

CARTOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA DE CULTIVOS EN RIEGO EN EL ENTORNO DE DOÑANA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE S.I.G. Y CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES LANDSAT-TM

A. GONZALEZ, A. FERNANDEZ-PALACIOS, A. LOBATO Y J. M. MOREIRA.
Servicio de Evaluación de Recursos Naturales. Agencia de Medio Ambiente.
Sevilla.

RESUMEN

Los entornos del Parque Nacional de Doñana han experimentado, desde los primeros años de la década de los setenta, una considerable expansión de los cultivos de regadío. Este fenómeno está amenazando seriamente tanto al acuífero sobre el que se sustenta, como a la conservación de los importantes espacios naturales de este área.

En orden a conseguir una mejor comprensión y a agilizar las políticas de gestión de estos espacios se desarrolla una metodología que integra muestreo sobre el terreno, tratamiento digital de imágenes Landsat y bases de datos residentes en un S.I.G., con vistas a obtener tanto una estimación de la superficie de cultivos en riego, como su distribución espacial.

Debido a su alta rentabilidad en términos de tiempo y costo frente a procedimientos tradicionales, esta metodología, que utiliza la teledetección y los S.I.G., se muestra como una poderosa herramienta para el análisis y seguimiento de fenómenos sometidos a una gran dinámica espacial, tal como los analizados.

PALABRAS CLAVES: Seguimiento medioambiental, estadísticas y cartografía de cultivos, asistencia a clasificaciones mediante un S.I.G.

ABSTRACT

The surrounding area of the Doñana National Park has been affected, since early 1970s, by an irrigation land use expansion. This is seriously disturbing the local aquifer reserves and, thereby, the conservation of the natural spaces.

In order to better understanding and anticipate management policies, a procedure involving sample methods, digital processing of Landsat data and G.I.S. databases was developed to account for irrigated crops area estimation and spatial distribution.

Because of the low cost and readily adaptable attitude, Remote Sensing approaches proved to be powerful tools versus traditional procedures when dealing with dynamic spatial phenomenon such as the one analyzed.

KEYWORDS: environmental monitoring, crop statistic and cartography, classification assistance by G.I.S.

1. INTRODUCCIÓN

Cada día, las nuevas tecnologías de tratamiento de la información espacial, la teledetección y los S.I.G., se consolidan como "herramientas" claves en la gestión y planificación del Medio Ambiente, entendida hoy como tarea tanto de preservación, como de utilización racional de los recursos naturales.

Aún más, dichas tecnologías acrecientan su importancia en el análisis de espacios sometidos a fuertes dinámicas de cambios de usos, donde la adquisición de datos en corto espacio de tiempo y su manejo automático, a un coste económico y temporal rentable, se convierten en claras ventajas comparativas frente a métodos convencionales.

El presente trabajo pretende ejemplificar cómo el Sistema de Información Ambiental de la A.M.A., Sinamba, intenta dar respuesta a las distintas problemáticas medioambientales que se detectan en la región, al mismo tiempo que haciendo una evaluación de sus recursos naturales, en un área de señalada trascendencia como es la del entorno de Doñana.

En las últimas décadas, este espacio ha dejado de ser un área de carácter marginal para el aprovechamiento humano, debido fundamentalmente a sus propias condiciones naturales de suelos arenosos y abundantes zonas de marismas, para convertirse en lugar privilegiado para el desarrollo de ciertas actividades de fuerte impacto ambiental, como son el turismo y, sobre todo, la denominada nueva agricultura de cultivos forzados.

El avance espectacular en tan corto espacio de tiempo de esta actividad, favorecido por su alta rentabilidad, ha provocado no sólo la expansión de su superficie sobre terrenos antes considerados improductivos y problemas puntuales de contaminación del acuífero, sino que, muy especialmente, amenaza con la explotación del mismo por encima de las posibilidades de sostenimiento del importante conjunto de zonas húmedas asociadas a este espacio (EPYPSA, 1990).

Este hecho pone en peligro tanto la conservación de los valiosos ecosistemas del Parque de Doñana y de sus entornos, como el mantenimiento del recurso sobre el que se sustenta el futuro económico de la zona: el agua.

En este sentido, el conocimiento de la incidencia humana sobre el acuífero depende en gran medida de conocer la cuantía y distribución espacial de los cultivos en riego como actividad más consuntiva de este recurso.

Sin embargo, la complejidad de la zona en cuanto a espacios naturales y cultivados, la diversidad de cultivos, la micro-parcelación y, en general, la gran dinamicidad del área en función del carácter especulativo de sus cosechas, explican la dificultad de aplicar procedimientos tradicionales tales como fotografía aérea, trabajos de campo, estadísticas, etc. para determinar el alcance de dicha actividad.

La necesidad de establecer una metodología afín, que conjugue la evaluación cuantitativa con la distribución espacial del fenómeno, encuentra en la teledetección y los S.I.G. claras ventajas comparativas en el tratamiento y seguimiento de este tipo de problemáticas.

2. OBJETIVOS Y DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Los objetivos particulares del trabajo se concretan en la evaluación de los cultivos en riego en el entorno de Doñana en una doble vertiente:

- cuantitativa o de estimación de la superficie en riego para el año 1991, que permita la obtención de estadísticas desglosadas por cultivo y, consecuentemente, un conocimiento objetivo de extracciones del acuífero para usos agrícolas.
- cartográfica, que refleje la distribución espacial del fenómeno para llegar a determinar su incidencia sobre el acuífero, según las pautas de concentración o dispersión del mismo.

