

Sánchez Martín, N., Rodríguez Ruiz, M., Martínez Fernández, J. y Calera Belmonte, A. (2010): SIGPAC y series multitemporales LANDSAT 5 TM como estrategia híbrida de clasificación de usos de suelo para aplicaciones hidrológicas. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 1.109-1.118. ISBN: 978-84-472-1294-1

SIGPAC Y SERIES MULTITEMPORALES LANDSAT 5 TM COMO ESTRATEGIA HÍBRIDA DE CLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO PARA APLICACIONES HIDROLÓGICAS

Nilda Sánchez Martín¹, Marta Rodríguez Ruiz¹, José Martínez Fernández¹, Alfonso Calera Belmonte²

(1) Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias. Universidad de Salamanca. Río Duero, 12, 37185, Villamayor.
nilda@usal.es; mar29@usal.es; jmf@usal.es

(2) Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla La Mancha. Campus Universitario s/n, 02071 Albacete.
Alfonso.Calera@uclm.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en la obtención de un mapa de usos y coberturas de suelo para su integración en un modelo hidrológico de balance de agua a lo largo de 2009. Los resultados de dicha aplicación (evapotranspiración, humedad de suelo, necesidades de riego) se obtienen a escala de parcela, con escala temporal diaria y contemplando los usos y coberturas más frecuentes en la zona. La herramienta diseñada para aplicar el modelo (HidroMORE, Modelo Hidrológico de Estimación de Recarga y Evapotranspiración) proporciona los resultados en forma de mapa imagen.

Con este fin, se presenta una alternativa híbrida de clasificación consistente en la combinación de la base de datos vectorial del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), junto con una serie multitemporal de imágenes Landsat 5 TM (Thematic Mapper) del año 2009. El primero aporta la definición parcelaria, mientras que la segunda provee la información suficiente para resolver clases poco definidas en el SIGPAC, especialmente la categoría 'tierra arable'. Se utilizaron metodologías de teledetección como la clasificación, la segmentación multitemporal y el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), junto con herramientas SIG. El método propuesto supuso una mejora global de la precisión respecto a un método de clasificación supervisada convencional del 20% para la zona de estudio en 2009, y con un coste operacional muy bajo.

Palabras Clave: SIGPAC, clasificación, NDVI, Landsat, mapa de usos y coberturas de suelo.

ABSTRACT

The aim of this work consists on retrieving a land use-land cover map in order to integrate it in a water balance model along 2009. The results of this application, i.e., evapotranspiration, soil moisture, irrigation rates, are obtained at field scale, in a daily basis, and over the most representative agricultural uses. The model is implemented in a computerized tool, HidroMORE, which provides image maps of the results.

A hybrid alternative of classification is presented for such hydrological application. It consisted in a combination of the vectorial database from the Spanish Geographic Information System for Agricultural Plots (SIGPAC) and a Landsat 5 TM multitemporal series of images for the year of study. The SIGPAC affords the spatial shape of the plots, whereas the images allow the segmentation of some ambiguous categories, i.e., 'agricultural plots'. Remote sensing techniques (classification, segmentation, and NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) were used, as well as GIS tools. The proposed method improved by 20% the global accuracy

comparing to a typical supervised classification in the study area along 2009, while the computational cost is low.

Key Words: SIGPAC, classification, NDVI, Landsat, maps of land use and land cover

INTRODUCCIÓN

La obtención de mapas de usos y/o coberturas de suelo es una de las necesidades más recurrentes en las aplicaciones de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica en multitud de ámbitos de aplicación. Debido a la falta de mapas actualizados y precisos para cada aplicación concreta, es frecuente recurrir a la clasificación de imágenes de satélite, que proporcionan mapas ajustados espacial y temporalmente a las necesidades del usuario.

