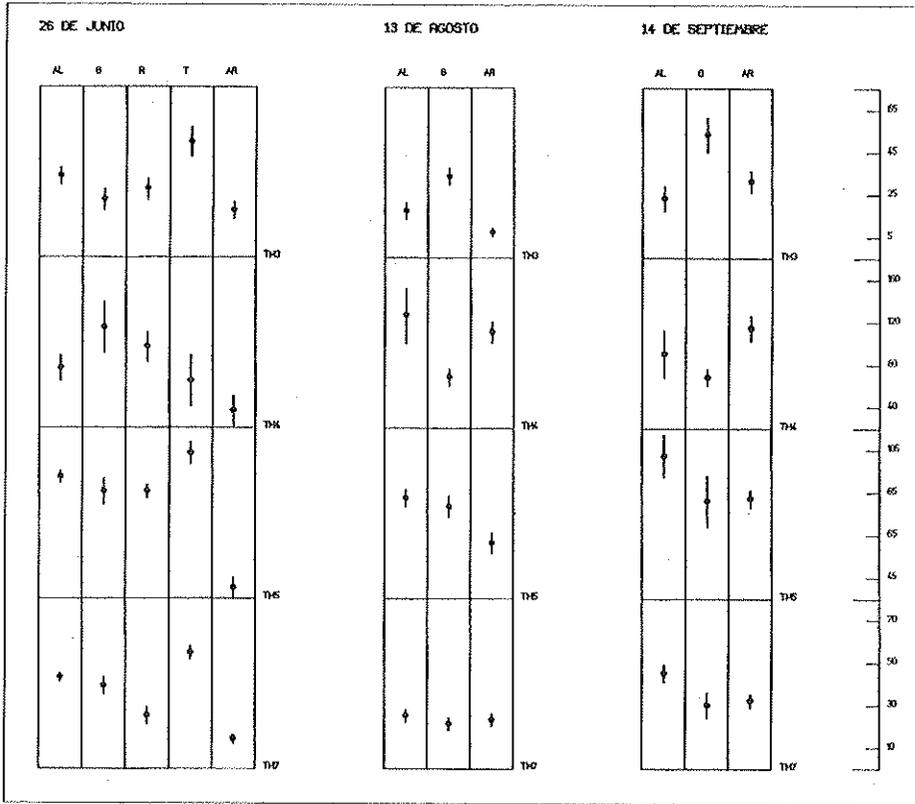


FIGURA 2

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

ciales condiciones requeridas por el cultivo del arroz, se entiende que toda la superficie cultivada en el área arrocera y zonas colindantes estuvo ocupada por arroz. 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. En ambos casos 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 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 arrocera. 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 verifi-

cación 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 ambas campañas.

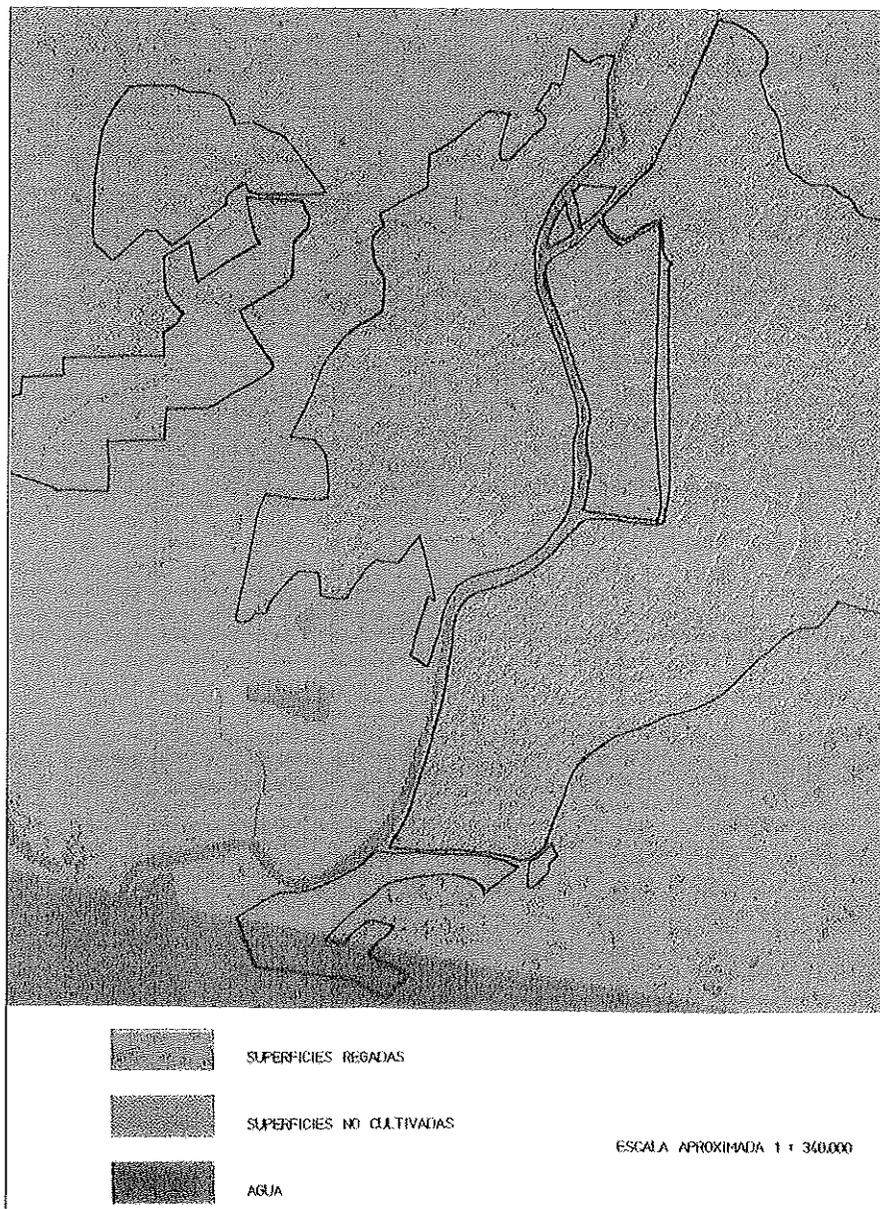
4. Las superficies cultivadas de arroz a partir de imágenes de satélite