Para hacer frente a estos objetivos se diseña una metodología, que partiendo de las utilidades que ofrece el software de tratamiento digital de la A.M.A., AMATEL, y bases de datos residentes en el SinambA, contempla su resolución desde una doble vía.

Una primera, destinada a obtener una aproximación estadística de los riegos, integra trabajos de campo y clasificaciones de imágenes de satélite siguiendo el método elaborado por el Centro Común de Investigación de las Comunidades Europeas de Ispra.

En una segunda fase, se procederá a resolver los objetivos cartográficos a partir del desarrollo de clasificaciones supervisadas de las imágenes digitales, en las que se integrarán co-

berturas procedentes del SinambA como asistencia al proceso automático.

Básicamente, dicho procedimiento se apoya en la explotación de tres tipos de fuentes: bases estadísticas provenientes de datos de campo, datos de imágenes de satélite Landsat-TM y bases de datos del territorio, relativas a la cobertura de usos y ocupaciones del suelo.

En cuanto a la selección del área y fechas de estudio, se eligió el mismo área que delimita el I.T.G.E. para el acuífero de la zona, considerándose la inclusión de términos municipales completos para dar uniformidad a los resultados obtenidos y poder llevar a cabo comparaciones con otras fuentes de datos obtenidas a nivel de municipio. Las fechas de estudio intentan responder a los distintos ciclos de cultivos en riego en la zona de estudio, seleccionándose las fechas de paso del 9 de mayo y 13 de agosto como las más adecuadas para recoger la totalidad del regadío, dentro de las disponibilidades de imágenes sin cobertura nubosa en el año de estudio.

3. ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE EN RIEGO

Siguiendo el método desarrollado por el Centro Común de Investigación de Ispra, se establece un muestreo areolar estratificado de segmentos de campo que serán combinados con datos provenientes de clasificaciones automáticas de las imágenes de satélite para la estimación final de las superficies de riego.

Aunque dicho organismo cifra en un 1,5% el tamaño de la muestra para el total del universo a estudiar (CCR, 1987), ésta fue aumentada de antemano hasta un 2,24%, ante los problemas que se presuponen de la complejidad que caracteriza la zona en cuanto a la diversidad de cultivos y la pequeña representatividad espacial de éstos.

De este modo, la superficie a cubrir resultó en un total de 82 segmentos de 700 x 700 m distribuidos aleatoriamente sobre los dos estratos definidos: espacios cultivados y espacios de vegetación natural.

Los segmentos resultantes fueron visitados en campo, quedando la información recogida en dos tipos de documentos: fotografías aéreas a E 1/5.000, sobre las que se trazaron las parcelas halladas sobre el terreno, y fichas de campo, donde se recogió la información sobre diversos aspectos concernientes al tipo de cultivo, estado de desarrollo, grado de cobertura, etc.

Tras la realización de las tareas de campo, la información obtenida fue sometida a un proceso de informatización que permitió la captura automática de los datos y segmentos de campo, a partir de la cual, fue posible realizar una doble aproximación a las superficies analizadas: por expansión directa de los datos de campo o por regresión lineal de éstos con las clasificaciones de las imágenes.

3.1. Estimación de superficies por expansión directa.

Con los datos obtenidos en la encuesta de campo y las superficies de segmentos y parcelas, calculadas a partir de la

digitalización, podemos realizar una primera aproximación al total de la superficie cultivada en regadío, distinguiendo las superficies parciales ocupadas por cada cultivo.

Se emplea para ello un método de expansión directa haciendo repercutir sobre la totalidad del área de estudio los porcentajes de cobertura presentes en las muestras de terreno o segmentos.

La estimación se podrá realizar sobre los datos de una sola fecha, o bien, sobre la combinación de ambas, en cuyo caso se realiza la reducción de las distintas cubiertas de una misma parcela a la más representativa.

De este modo, los resultados obtenidos por estos procedimientos pueden ser observados en la Tabla 1.

o multitemporalmente, se realizó conforme a los clasificadores de máxima verosimilitud y mínima distancia euclídea, tomando como parcelas de entrenamiento las propias incluidas en los segmentos de campo (Lobato, A. y Moreira, J. M. 1991).

Para ello se llevaron a cabo una serie de subprocesos. Entre éstos, la corrección geométrica de las imágenes de satélite y de los ficheros de segmento respecto a aquellas, empleando el método de restitución por vecino más próximo en ambos casos.

Dichos tratamientos permitieron la obtención de las firmas espectrales de los cultivos y demás coberturas directamente por la superposición de los segmentos sobre la ima-

Tabla 1.- Datos por cultivo obtenidos en las dos fechas (mayo y agosto) y en el total de la campaña a partir de las dos aproximaciones estadísticas: por expansión directa de los datos de campo, y por regresión de éstos respecto a las clasificaciones de las imágenes Landsat-TM.