Bajo el término de clasificación, en teledetección, se agrupan un conjunto de técnicas cuya finalidad es la asignación de los píxeles a un número reducido de clases y, en consecuencia, la transformación a un mapa de categorías. Lo que hace más atractivo el procedimiento de clasificación es la facilidad para el usuario de controlar el proceso para que el mapa derivado recoja las clases de interés (Foody et al., 2006) y proporcione un mapa actualizado y realista, adaptado a las necesidades de la aplicación. En el caso de una aplicación hidrológica, los usos y/o coberturas de suelo juegan un papel crítico en el balance hídrico, controlando la porción de agua que se reparte entre infiltración, escorrentía y evapotranspiración (Earls y Dixon, 2006). Puesto que los parámetros que se esperan obtener de las imágenes clasificadas -altura, cobertura vegetal, profundidad de raíces- se derivan de los diferentes estados de la planta, parece adecuado buscar un método de discriminación de cultivos y superficies que se base en la evolución fenológica temporal. Para muchos autores, la magnitud física derivada de las imágenes que mejor describe la evolución fenológica y los parámetros biofísicos de los cultivos son los índices de vegetación (Moran et al., 1997), y el NDVI es el método más efectivo para derivar tipos de cobertura vegetal (Cihlar et al., 1996). El desarrollo fenológico para la discriminación de clases de vegetación y coberturas del suelo ha sido caracterizado desde hace años a través de series multitemporales de NDVI (Lloyd, 1990, DeFries et al., 1995, Hill et al., 1999, Latifovic et al., 2004, Brooks et al., 2006, Wardlow et al., 2007). Una vez obtenido el mapa a partir de la clasificación de imagen, los parámetros del modelo se asignan como valores tabulados para cada clase (Earls y Dixon, 2006).

Por otra parte, la relación de la base de datos espacial del SIGPAC con el mundo de la teledetección está siendo usada en España para el control de superficies de regadío (CHG, 2008), la clasificación de imágenes radar (Larrañaga et al., 2009), y, de forma general, para la actualización de mapas temáticos en distintos ámbitos administrativos. La sinergia del SIGPAC con la teledetección se basa en que el primero aporta la definición parcelaria precisa, y las imágenes la variedad espectral y temporal. Si además es posible realizar combinaciones espectrales para calcular índices de vegetación a lo largo del tiempo, las imágenes permiten la discriminación de tipos de uso o de clases de vegetación que no aparecen en el SIGPAC y que son específicas para la aplicación.

Para la verificación de resultados del mapa de clases, el procedimiento habitual es usar bien puntos o parcelas 'verdad terreno', bien un mapa de referencia; y sobre ellos, en un caso u otro, realizar el control estadístico de evaluación de los resultados en la matriz de errores como *kappa* (Lillesand y Kiefer, 1999) y/o tests de significación estadística (Hubert-Moy et al., 2001, Castilla y Hay, 2006, Joshi et al., 2006). El procedimiento con puntos de control ha sido utilizado para validar el procedimiento híbrido, pero también sobre una clasificación supervisada multitemporal por el método de Máxima Verosimilitud (MV), para comparar el resultado de ambos.

ZONA DE ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA LEYENDA

La zona de estudio comprende una superficie de unos 1300 km², de dimensiones lineales 30x40 km, situada entre las coordenadas geográficas (41°31',-5°43') y (41°04',-5°03'), entre el SE de la provincia de Zamora y pequeños sectores de las provincias de Valladolid y Salamanca. El clima es mediterráneo continental y los usos son preferentemente agrícolas en régimen de secano, con zonas de regadío y viña. También hay manchas de pináceas y encinares. En términos generales, puede decirse que los cultivos de secano y regadío tienen ciclos opuestos en la zona de estudio (Figura 1).

Para la selección de la leyenda se han integrado varios criterios. El primero, que la evolución temporal de la cobertura vegetal sea similar (basando dicha evolución en las curvas de NDVI); el segundo, que las clases sean representativas en la zona; y el tercero, que tengan repercusión en el uso del agua. Finalmente, se han escogido seis clases: cultivos de secano, cultivos de regadío, improductivo, agua, viña, y forestal-pradera.