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 ofrecen una respuesta espectral similar en esas fechas, y la estimación de las superficies cultivadas de arroz a partir de la clasificación supervisada de las imágenes. La superficie cultivada de arroz en la campaña de 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-Marismas, 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 inscribe dentro de los sectores VI y IX, habiéndose clasificado 6.718 has. frente a las 6.004 has. que cuentan con la concesión de aguas para riego de arroz (Rein Duffau L. 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 alcanzada asciende a 1.439 has. Si tenemos en cuenta los bajos índices de explotación en riego que presenta el conjunto de la zona regable y el hecho de que estas explotaciones arroceras se encuentran muy próximas al Parque Nacional de Doñana, se entiende la importancia de la discriminación lograda en estas áreas de cultivo (Prados Velasco M.J., 1991). Las consecuencias de la localización de estos riegos junto con el elevado consumo de agua que demanda el arroz –entre 3 y 1,2 l/sg/ha– y el hecho de que se trate de explotaciones privadas regadas con sus propios pozos, concede una importancia destacada al desarrollo de los medios adecuados para la delimitación y localización de estas superficies y el control periódico y ágil de las áreas de cultivo (Prados Velasco M.J., 1993).

Durante 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 repercutiría negativamente sobre las superficies cultivadas de arroz; en 1989 sólo se cultivaron 11.820 has. que representan un 69% de las superficies dedicadas a arroz durante la campaña de 1991. Esta disminución en la dedicación arrocerera encuentra su explicación, de un lado, en las deficitarias condiciones hídricas de la campaña y, de otro, en las autolimitaciones al cultivo acordadas por los cultivadores (Moral Ituarte L., 1991).

En conclusión, el empleo de índices de vegetación y la clasificación supervisada de imágenes de satélite permite la localización precisa de las áreas cultivadas de



Clasificación del Índice de Vegetación Normalizado del 7-VIII-1989. (A. 68)



Índice Multitemporal de Biomasa correspondiente a la campaña de 1991. (A. 69)

arroz y la estimación de la extensión alcanzada por el cultivo en campañas agrícolas con diferentes condiciones hídricas. La clasificación de 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

- Bahr, W.:** 1973. "Las marismas del Guadalquivir y el Delta del Ebro. Dos sectores arroceros españoles", en *Estudios Geográficos* nº 131. Madrid, pp. 381-405.
- Baret, F. y Guyot, G.:** 1991. "Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment", en *Remote Sensing of Environment*, nº 35. Nueva York, pp. 161-173.
- Comisión Internacional de Expertos:** 1992. *Dictámen sobre estrategias para el desarrollo socio-económico sostenible del Entorno de Doñana*. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir:** 1991. *Memoria de la zona regable del Bajo Guadalquivir. Campaña 1991*. Comisaría de Aguas. Sevilla (informe interno).
- Consejería de Agricultura y Pesca:** 1992. *La Agricultura y la Pesca en Andalucía. Memoria 1991*. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Gilabert Navarro, A. y Meliá Miralles, J.:** (1988). "Estudio de índices de vegetación relacionados con la productividad del arroz", en *Asociación Española de Teledetección 2ª Reunión Científica del Grupo Español de Teledetección*. Valencia, pp. 247-258.
- Gonzalez Arteaga, J.:** 1989. *Las Marismas del Guadalquivir: etapas de su aprovechamiento económico*. Universidad de Sevilla, Departamento de Geografía (Tesis Doctoral). Sevilla.
- Instituto Andaluz de Reforma Agraria:** 1991. *Informe sobre superficie equipada para riego en la zona regable de Almonte-Marismas y sus alrededores*. Junta de Andalucía. Sevilla (informe interno).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación:** (1982-92). *Anuarios Estadísticos de Producciones Agrarias*. Madrid.
- 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 midle infrared bands of Landsat Thematic Mapper in determining the classification accuracy of rice", en *International Journal on Remote Sensing*, vol. 13 nº 15. Londres, pp. 2943-2949.
- Prados Velasco, M.J.:** 1991. *Diagnóstico de la actividad agraria*, vol. I. Comisión Internacional de Expertos. Sevilla.
- (1993). *Teledetección y Agricultura. Aplicación Metodológica de Imágenes Espaciales a la Agricultura Mediterránea de Regadío*. Universidad de Sevilla -Departamento de Geografía Humana (Tesis Doctoral). Sevilla.
- Rein Duffau, L. y otros:** 1984. *Informe sobre el sector arrocerero de Sevilla y la incidencia de la sequía durante la campaña 1983/1984*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla (documento interno).
- Tucker, C.J.:** 1979. "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", en *Remote Sensing on Environment*, nº 8. Nueva York, pp. 105-119.
- Wiegand, C.L. y otros:** 1991. "Vegetation Indices in crop assessments", en *Remote Sensing of Environment*, nº 35. Nueva York, pp. 105-119