Cultivos	MAYO						AGOSTO						MAYO + AGOSTO					
	EXPANSION DIRECTA			REGRESION			EXPANSION DIRECTA		REGRESION				EXPANSION DIRECTA		REGRESION			
	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v. (Ha.)	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2	Superficie./c.v./ef.c. Est1 Est2			
Algodón	2734	51.2	1504 30.0 9.6 1	2951	47.6	806 27.4 40.4 1	2951	47.6	1311 15.1 44.1 1									
Cereal	2101	67.2	1198 31.0 14.4 1				2101	67.2	795 32.9 29.1 1									
Fresaón	6417	31.3	5063 15.5 6.5 6.6				6534	32.4	4466 12.4 16.1 9									
Cárucos	3117	59.8	2139 25.5 13.7 1	3134	59.5	2616 24.9 9.7 1	3117	59.8	2760 19.7 15.3 1									
Sirraol	1292	96.5	578 21.7 98 1	1535	02.0	1291 43.0 5.1 1	1564	80.4	990 51.8 6 1									
Arroz				7269	41.8	4517 9.0 5.5 1	7284	41.8	3417 7.5 99.9 1									
Matz				515	78.4	542 62.7 1.4 1	515	78.4	555 49.7 2.1 1									
	15661	50.6	10482 22.9	15404	51.7	9772 22.2	24066	47.8	14294 18.3									

Como puede apreciarse, se observan unos elevados coeficientes de variación (c.v.) por cultivo y respecto a la superficie total, oscilando en torno al 50% en los tres análisis temporales mostrados.

La obtención de tales resultados responden, de manera genérica, a dos tipos de causas principales: la excesiva heterogeneidad que presenta el área y, lo que se presume fundamental, la insuficiente representatividad estadística de la muestra para la estimación de elementos con escasa extensión superficial, a pesar de haber sido incrementada a un 2,24%.

Es por ello, por lo que desestimamos la aplicación única de un método de expansión directa para la resolución de los objetivos cuantitativos planteados en trabajos de esta índole, en cuanto que una mejora de los resultados estadísticos, mediante el aumento del tamaño de la muestra, exigiría un mayor esfuerzo en los trabajos de campo.

3.2. Estimación de superficies por técnicas de regresión lineal.

Esta segunda aproximación tiene por objeto el desarrollo de clasificaciones automáticas de las imágenes de satélite, cuyos resultados serán empleados para corregir la tendencia de los valores calculados en la estimación inicial, bajo la suposición de que la relación entre los datos de la expansión directa y los de la clasificación es lineal.

La clasificación de las imágenes Landsat, para cada fecha

gen, mediante un estudio estadístico de las respuestas espectrales para cada tipo de cubierta presente en la información de campo.

Los resultados derivados por esta vía (Tabla 1) ofrecen unas mejores estimaciones en cuanto se puede deducir de la obtención de unos coeficientes de variación (c.v.) menores, tanto para la superficie total en cada fecha como para cada cultivo. Igualmente, provocan, en general, una disminución de las superficies obtenidas por la expansión directa.

Otra de las variables que intervienen en este proceso, los coeficientes de correlación, nos ofrecen una medida del grado de bondad de la clasificación como elemento de ajuste del dato de campo, siendo los valores plenamente aceptables en todos los cultivos (Tabla 1).

4. CARTOGRAFÍA DE LAS SUPERFICIES EN RIEGO

Junto al objetivo más numérico de cuantificación de las superficies en riego, nos situamos ahora ante uno más cualitativo, con el objeto de conocer la distribución espacial de dichas superficies, a fin de complementar la información sobre el estado del recurso agua en el espacio analizado.

Para tales propósitos, se llevará a cabo, en primer lugar, un procedimiento convencional de clasificación de las imágenes Landsat por el método de máxima verosimilitud.

En vista de los pésimos resultados obtenidos por la prime-

Tabla 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Nº PÍXEL
1	97.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	364
2	0.0	88.3	0.0	0.0	0.0	11.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	111
3	0.0	0.0	64.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	131
4	0.0	0.0	0.0	90.5	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	342
5	0.0	0.0	0.0	0.0	77.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	270
6	0.0	8.1	0.0	0.0	0.0	90.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	190
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	95.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	439
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.6	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	159
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	4.2	94.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	263
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	235
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	269
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	260
13	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	298
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	151
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	139
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	296
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	257
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.1	0.0	0.0	334
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	122
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	63

Ene. Pan.

RELACION DE CULTIVOS

1.- ARROZ 2.- VIÑEDO 3.- OLIVAR 4.- HERBACEOS EN REGADÍO 5.- SUELO DESHUMEDO DE MARISMA 6.- CULTIVOS LEJOSOS EN REGADÍO 7.- SUELO DESHUMEDO BAJA REFLECTANCIA 8.- PINAR BAJA DENSIDAD 9.- PASTIZAL DENSO 10.- PASTIZAL BAJA DENSIDAD	11.- ARROZ 12.- LÍQUENES 13.- PASTIZALES DE MARISMA 14.- VEGETACION DE ARBESAS 15.- EUCALIPTOS 16.- PINARES 17.- PASTIZAL 18.- VEGETACION MARISMAS 19.- ERICENALES 20.- SUELO DESHUMEDO
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Matriz de confusión. Clasificación imagen Landsat-TM 13/08/91.

ra vía, se procederá al desarrollo de una metodología específica basada en la utilización de las bases de datos residentes en el Sinamba como medio de asistencia a las clasificaciones automáticas.

4.1. Clasificación de Máxima Verosimilitud.

El proceso para la implementación de la clasificación por máxima verosimilitud se efectuará conforme a los requerimientos como método supervisado.

De acuerdo con éstos, cada escena de imagen a clasificar, se someterá a un análisis previo de las distintas cubiertas presentes susceptibles de representar una determinada firma espectral, con objeto de definir las clases espectrales que intervendrán en la clasificación.