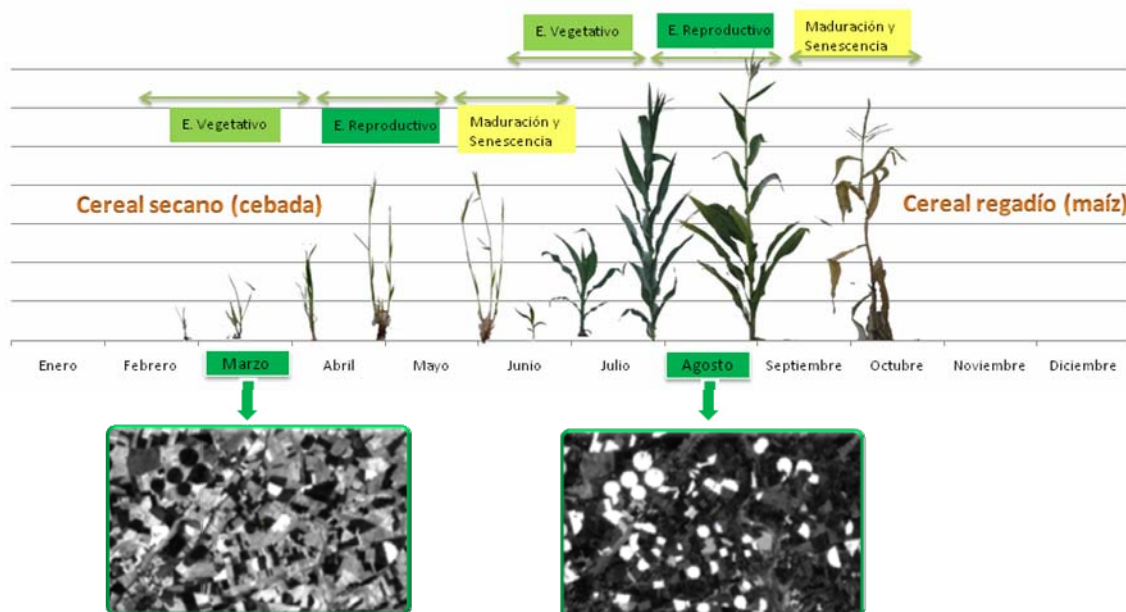


Figura 1. Ciclos fenológicos de secano (cebada) y regadío (maíz) en la zona de estudio, con dos fragmentos de los NDVIs de marzo y agosto correspondientes a los máximos de ambos cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Imágenes Landsat 5 TM y SIGPAC. Tratamiento preliminar

Se recopilaron todas las posibles imágenes Landsat, que para 2009 proceden del sensor Landsat 5 TM, escena 202-031. Tras desechar imágenes por nubosidad, la serie se redujo a tres imágenes, de fechas 23 de marzo, 11 de junio y 30 de agosto, que cubren los períodos más significativos de las clases de estudio, primavera (secano) y verano (regadío y viña). Se ortorrectificaron por el método modelo riguroso propuesto por Toutin (2004), que implica, además de la colección de un número de puntos de control terreno de coordenadas conocidas, el modelo digital de elevaciones y los parámetros orbitales del sensor. El resultado de este proceso arrojó una precisión espacial para las tres imágenes por debajo del píxel, límite que resulta adecuado para un correcto registro de todas las imágenes (Wolfe et al., 2002, Shimabukuro et al., 2004, Schroeder et al., 2006).

Por otra parte, para asegurar una homogeneidad radiométrica entre las imágenes de las distintas fechas, se realizó la calibración de los niveles digitales de entrada con los coeficientes del sensor, se transformaron a reflectividades con los parámetros de la adquisición y se aplicó corrección por objeto oscuro (Chavez, 1989, 1996). A continuación se calculó el NDVI (Rouse et al., 1974) para cada fecha y se compuso una única imagen con los tres NDVIs juntos, la cual constituye el input de las clasificaciones.

2. Estudio preliminar de las clases: SIGPAC

Mediante la herramienta de consulta a tablas se separaron los usos SIGPAC conforme a la leyenda elegida: agua (clase SIGPAC corrientes y superficies de agua), tierra arable, improductivo (que agrupa recintos de las zonas urbanas, viales e improductivo), forestal-pradera (que agrupa el pastizal, matorral arbolado, prado arbustivo y forestal) y viña. Con esos recintos se confeccionaron sendas máscaras vectoriales y se intersectó la serie NDVI con los recintos de cada clase. De esta forma es posible obtener las imágenes exclusivamente con los píxeles de cada clase, lo que permite estudiar, por ejemplo, la evolución del NDVI para cada una por separado (Figura 2).