De esta manera, se decide la participación de 19 clases en la fecha de mayo y 21 en la de agosto, abarcando las siguientes coberturas:

- cultivos permanentes: viñedo y olivar, en secano, y cítricos, en regadío (subdividido en dos clases según la mayor o menor cobertura).
- cultivos herbáceos: trigo, de secano, y fresón de regadío presentes en la fecha de mayo, y cultivos encharcables (arroz) y otros de regadío (girasol, algodón, maíz, etc.) habidos en la segunda fecha.
- vegetación natural: arbolada (pinar, eucaliptal y vegetación de ribera), subarbustiva (con distinción de densidades) y pastizales (normal, húmedo de marisma, etc.).
- suelos: distinguiendo los muy reflectantes (arenas), de reflectancia normal y de baja reflectancia (suelo húmedo de marisma y zonas intermareales).

- aguas continentales.

Una vez definidas las clases, se procede a la toma de las parcelas de entrenamiento que constituirán las firmas espectrales o muestras representativas de cada clase.

Tras los procesos previos, el clasificador de máxima verosimilitud, definido como el más idóneo para el tratamiento de coberturas vegetales, fue aplicado sobre las seis bandas de los datos TM, excluida la térmica, en las dos fechas de análisis.

Con vistas a comprobar el grado de confianza conseguido en cada clasificación, se procedió a elaborar una matriz de confusión, utilizando las propias parcelas de entrenamiento en el proceso de validación. Ello implica que los valores de acierto obtenidos tengan un carácter relativo, aunque permitirán establecer comparaciones con otras vías de aproximación.

Las matrices de confusión así generadas mostraron unos altísimos niveles de acierto: 93% para la clasificación de Mayo y 94,3% para la de Agosto (Tabla 2). Sin embargo, las salidas cartográficas obtenidas a partir de dichas clasificaciones (Imagen 1) mostraban claramente graves deficiencias en el proceso de clasificación, como la aparición de píxeles pertenecientes a clases de cultivos en riego en espacios no agrícolas, tales como masas forestales e importantes porciones de marismas, muchas de ellas localizadas en el Parque Nacional de Doñana.

Dichos errores nos conducen a una doble reflexión:

- En primer lugar, confirmar la relatividad de los aciertos mostrados por una matriz de confusión que refleje la bondad de la clasificación referida únicamente a las parcelas de entrenamiento.

- En segundo lugar, y lo que nos parece más importante, que los errores detectados son en cierto modo inevitables por el método establecido, puesto que responden a confusiones espectrales lógicas entre las distintas coberturas, especialmente si éstas no presentan un patrón espectral definido.

Así, la firma espectral de los cítricos presentó problemas para su definición con altas desviaciones de sus valores digitales, debidos fundamentalmente a la escasa homogeneidad de su cobertura.

Estas consideraciones pueden ser observadas en la gráfica construida a tal efecto, a partir de las medias espectrales en los seis canales TM, de las distintas coberturas definidas en la clasificación de mayo (Figura 1).

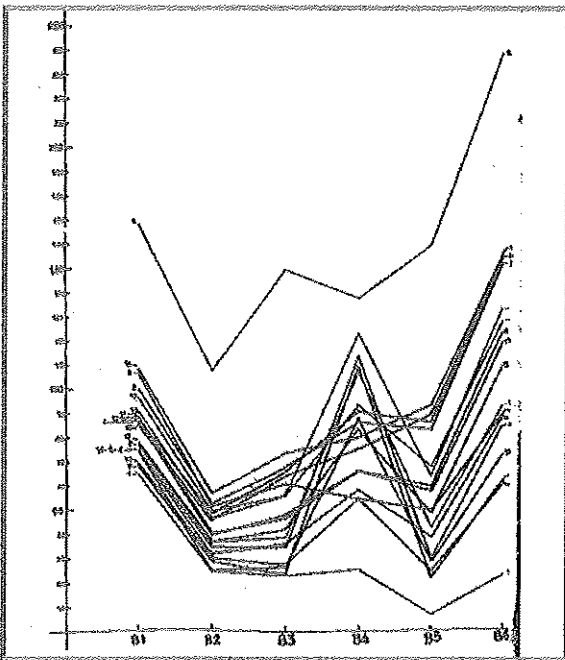


Figura 1.- Signatura espectral de las clases consideradas en la fecha de Mayo. Los cultivos en riego corresponden a los números 15, 16 y 17.

Junto a las confusiones genéricas entre algunas de las firmas espectrales consideradas habría que hacer notar otras de carácter "exógeno" al propio funcionamiento del clasificador que presenta, en particular, la zona de estudio. Entre éstas, el reducido tamaño de las parcelas, el carácter rotativo del ciclo de cultivos, la heterogeneidad de respuestas de los elementos de interés, la escasa idoneidad de las fechas escogidas por problemas de nubosidad, etc..., inciden negativamente en la definición de las firmas espectrales y, consecuentemente, en el éxito de las clasificaciones resultantes.

En definitiva, son estas reflexiones las que dificultan la im-

plementación de un método convencional de clasificación para la resolución de los objetivos cartográficos trazados en el presente estudio, y de las que se deriva la necesidad de diseñar una metodología más afín a los objetivos planteados.