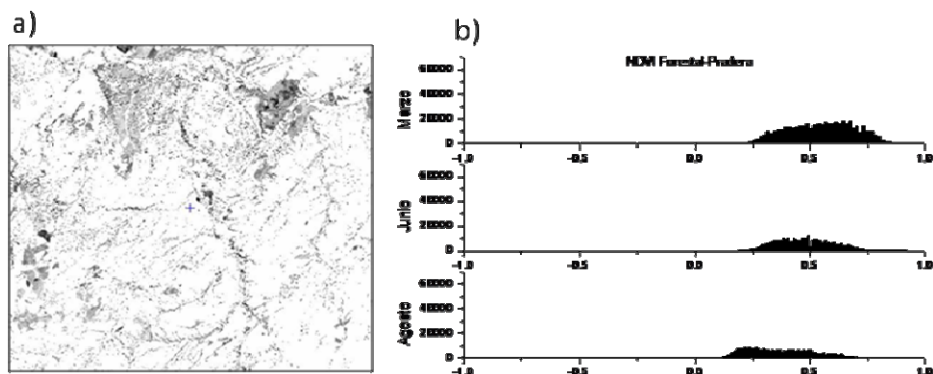


Figura 2. NDVI del mes de marzo para la clase forestal-pradera tras la intersección con los recintos SIGPAC de esa clase (a). Histograma de los tres NDVIs para esa clase (b).

Con el fin de estudiar las clases de regadío y secano, englobadas ambas bajo la categoría SIGPAC ‘tierra arable’, se estudió la evolución de los valores de NDVI para cada una, tras tomar una muestra de parcelas en campo con GPS (20 puntos secano y 15 regadío) (Figura 3 y Tabla 1).

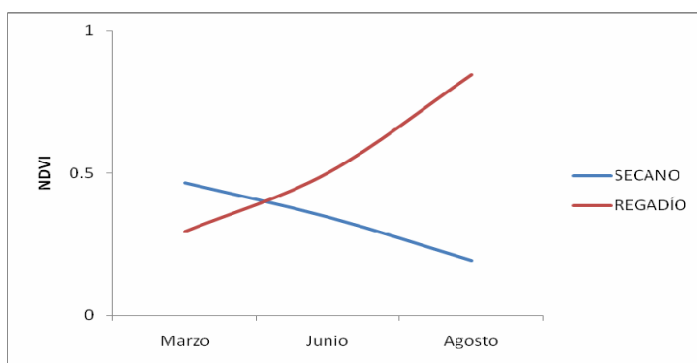


Figura 3. Evolución de los NDVI de la media de puntos de la muestra para las clases de secano y regadío.

Tabla 1. Promedios de valores de NDVI para secano, regadío y barbecho.

NDVI promedio	Marzo	Junio	Agosto
SECANO	0.47	0.35	0.19
REGADÍO	0.29	0.50	0.85

3. Métodos de clasificación

3.1. Método de clasificación multitemporal supervisada por el algoritmo de MV

Es un método frecuentemente usado para obtener los mapas de usos y clases de suelo, y en el presente caso se aplica a los tres NDVIs, tomados como bandas; en coherencia con la estrategia multitemporal. La signatura espectral, que describe la respuesta de cada clase a las diferentes bandas del sensor, es sustituida por la signatura temporal: la respuesta, en términos de NDVI, en las diferentes fechas del año. El método implica además el conocimiento de unas parcelas, puntos o áreas de entrenamiento en las que se ha de tener un conocimiento preciso de la cobertura en las fechas de adquisición de la imagen, datos que se tomaron en 2009.

3.2. Método híbrido

El método propuesto combina la base vectorial SIPAC con la serie multitemporal Landsat 5 TM para la extracción de las clases. En primer lugar se separaron los píxeles resultantes de la intersección con los recintos SIGPAC. Por otra parte, como el modelo hidrológico requiere la discriminación del régimen hidrológico de los cultivos englobados bajo la clase 'tierra arable', es necesario separar el uso seco del regadío. Para ello se recurrió a la segmentación de los NDVIs de esa clase siguiendo el modelo -adaptado a las características de la zona de estudio- de Vincent y Pierre (2003), que agrupa las formaciones vegetales en función de los valores numéricos de la serie multitemporal de NDVI. El método consiste en aplicar un algoritmo que agrupe los píxeles en función de valores significativos iguales (máximos y mínimos en cada fecha de NDVI) de las clases seco y regadío, habida cuenta de que tienen ciclos inversos (Figura 3). Los píxeles que no responden a ese patrón se consideraron como barbecho, tierra arable no cultivada en todo el año. Este proceso se realizó en PCI Geomatica 10.0 mediante la herramienta de modelado. Finalmente, la unión de las capas resultantes de las segmentaciones forma el mapa de usos (Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación supervisada por el algoritmo de MV (Figura 5a) arroja un resultado de kappa de 0.82 y una precisión media de 94.6%. El estadístico kappa expresa el error proporcional generado por el proceso de clasificación respecto a una clasificación aleatoria (Jiang et al., 2004), y aquí se utiliza para evaluar la precisión del proceso para las áreas de entrenamiento, al igual que la precisión media.

Además, tanto para el mapa resultante de la metodología híbrida (Figura 5b) como para el anterior se realizó una validación cruzada. Para ello se tomó una muestra de puntos verdad terreno con GPS en 150 parcelas. Esta comprobación consiste en estudiar la coincidencia de las zonas clasificadas con las clases del mapa, y permitió comparar el error para ambos procedimientos (Tabla 2).

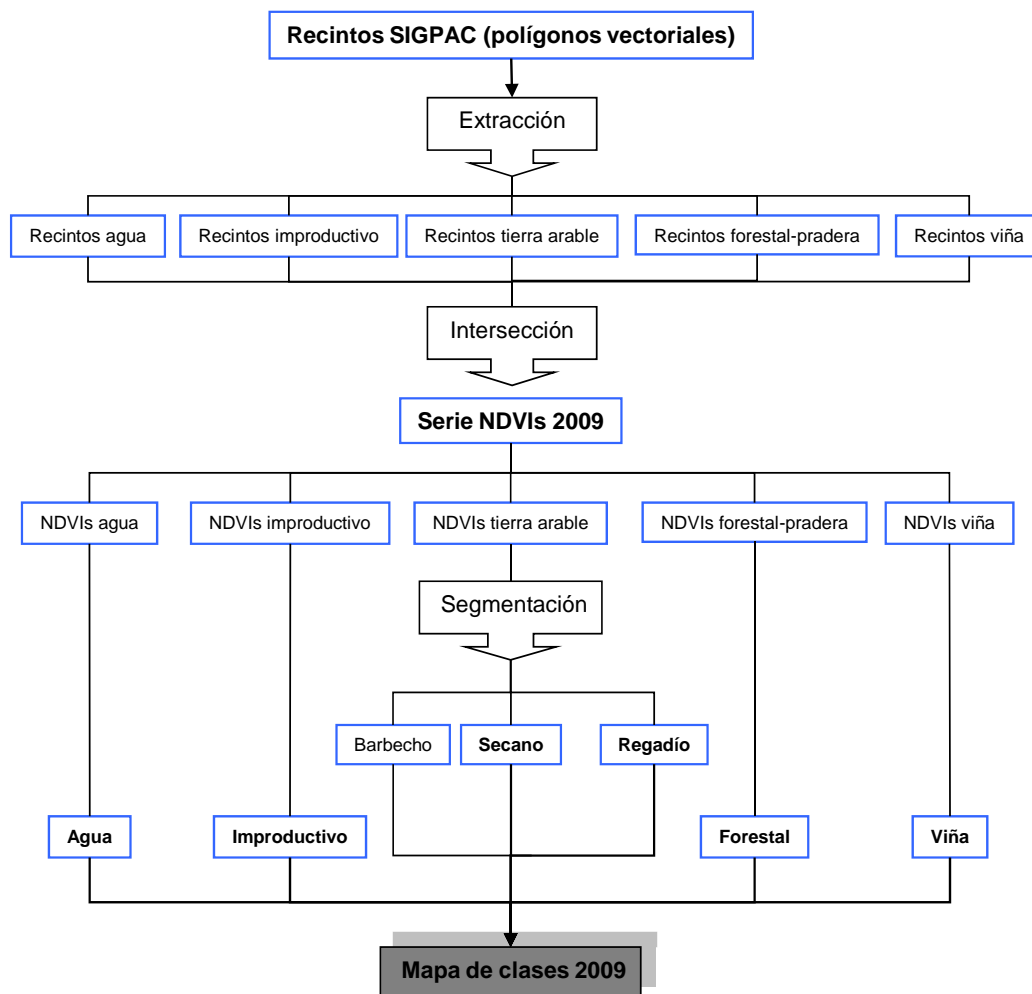


Figura 4. Flujo de trabajo para la extracción del mapa de clases mediante la estrategia híbrida.