4.2. Asistencia a las clasificaciones mediante S.I.G.

El nuevo planteamiento para el procedimiento cartográfico parte de la inclusión de una de las coberturas residentes en el Sinamba en el proceso de clasificación, con objeto de asistir al mismo durante el funcionamiento del clasificador.

La cartografía referida responde al proyecto comunitario LAND COVER. Dicho proyecto parte de la fotointerpretación de imágenes Landsat TM para llegar a establecer los usos y ocupaciones del suelo, y por tanto, muy adecuado a nuestros propósitos.

Para la integración del S.I.G. en el tratamiento digital de las imágenes se procedió a realizar una serie de trabajos previos, entre ellos, el de conversión del formato vector del fichero S.I.G. a raster, tras lo cual fue posible explotar la cartografía digital como un canal más de la imagen TM (González Torralba, F. y Martínez, J. R. 1991), una vez realizada su conversión a formato imagen y la corrección geométrica entre ambos ficheros de imagen.

Tras estos tratamientos es posible llevar a cabo la clasificación de las imágenes Landsat por máxima verosimilitud, donde el canal que contiene la cobertura de usos actuará como un discriminador a priori, determinando la posibilidad de participación de cada clase espectral en los distintos niveles de leyenda de la cobertura del S.I.G. Se trata pues, de una clasificación supervisada utilizando las mismas parcelas de entrenamiento, con la novedad del neocanal antes mencionado.

De este modo, se construye un fichero de clases conteniendo la lógica de asistencia a la clasificación, tal y como se observa en la Tabla 3, que especificará qué clases espectrales, de las definidas en cada escena de imagen, son posibles en cada uno de los niveles interpretados en la cobertura del Sinamba.

Este proceso nos permitirá evitar, de una manera simple, los errores de la clasificación automática debidos a la similitud de respuesta espectral de clases que, sin embargo, son fácilmente discriminadas sobre un mapa de ocupación del suelo.

Así clases como pastizales de marisma, con un comportamiento espectral muy similar al de cultivos en riego, pero con una distribución espacial claramente contrastada, son diferenciadas en el fichero de clases predeterminando su posibilidad de aparición en áreas de marismas u otras afines de la cartografía digital.

Procesos similares se llevaron a cabo con el resto de las clases, basados en un conocimiento exhaustivo de la zona de estudio. No obstante, para no determinar en exceso los fundamentos probabilísticos del clasificador, se optó por limitar únicamente la participación de las clases correspondientes a cultivos en aquellos sectores del fichero S.I.G. pertenecientes

	ZONAS TERRESTRES	HERBACEOS SECOS	HERBACEOS DE REGAD.	FRUTAL ESCASO	CITRICOS	CULT. BAJA PLASTICO	MEDICINAL	VINEDOS	OLIVARES	MUSCICO PERMANENTES	MCS. ANUALES Y PERM.	CULT. + VEG. NATURAL	SIST. AGROFORESTALES	RESERVIAS	BUENALTIPOS	VEG. DE RIBERA	PIENAS	PASTIZALES	HERBACEOS DENSOS	NATURALES - DENSOS	NATURALES ABIGALAO	PRADOS, JORNAS, ARBOL.	ESPACIOS VEG. ESCASO	BUEN. Y OTROS PANT.	ARBALES	SALINAS Y CULT. MAR.	ZONAS INTERMEDIAS	COMUNES ANTICIPA.	LACOS Y LAGUNAS	ESTUARIOS Y BOSTROS	ESP. REPOBL. EN TERM.		
AGUA																																	
ARENAS		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
SUELO HUMEDO			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
SUELO DESHUMDO			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
PASTIZAL			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
NATORRAL-DENSO			X	X				X	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
NATORRAL-DENSO			X	X				X	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
VEG. RIDERA																X																	
MICINAR-DEHESA															X																		
RUCALIFTO		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
PIJAR + DENSO		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
PIJAR - DENSO		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
OLIVAR		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
VINEDO		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CULT. HERB. SECANO		X	X					X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
CULT. HERB. REGAD.			X																														
ARROZ							X																										
CITRICOS + DENSO			X	X	X						X	X																					
CITRICOS - DENSO			X	X	X						X	X																					

Tabla 3.- Matriz de asistencia de la cobertura S.I.G. a la clasificación, mediante la cual se predetermina la posibilidad de aparición de cada clase (horizontal) en los distintos niveles de leyenda de la base de datos gráfica de usos del suelo (vertical).

a espacios naturales. La Imagen 2 muestra un ejemplo de los resultados cartográficos derivados de las clasificaciones implementadas por este procedimiento para la misma porción del área de estudio que aparece en la Imagen 1.

A primera vista, se presume el éxito del método diseñado en cuanto que los errores cartográficos reflejados por el procedimiento convencional son ahora obviados, dando como

resultado una gran fidelidad cartográfica en las salidas gráficas. Especialmente notoria es la reducción de las clases de cultivos en riego en las zonas forestales y en las marismas, y la disminución de superficie de cítricos.

La mejora de los resultados obtenidos por este procedimiento queda claramente reflejada en las matrices de confusión construidas al efecto (Tabla 4). Su comparación nos permite observar un aumento relativo de los niveles de acier-

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Nº PÍELES
1	91.5	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	354
2	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	311
3	0.0	0.0	64.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	131
4	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	342
5	0.0	0.0	0.0	0.0	71.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	270
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	198
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	439
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	159
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	95.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	263
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	235
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	269
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	350
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	258
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	181
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	179
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.1	94.3	0.0	0.0	0.0	296
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	257
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.4	0.0	134
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	122
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	63

Tabla 4.- Matriz de confusión de la imagen landsat TM de 13/8/91 asistida por S.I.G.