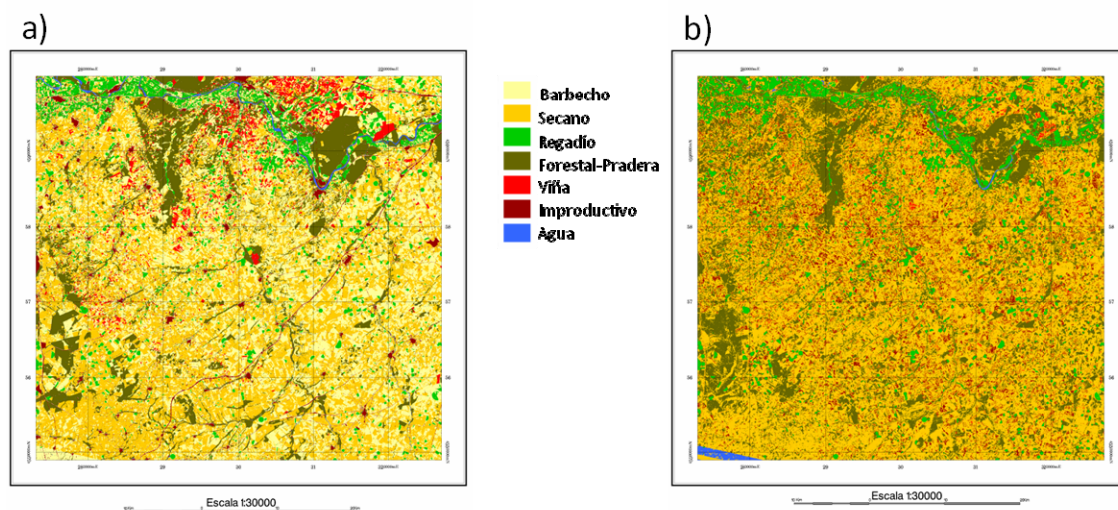


Figura 5. Mapa resultante del proceso híbrido de clasificación.

Tabla 2. Porcentaje de acierto de los dos métodos de clasificación para las categorías de estudio.

% Acierto	Agua	Forestal-pradera	Viña	Secano	Regadío	Improductivo	TOTAL
MV	50	57.1	58.8	76.9	100	61	66.2
Híbrido	100	85.7	76.5	84.6	100	90	86.8

El mapa híbrido, a la vista de los porcentajes de acierto en las áreas verdad terreno, resulta más exacto que el resultante de la MV para todas las categorías, excepto para el regadío, clase en la que ambos mapas aciertan en un 100% de las áreas. El regadío produce una respuesta espectral muy fuerte del NDVI en verano, fechas en la que además no hay otra cobertura con ese vigor vegetativo. El agua es difícilmente perceptible sin la ayuda de la definición vectorial, pues los cursos de agua son estrechos, salvo en alguna zona del río Duero, y además están recubiertos en gran parte por vegetación de ribera. La viña es la clase más confusa en el proceso híbrido y la peor junto con forestal-pradera en la MV, lo que indica la dificultad de su extracción en cualquier caso. Resulta especialmente difícil de extraer en la estrategia convencional, porque dado el marco de plantación típico de la zona (3x3 m), se comporta como suelo desnudo a la resolución de 30 m del sensor TM, incluso en la época de máxima actividad vegetativa (además suelen ser viñas viejas y pequeñas, de baja productividad). En este caso, el enfoque híbrido resulta imprescindible para distinguir esta clase, aunque se puedan producir errores por cambio del uso declarado (los datos del SIGPAC son de 2002). También es imprescindible para distinguir las áreas de barbecho de las improductivas, que además producen mucho error en el mapa MV. En este mapa, la clase improductiva produce un ambiguo efecto de dispersión de píxeles, al mezclar suelos agrícolas sin cultivar con zonas verdaderamente improductivas.

El porcentaje medio explica el número de píxeles bien clasificados del total de píxeles de la muestra, y toma un valor de 66.2 % para el mapa supervisado por MV y de 86.8% en el híbrido. El límite teórico de este porcentaje que desaconseja el uso del mapa se estima en torno al 85% (Anderson et al., 1976), umbral definido en los albores del uso de imágenes de satélite. Para la estimación de los parámetros de vegetación en el modelo hidrológico, el porcentaje de acierto del primero es muy bajo, y produciría un fuerte enmascaramiento del cálculo del balance de agua. En términos generales, además, una clasificación probabilística basada en la MV resulta insuficiente con tres fechas, y sería necesario incorporar bandas espectrales además de los NDVIs, lo cual constituye una estrategia frecuente que mejora la precisión (Cihlar et al., 1996, Wilson y Sader, 2002).

El mapa híbrido es más prolijo que el de MV, pues permitiría extraer cualquier categoría SIGPAC. Pero además, al combinarse con la serie multitemporal de NDVIs, permite distinguir entre categorías como el improductivo permanente e improductivo por barbecho. Estas clases no tienen repercusión desde el punto de vista hidrológico, pero sí lo tienen el secano y el regadío, mucho mejor definidas en la estrategia híbrida que en la simple clasificación por MV. Además, la segmentación multitemporal permite evitar zonas o bandas problemáticas, como ocurre aquí en la zona SW del mapa obtenido por MV, donde la escena original no cubre la zona de estudio en la fecha de agosto y se clasifica erróneamente como agua.

Respecto a la validación, el control puntual puede enmascarar el resultado de la clasificación. Podría producirse que, teniendo ambos mapas un acierto similar en las parcelas verdad terreno, las diferencias en la distribución espacial de las clases fuera muy diferente; por tanto es difícil decidir cuál es mejor y serían necesario un control más generalizado por toda la imagen. Se deduce que un control de superficies podría ser complementario a un análisis a escala de parcela. Esto es evidente si comparamos el resultado de los dos mapas. La clase viña desaparece prácticamente en el mapa de máxima verosimilitud, y la categoría forestal-pradera es menor en cuanto a las manchas de bosque, pero se detecta una errónea distribución salpicando toda la imagen.

El proceso de segmentación es complementario a la extracción vectorial de parcelas, y es adecuado para separar píxeles que tengan un comportamiento a lo largo del tiempo muy diferenciado, es decir, para clases que tengan ciclos fenológicos marcados y opuestos entre clases, como es el caso del regadío y el secano (Sánchez, 2009).

CONCLUSIONES

Tras la evaluación de resultados, se observa un menor error en el mapa obtenido por el método híbrido de clasificación frente al método aplicado únicamente sobre las imágenes, tanto en la verificación puntual de aciertos en la clasificación, como en la definición parcelaria, imposible en la segunda. Desde el punto de vista cualitativo, el método es capaz de discriminar mayor número de clases y con una distribución espacial más coherente con la realidad. La combinación del mundo vectorial del SIGPAC junto con el apoyo de la secuencia multispectral de imágenes proporciona un método óptimo para la obtención de mapas de usos y coberturas de suelo, bajo un mínimo coste computacional. El método es especialmente útil cuando se trata de discriminar coberturas vegetales con ciclos fenológicos marcados y opuestos entre sí. Además, resulta imprescindible si se trata de discriminar usos difícilmente identificables en las imágenes, como la viña. Por su parte, el mapa resultante de una clasificación multitemporal supervisada por el método de MV con tres fechas muestra una baja coincidencia con las áreas verdad terreno (66.2%), por lo que sería inadecuado para la aplicación hidrológica.