RELACION DE CARTAS

- 1.- ARROZ
- 2.- VINEDO
- 3.- OLIVAR
- 4.- HERBACEOS EN REGADAO
- 5.- SUELO SECANO DE MARIÑA
- 6.- CULTIVOS HERBACEOS DE REGADAO
- 7.- SUELO SECANO EN LA DESECCION
- 8.- PIJAR PARA REGADAO
- 9.- MATORRAL DENSO
- 10.- MATORRAL EN LA DESECCION
- 11.- ARENAS
- 12.- BASTOS
- 13.- PANTANOS DE MARIÑA
- 14.- MATORRAL DE RIBERA
- 15.- BASTOS
- 16.- PRADOS
- 17.- PASTIZAL
- 18.- MATORRAL DENSO
- 19.- MATORRAL
- 20.- SUELO SECANO

to respecto a las clasificaciones anteriores (Tabla 2).

Se observa, en primer lugar, un ligero incremento en los porcentajes del acierto global de la clasificación: 94,9% para la fecha de mayo y 94,3% en agosto.

Sin embargo, son los resultados parciales los que merecen una mayor atención. Si bien los herbáceos de regadío se clasificaron correctamente por el empleo del método convencional, y no se observaron confusiones importantes con otras clases, no podemos afirmar lo mismo para otros cultivos.

Así, los cítricos, pese a altos niveles de confianza conseguidos (por encima del 90% en ambas fechas) las mayores confusiones verticales, especialmente, y horizontales que presentaban en el proceso anterior, hacen desestimar los resultados cartográficos para el primero de los métodos.

El empleo de esta nueva vía de asistencia al proceso de clasificación, además de conseguir una mejora sustancial en los niveles de bondad estadística, tanto global como parciales de cada cultivo, ha reducido enormemente las anteriores confusiones entre clases que, por problemas de indefinición de las firmas espectrales, falseaban la distribución espacial del fenómeno estudiado.

Las Imágenes 3 y 4 ofrecen los resultados gráficos de la asistencia a la clasificación para las fechas de mayo y agosto del conjunto de la zona de estudio.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. Resultados cuantitativos.

En la Tabla 1 hemos podido observar que las estimaciones de las superficies de cultivos en riego realizadas por el método de expansión directa, arrojan, en general, unos coeficientes de variación elevados, por lo que no resultan plenamente apropiadas a nuestros fines.

Estos coeficientes de variación se muestran especialmente altos cuando se refieren a estimaciones individuales de cultivos, oscilando entre 31,3% del fresaón en mayo y 96,5% del girasol de regadío en esta misma fecha.

Se apuntó además, que dichos errores disminuyen cuando se realizan agrupaciones de cultivos, lo que refleja un inadecuado tamaño de la muestra que, ante la heterogeneidad que manifiesta el área de trabajo, requeriría un claro aumento de la representatividad de la misma para mejorar los resultados, que a su vez redundaría en un mayor esfuerzo de los trabajos de campo.

En ese sentido, agrupando los elementos de interés en cultivos herbáceos de regadío, cultivos leñosos de regadío y cultivos bajo plástico, observamos que los coeficientes de variación siguen superando el 30%, lo que sigue suponiendo un umbral de incertidumbre excesivo para los objetivos de este trabajo.

En cuanto a la segunda aproximación, por medio de la regresión lineal de los datos de campo con los resultados provenientes de las clasificaciones automáticas, se derivan unas mejores estimaciones de superficies reflejado en los menores coeficientes de variación, resultando en una disminución de

la superficie total de riego respecto a la estimada por expansión directa (Tabla 1).

Así, exceptuando cultivos con una escasísima representatividad espacial, como el maíz y el girasol de regadío, los coeficientes de variación se hallan situados entre el 15% y el 30%, lo que supone unas cifras, que aunque elevadas, reflejan una clara mejora respecto a los datos de expansión directa.

En ese sentido, y tras el análisis de los coeficientes que indican la eficacia de la regresión (ef. c.) en los dos estratos contemplados, parece constatar el factor de corrección que imponen los datos procedentes de la clasificación automática de las imágenes. Estas, en todos los casos, hacen descender el número de hectáreas en la estimación por regresión, respecto a las cifras ofrecidas por expansión directa.

En general, este procedimiento se muestra el más satisfactorio para la obtención de resultados cuantitativos, a nivel de cultivos individuales, siendo especialmente notorio en aquellos con mayor representatividad espacial: fresaón, arroz y cítricos.

Ahora bien, como se desprende de la Tabla 1 los resultados por cultivos aparecen individualmente en cada fecha de estudio (mayo y agosto), y, sin embargo, ofrecen cifras dispares para un mismo cultivo.

Ello se debe a que, en los trabajos de campo, y debido a las variaciones de estado fenológico entre plantaciones de un mismo cultivo, pueden detectarse o reconocerse una buena porción de éstos en la fecha que no sea la idónea. Así aparecen parcelas que son suelo desnudo en una fecha y un determinado cultivo en las siguientes y viceversa. Este fenómeno obliga a una interpretación multitemporal de los datos en la que se seleccionan las cifras correspondientes a las fechas más apropiadas para que el cultivo sea lo suficientemente representativo para ser reconocido.