La creciente disponibilidad de bases de datos cartográficas en distintos formatos refuerza la convergencia entre los datos y métodos de SIG vectoriales y los de teledetección. En una futura aplicación se pretende profundizar en el uso de ambas fuentes de datos en la segmentación automática de clases de usos y coberturas de suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible mediante la financiación de los proyectos del Ministerio de Ciencia y Tecnología REN2003-02956/HID, CGL2008-04047, ESP2006-00643 y ESP2007-65667-C04-04 y el proyecto AGRIHMOD del ITACyL. Los autores agradecen a la Junta de Castilla y León la información SIGPAC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brooks, C. N., Schaub, D. L., Powell, R. B., French, N. H. F. y Shuchman, R. A. (2006): Multi-temporal and multi-platform agricultural land cover classification in Southeastern Michigan. *ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada.
- Castilla, G. y Hay, G. J. (2006): Uncertainties in land use data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, pp. 3439–3472.
- Cihlar, J., Ly, H. y Xiao, Q. (1996): Land Cover Classification with AVHRR Multichannel Composites in Northern Environments *Remote Sensing of Environment*, 58, 36-51.
- Chavez, P. S., Jr. (1989): Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 55(9), pp. 1285-1294.
- Chavez, P. S., Jr. (1996): Image-based atmospheric corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62 (9), pp. 1025-1036.
- CHG (2008): Plan Especial del Alto Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MARM, BOE-A-2008-1265.
- DeFries, R. S., Hansen, M. y Townshend, J. R. G. (1995): Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 54, pp. 209–222.
- Earls, J. y Dixon, B. (2006): A comparative study of Landsat 5 TM land use classification methods including unsupervised classification, artificial neural network and support vector machine for use in a simple hydrologic budget model. *ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada.
- Foody, G. M., Mathur, A., Sanchez-Hernandez, C. y Boyd, D. S. (2006): Training set size requirements for the classification of a specific class. *Remote Sensing of Environment*, 104, pp. 1–14.
- Hill, M. J., Vickery, P. J. y Furnival, E. P. (1999): Pasture Land Cover in Eastern Australia from NOAA-AVHRR NDVI and Classified Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 67, pp. 32-50.
- Hubert-Moy, L., Cotonnec, A., Le Du, L., Chardin, A. y Perez, P. (2001): A comparison of parametric classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, 75, pp. 174-187.
- Jiang, H., Strittholt, J. R., Frost, P. A. y Slosser, N. C. (2004):The classification of late seral forests in the Pacific Northwest, USA using Landsat ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment* , 91, pp. 320–331.
- Joshi, P. K., Roy, P. S., Singh, S., Agrawal, S. y Yadav, D. (2006): Vegetation cover mapping in India using multi-temporal IRS Wide Field Sensor (WiFS) data. *Remote Sensing of Environment* 103, pp. 190–202.

- Larrañaga, A., Albizua, I. y Álvarez-Mozos, J. (2009): Clasificación de cultivos en la zona media de Navarra mediante imágenes radar polarimétricas. *Mapping Interactivo. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra* 138.
- Latifovic, R., Zhub, Z.-L., Cihlar, J., Giri, C. y Olthof, I. (2004): Land cover mapping of North and Central America-Global Land Cover 2000. *Remote Sensing of Environment*, 89, pp. 116–127.
- Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W. (1999): *Remote sensing and image interpretation*. New York, John Wiley and Sons. 384 pp.
- Lloyd, D. (1990): A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 11, pp. 2269–2279.
- Moran, S., Inoue, Y. y Barnes, E. (1997): Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment* 61, pp. 319-346.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., Deering, D. W. y Harlan, J. C. (1974): Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III. Greenbelt, MD, NASA/GSFC, pp. 371.
- Sánchez, N. (2009): Teledetección óptica aplicada a un modelo distribuido de balance hídrico (HIDROMORE) para el cálculo de evapotranspiración y humedad de suelo. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Ávila, Universidad de Salamanca, pp. 408 pp.
- Schroeder, T. A., Cohen, W. B., Song, C., Canty, M. J. y Yang, Z. (2006): Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103, pp. 16-26.
- Shimabukuro, Y. E., Aragão, L. E. O. C., Espirito-Santo, F. D. B. y Williams, M. (2004): Combining Landsat ETM+ and terrain data for scaling up leaf area index (LAI) in eastern Amazon: an intercomparison with MODIS product. *Proceedings of IGARSS 2004*.
- Toutin, T. (2004): Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods (review paper). *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10), pp. 1893-1924.
- Vincent, S. y Pierre, F. (2003): Identifying Main Crop Classes in an irrigated area using High Resolution Image Time Series. *Proceedings of IGARSS 2003*.
- Wardlow, B. D., Egbert, S. L. y Kastens, J. H. (2007): Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), pp. 290-310.
- Wilson, E. H. y Sader, S. A. (2002): Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 385– 396.
- Wolfe, R. E., Masahiro, N., Fleig, A. J., Kuyper, J. A., Roy, D. P. y Storey, J. C. (2002): Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment* ,83, pp. 31– 49.