Como resultado de este proceso, obtendremos unas estimaciones por cultivos que pueden considerarse las más adecuadas.

A nivel global destaca el descenso de los coeficientes de variación sensible a todos los cultivos de interés. Especialmente notoria es la cifra global de hectáreas de riego: 14.294 (incluyendo 3.417 has correspondientes a arroz), con un c.v. 18,3%.

En un último intento de comparación, en el cuadro siguiente (Tabla 5), se ofrecen las superficies en riego conseguidas por el empleo de las distintas vías implementadas, estadísticas o basadas en técnicas de teledetección, a la que hemos añadido, en orden a establecer tal comparación, las superficies deducidas de las clasificaciones asistidas por S.I.G. y datos provenientes de otros organismos oficiales (Confederación Hidrográfica, I.A.R.A. y Censo Agrario) que emplean como fuente métodos estadísticos. Los resultados ofrecidos por estos organismos habrán de considerarse como meramente orientativos en la medida que corresponden al año 1990, año que fue de unas características pluviométricas muy distintas al de nuestro estudio, lo que supone unas notables diferencias en el número de hectáreas cultivadas en riego.

Tabla 5.- Resultados globales de estimación de superficies de cultivos en riego obtenidos por las distintas metodologías aplicadas. Comparación con los datos ofrecidos por el I.T.G.E. para el año 1990.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS				
	TRABAJOS DE CAMPO	ESTIMACION POR REGRESION TRABAJOS DE CAMPO/ CLAS. IMÁGENES DE SATELITE	CLASIFICACIONES IMÁGENES DE SATELITE (MAYO + AGOSTO) ASISTIDAS POR S.I.G.	DATOS C.H.G. + I.A.R.A. + CENSO AGRARIO PARA AÑO 1989
CULTIVOS HERBACEOS EN RIEGO	13665	8117	10257	-----
CULTIVOS LEÑOSOS EN RIEGO	3117	2760	1322	-----
ARROZ	(7284)	(3417)	(3060)	-----
TOTAL REGADIO (Excepto Arroz)	16782 has.	10877 has.	11579 has.	16580 has.

Se observa en primer lugar, la similitud de los resultados obtenidos por los procedimientos convencionales de muestreo estadístico: 16.782 has por trabajos de campo y 16.580 has por datos de los otros organismos oficiales. Sin embargo, como se indicó con anterioridad, los datos procedentes de estos organismos corresponden al año 1.990, por lo que sirven únicamente como referencia de carácter relativo. Más llamativo es sin embargo, la aproximación de los resultados obtenidos por técnicas derivadas del uso de la teledetección: 10.877 has por regresión lineal y 11.579 has por clasificaciones asistidas por S.I.G.

La escasa diferencia de 700 has en dos estimaciones obtenidas por metodologías diferentes, aunque ambas integran la teledetección como fuente de información, nos hacen concluir que la cifra de la totalidad del riego en el Entorno de Doñana para el año 1991 debe situarse en torno a 11.000 has, a las que habría que sumar unas 3.500 has de arroz, que, como se indicó, sólo en una mínima parte utilizan agua del acuífero.

Igualmente cabe señalar, que a nivel de cultivos, los datos más aproximados los ofrece el método de estimación por regresión, pues la clasificación de datos teledetectados asistida por S.I.G. no ofrece los umbrales de confianza suficientes para realizar un desglose de clases por cultivos individuales.

5.2. Resultados cartográficos.

La aptitud de las nuevas vías de asistencia a la clasificación para la optimización de los resultados cartográficos, ha quedado contrastada en el análisis de las matrices de confusión derivadas de ambos métodos. Del mismo modo, la comparación de las matrices de confusión pone de manifiesto la eficacia de la clasificación asistida por S.I.G. relativa a la disminución de las confusiones, tanto verticales como horizontales, entre las clases consideradas. Los resultados observados en las salidas gráficas muestran igualmente el éxito de la asistencia a la clasificación en cuanto a la atenuación de los errores cartográficos detectados en la distribución espacial de los regadíos.

Como se indicó anteriormente, las matrices de confusión mostraron únicamente una mejora relativa de las clasificacio-

nes asistidas por S.I.G. Con vistas a realizar una constatación objetiva de los resultados cartográficos obtenidos, se procedió a realizar matrices de confusión para cada fecha y en los dos métodos implementados, que muestran el grado de acierto cartográfico de los cultivos de regadío en las clasificaciones respecto a los segmentos de campo. Con ello se consigue una verificación de las salidas gráficas respecto a una representación estadística del conjunto del territorio que había sido visitada en campo.

Estas nuevas verificaciones pueden ser observadas en las Tablas 6 y 7.

Hay que indicar que esta aproximación para determinar la bondad del método implementado por medio del cruce con los propios segmentos de campo, presenta varios problemas insolventables a pesar de su objetividad. Entre éstos, la dificultad de equiparar las clases recogidas en la ficha de campo respecto a las definidas en la clasificación para su comparación, la posibilidad de encontrar los cultivos de campo en distintos estados fenológicos o la excesiva parcelación de algunos segmentos de campo.

Como puede observarse, los porcentajes obtenidos en la clasificación asistida obedecen a una doble tendencia: el aumento del acierto estadístico y la disminución de las confusiones entre las distintas clases.

De este modo, el comportamiento de los herbáceos de regadío en la primera fecha, y que como hemos señalado corresponde fundamentalmente al cultivo del fresón, incrementa su nivel de confianza del 73 al 75,3% en la clasificación asistida por S.I.G. Este acierto estadístico se ve potenciado por la sensible mejora de disminución de confusiones verticales y horizontales que validan la distribución espacial de dicho cultivo.

Respecto a la fecha de agosto observamos los mismos efectos; en el caso del cultivo de arroz, la clasificación asistida dobla el acierto cartográfico respecto a los segmentos de campo alcanzando un 81,5% frente al 37,5%. En cuanto al otro cultivo contrastado, cítricos, además de incrementar el porcentaje de acierto cartográfico del 83,8% a 99,6%, se hace más notoria la desaparición de confusiones con otros cultivos, tal y como indica la distribución vertical y horizontal de la matriz de confusión.



Imagen 1.- Detalle de salida gráfica correspondiente a la clasificación de la imagen de 13/8/91, donde se observan numerosas confusiones. Véase Anexo de color.

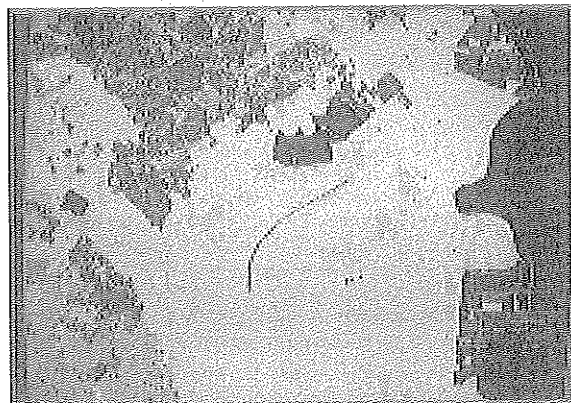


Imagen 2.- Detalle de de la misma clasificación de la imagen 1, una vez asistida por S.I.G.. Se aprecia una atenuación notable de las confusiones. Véase Anexo de color.

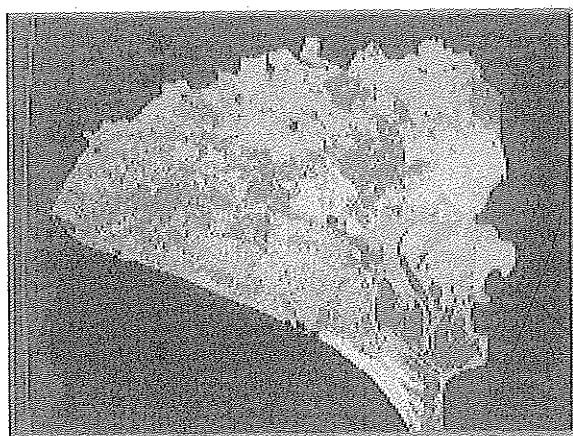


Imagen 3.- Salida gráfica de la clasificación asistida por S.I.G. de la zona de estudio para la fecha de mayo. En rojo cultivos herbáceos en riego y en naranja, cítricos. Véase Anexo de color.

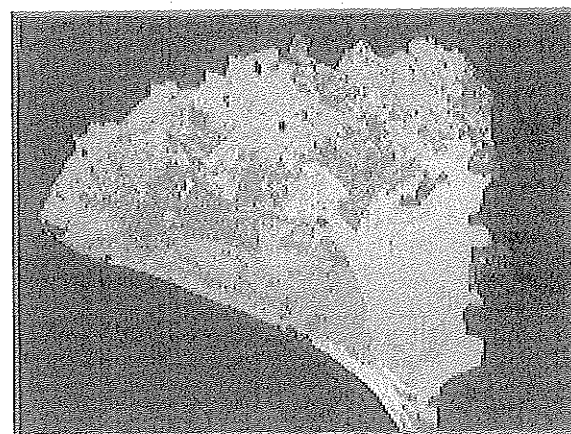


Imagen 4.- Salida gráfica de la clasificación asistida por S.I.G. de la zona de estudio para la fecha de agosto. En rojo cultivos herbáceos en riego; en naranja, cítricos; en rojo oscuro, arrozales. Véase Anexo de color.

7. BIBLIOGRAFIA.

- ✓ COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES-CCR (1.987): *Conditions Generales et Specifications Detailles. Project Agriculture, Inventaires Regionaux*. Directions des Projects. Programme Teledetection. Ispra.
- ✓ EPYPSA (1.990): *Plan de Ordenación de Recursos Naturales y de Desarrollo Integral del Parque Natural Entorno de Doñana. Información y Diagnóstico*. Documento no publicado. Sevilla, 176 pag.
- ✓ GONZALEZ TORRALBA, F. y MARTINEZ, J.R. (1.991): "Integración de imágenes de satélite con información en formato vectorial proveniente de un S.I.G. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Sevilla. (En resumen de Actas).
- ✓ LOBATO, A y MOREIRA, J.M. (1.991): "Análisis metodológicos y de resultados de diferentes alternativas de clasificación de imágenes de satélite, para la obtención de Estadísticas Agrarias". IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Sevilla. (En este volumen).
- ✓ MOREIRA, J.M.; RAMOS, A.; LOBATO, A. y FERNANDEZ, A. (1.989): Evaluación de superficies de cultivos de fresón mediante imágenes Landsat-TM. Su uso en un sistema de pronóstico de cosecha. III Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección.