

Clasificación de cultivos en la zona media de Navarra mediante imágenes radar polarimétricas

Crop classification in central Navarre using polarimetric radar data

A. Larrañaga¹, L. Albizua¹ y J. Álvarez-Mozos²
alarranaga@tracasa.es

¹ Tracasa. Departamento de Sistemas de Información Territorial. C/ Cabárceno, 6. 31621 Sarriguren. Navarra

² Universidad Pública de Navarra. Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural. Los Tejos. Arrosadía, s/n. 31006 Pamplona. Navarra

Recibido el 8 de marzo de 2010, aceptado el 6 de octubre de 2010

RESUMEN

Navarra lleva años empleando la técnica de clasificación supervisada de imágenes multiespectrales de satélite para la realización de la estadística agraria. La cubierta nubosa, muy habitual en esta zona, limita e incluso imposibilita el uso de imágenes ópticas para este fin. Los sensores radar representan una alternativa interesante, dado que a las longitudes de onda que trabajan, la cobertura nubosa es transparente, por lo que la nubosidad no supone ningún tipo de limitación para su empleo. Por otro lado, los sensores radar de nueva generación (por ejemplo ALOS/PALSAR o RADARSAT-2), incorporan mejoras importantes respecto a sus predecesores (ERS-1/-2 o RADARSAT-1). En lo que respecta a la clasificación de cultivos, los sensores radar que adquieren imágenes en múltiples polarizaciones resultan especialmente interesantes.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad del empleo de observaciones de teledetección radar de polarización múltiple en la clasificación de cultivos de la zona media de Navarra. Para ello, se han utilizado dos imágenes ALOS/PALSAR. Una vez realizado un detallado análisis polarimétrico, se han obtenido las firmas o firmas de los distintos cultivos de secano y de regadío por separado y se ha realizado una clasificación supervisada. La clasificación obtenida se ha comparado con la verdad campo resultando en un índice Kap-

ABSTRACT

Supervised classifications using optical remote sensing data have been used in the region of Navarre (Spain) for many years to obtain data for the elaboration of the annual crops statistics. However, cloud cover very frequent in this area limits and even prevents the use of optical data for this scope. Radar remote sensing represents an interesting alternative, since at its wavelengths, the cloud cover is transparent; not implying any limitation. Furthermore, the new generation of radar sensors (ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 for example), incorporate significant improvements over their predecessors (or ERS-1/-2 RADARSAT-1). Finally, for crop classification, radar sensors that acquire images in multiple polarizations are particularly interesting.

The main objective of this study was to evaluate the feasibility of polarimetric radar observations for crop classifications in central Navarre. For this, two ALOS/PALSAR observations have been used. A detailed polarimetric analysis, polarimetric signatures of different crops under dryland and irrigation conditions were the previous step to the supervised classification performed. The result crop classification was compared with reference ground data, obtaining an overall Kappa and accuracy of 0.52 and 85% respectively.

pa y fiabilidad global de 0,52 y 85% respectivamente.

PALABRAS CLAVE: teledetección radar, polarimetría, clasificación supervisada, clasificación por parcela, retrodispersión.

KEY WORDS: radar remote sensing, polarimetry, supervised classification, parcel-based classification, backscatter.

AANTECEDENTES

Los sensores radar emiten un pulso de radiación hacia la superficie terrestre y reciben el pulso de retorno (o retrodispersión). La señal de retorno que capta el sensor depende de las características de las cubiertas observadas y de la configuración del propio sensor. Los parámetros principales de la configuración de un sensor son la frecuencia o banda en que trabaja, el ángulo de incidencia que forma el haz de radiación emitido con la vertical y la polarización de la radiación emitida y recibida por el sensor (Ulaby y Elachi, 1990). La polarización hace referencia a la orientación del campo eléctrico de la radiación electromagnética, que básicamente puede ser vertical (V) u horizontal (H). Por lo tanto, el canal de un sensor que emite y recibe en la polarización H se denomina HH, mientras que uno que emite en V y recibe en H se denomina VH.

Los primeros sensores radar que se pusieron en órbita (ERS-1/-2, RADARSAT-1 y JERS) fueron (salvo alguna excepción) sensores de configuración simple. Éstos, trabajaban en una única banda (frecuentemente la banda C, con una frecuencia cercana a los 5 GHz) y con una única polarización (generalmente directa, HH o VV). En consecuencia, estos sensores proporcionan un único canal por cada imagen adquirida, lo que ha supuesto una limitación de cara a su uso para la clasificación de cubiertas (Lee *et al.*, 2001).

Los sensores radar de nueva generación (por ejemplo ALOS/PALSAR o RADARSAT-2) incorporan mejoras importantes. Entre otras, resulta especialmente interesante la capacidad de los sensores de adquirir información en múltiples polarizaciones. La adquisición simultánea de imágenes en varias polarizaciones resulta útil para interpretar y clasificar el terreno dado que se añaden canales con información adicional interesante que permiten caracterizar las propiedades físicas de la superficie observada de for-

ma mucho más completa. Esto ha hecho que en los últimos años se estén empleando este tipo de observaciones en diferentes aplicaciones como en agricultura, silvicultura, hidrología etc. (Ouarzeddine *et al.*, 2007).

Como ya se ha comentado, la retrodispersión es función de la configuración del sensor, pero también de características de las cubiertas como su geometría y comportamiento dieléctrico. Por consiguiente, son observaciones que ofrecen una información distinta y complementaria a la obtenida por los sensores ópticos.

Los radares polarimétricos recogen la completa caracterización de la dispersión en todas las configuraciones de polarización (HH, VV, HV y VH). En cada polarización el sensor recibe la amplitud y fase del pulso de radiación proveniente del terreno, traduciéndose en un total de ocho canales distintos. Con esta información de partida es posible calcular parámetros interesantes como los ratios entre diferentes canales, su grado de correlación (o coherencia) o las diferencias entre las fases. También es posible emplear algoritmos de descomposición, que permiten descomponer las observaciones en parámetros que ofrecen una interpretación física de la interacción ocurrida (por ejemplo dispersión superficial, dispersión de volumen o doble rebote) (Freeman y Durden, 1992; Lee *et al.*, 1999; Ouarzeddine *et al.*, 2007). Las descomposiciones se pueden utilizar para interpretar la naturaleza de las cubiertas e incluso realizar clasificaciones no supervisadas (Alberga, 2007; Rodrigues *et al.*, 2003). Aunque en esta línea se hayan producido avances significativos, se ha visto que lo mejor es hacer un uso combinado de los algoritmos de descomposición y de herramientas estadísticas para realizar clasificaciones de terreno de forma más fiable (Cloude y Pottier, 1997; Ouarzeddine *et al.*, 2007).

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad del empleo de observaciones de teledetección radar de polarización múltiple



Figura 1. La zona sombreada indica el área de estudio. Este área está definida por la zona común de las dos imágenes ALOS PALSAR utilizadas.

en la clasificación de cultivos de la zona media de Navarra.

INFORMACIÓN DE PARTIDA

El estudio se ha llevado a cabo en la zona media de la Comunidad Foral de Navarra (España) (Fig. 1). Las zonas agrícolas de interés de este área están ocupadas por cultivos herbáceos de secano y de regadío, siendo mayoritarios los primeros (Fig. 2a, Tabla 1).

Se ha trabajado con dos imágenes radar de primavera del año 2007 (Fig. 2b), captadas por el satélite de observación japonés ALOS. Dicho satélite, lanzado en 2006 por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA), está compuesto de 3 sistemas independientes (PRISM: Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping, AV-NIR-2: Advanced Visible and Near Infrared Ra-

	Superficie (ha)
Secano	53.989
Regadío	3.147
Total	57.135

Tabla 1. Superficie de las parcelas agrícolas clasificadas.

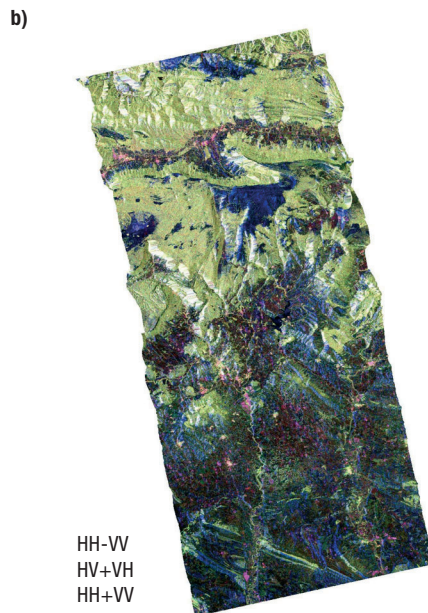
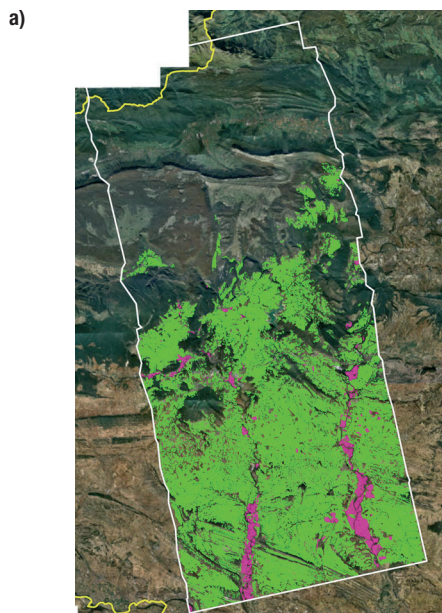


Figura 2. a) Parcelas agrícolas del SIGPAC de secano (en verde) y de regadío (de rosa) que se han clasificado. b) Imagen de ALOS de mayo en representación de Pauli.

diometer-2nd generation, PALSAR: Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) pudiéndose adquirir simultáneamente imágenes ópticas e imágenes radar con diversas resoluciones y coberturas. JAXA tiene definido un plan de adquisición a partir de criterios climáticos y con el objetivo de crear un archivo mundial de imágenes complementarias. Esta estrategia de adquisición está establecida para los próximos años y es prioritaria sobre el conjunto de otras peticiones (a excepción de las adquisiciones urgentes y puntuales que podrían surgir para el seguimiento de grandes catástrofes).

El sensor PALSAR es un Radar de Apertura Sintética que trabaja en la banda L y es capaz de adquirir datos de hasta 10 m de resolución con ángulos de incidencia entre 20° y 55°. Tiene cuatro modos de adquisición (cada uno de ellos con una determinada resolución, cobertura y polarización), cada uno de los cuales está activo durante un ciclo completo de adquisición de 46 días.

Las imágenes captadas por PALSAR son muy interesantes en cuanto a resolución, modos de adquisición e incluso desde el punto de vista económico. No obstante, presentan una serie de limitaciones a tener en cuenta:

- Tal y como se ha comentado anteriormente, presenta problemas en cuanto a su disponibilidad y dificultades para una programación específica.
- El modelo de ortorrectificación no está incorporado en los softwares comerciales utilizados (aunque existen programas gra-



Figura 3. Detalle del nivel de precisión del SIGPAC utilizado.

tuitos que permiten hacerlo, no obstante presentan importantes limitaciones).

Las características de las dos imágenes utilizadas en este estudio se detallan en la Tabla 2.

Como información auxiliar se ha utilizado el SIGPAC 2007, que nos garantiza un ajuste muy preciso de la superficie agrícola. El SIGPAC contiene información detallada de los usos de cada parcela (Fig. 3). Además también se cuenta con información sobre las inspecciones de las declaraciones PAC que se utilizan como verdad campo (VC), junto con visitas a campo diseñadas específicamente para tener suficiente representatividad de los cultivos. El tamaño de las parcelas de secano y regadío varían entre 300 y 300.000 m² y 600 y 100.000 m² respectivamente aunque la mayoría de las parcelas tanto de secano como de regadío oscilan entre los 2.000 y 4.000 m² siendo las parcelas de regadío algo más pequeñas. Toda esta información de verdad campo se ha utilizado para seleccionar las bandas más importantes y para crear las firmas espectrales de los cultivos a clasificar.

ALOS		
Fecha adquisición	25-III-2007	10-V-2007
θ (centro escena)	23,873°	
Sensor	PALSAR	
Banda	L (1,27 GHz)	
Modo adquisición	Polarimétrico	
Órbita	Ascendente	
Tamaño píxel en slant range (m)	9*4 (rango*azimut)	

Tabla 2. Características de las imágenes ALOS/PALSAR utilizadas. θ indica el ángulo de incidencia.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La Figura 4 muestra el flujo de trabajo llevado a cabo.

Preproceso

En esta primera fase, se ha realizado el filtrado del ruido speckle y se han creado nuevas bandas a partir de la información original filtrada de cada imagen (Fig. 5). El filtro utilizado ha sido el de Lee Adaptativo, con un tamaño de ven-

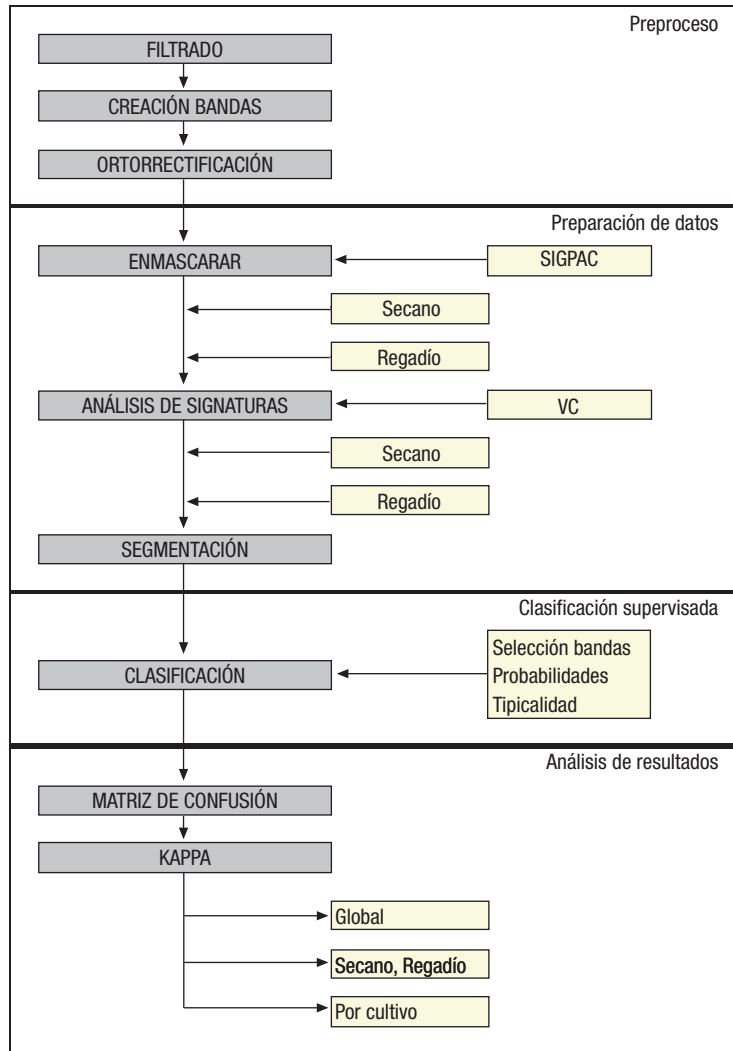


Figura 4. Flujo de trabajo.

tana de 3×3 . Las bandas creadas (σ°_{HH} , σ°_{HV} , σ°_{VV} , Span $\sigma^{\circ}_{HV}/\sigma^{\circ}_{VV}$, $\sigma^{\circ}_{RR}/\sigma^{\circ}_{RL}$, $|\rho_{HHVV}|$, ϕ_{HHVV} , H, α y A) pueden tener una interpretación física útil y han sido seleccionadas debido a que en estudios previos (Quegan *et al.*, 2003; Skriver *et*

al., 2005) han proporcionado resultados satisfactorios.

El coeficiente de retrodispersión (σ°) para cada polarización (HH, VH y VV), representa el ratio entre la potencia total recibida y la emitida ini-

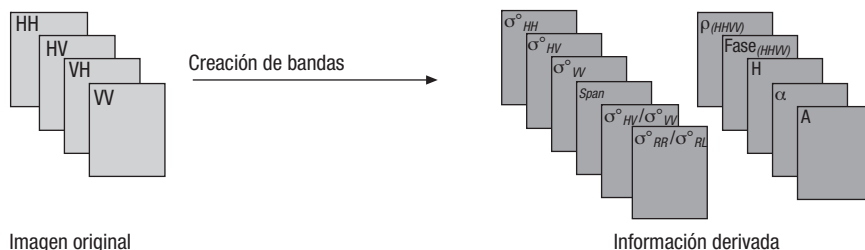


Figura 5. Representación de la fase de preproceso.

cialmente. Este coeficiente puede tomar valores diferentes en cada canal de polarización y esas diferencias se pueden interpretar en función de los 3 principales mecanismos de dispersión: (1) simple o especular, (2) doble o de rebote y (3) de volumen, que se relacionan con las características de las distintas cubiertas del terreno (agua, suelo urbano, forestal e incluso distintos cultivos, etc.). De esta forma y en términos generales se dice que σ°_{HV} es mayor para zonas forestales y urbanas debido a la dispersión por volumen, así como $\sigma^{\circ}_{HH} < \sigma^{\circ}_{VV}$ para dispersores orientados verticalmente (árboles, tallos, etc.) y viceversa para dispersores orientados horizontalmente. Sin embargo, el fenómeno de la extinción diferencial provoca que cultivos con elementos orientados verticalmente, además de poder tener mayor σ°_{VV} , también produzcan una mayor extinción (en dB/m) de la onda polarizada verticalmente a su paso por el medio. Dependiendo del tipo de escena, esto puede causar que la retrodispersión del canal HH (teniendo en cuenta el suelo y la interacción con la planta) sea mayor que la del VV, debido a la mayor atenuación de la onda polarizada verticalmente. Además de esto, tal y como se ha mencionado en el apartado de antecedentes y tal y como demuestran otros estudios (Quegan *et al.*, 2003; Skriver *et al.*, 1999), la señal de retorno del radar depende del ángulo de incidencia local que es función de la geometría de la adquisición y del relieve. Por lo tanto, se ha calculado el ángulo de incidencia local para cada píxel (a partir de los metadatos de la imagen y de un MDT de la zona) y con este ángulo se ha obtenido el coeficiente de retrodispersión (σ°) de cada canal de polarización.

El ratio de polarización cruzada tanto lineal como circular ($\sigma^{\circ}_{HV}/\sigma^{\circ}_{VV}$ y $\sigma^{\circ}_{RR}/\sigma^{\circ}_{RL}$) se utiliza para distinguir vegetación y suelo desnudo, así como distintos tipos de cultivos (Quegan *et al.*, 2003; Skriver *et al.*, 2005). La potencia total (Span) representa la suma de la potencia recibida por los cuatro canales y se suele utilizar en procesos de clasificación de la imagen ya que da una buena representación de la distribución espacial (contornos, zonas homogéneas, etc.) relacionados con el uso del terreno (Touzi *et al.*, 1992).

El módulo del coeficiente de correlación de polarización directa ($|\rho_{HHVV}|$), tal y como indica su nombre, representa la correlación entre los dos canales de polarización directa. Este parámetro se suele emplear para detectar depolari-

zación, cuando la dispersión de superficie es predominante su valor se acerca a 1 mientras que en cubiertas donde la dispersión de volumen predomina su valor es cercano a 0.

La diferencia de fase entre los dos canales copolarizados (ϕ_{HHVV}), representa el número de reflexiones o rebotes que sufre la onda, un valor de 0° corresponde a una única reflexión (o un número impar) y representa la dispersión superficial, mientras que un valor de 180° corresponde a rebotes dobles (o pares) que ocurren con reflectores de esquina. En los casos de superficies con vegetación donde predomina la dispersión por volumen, el valor de la diferencia de fase copolarizada puede oscilar entre los -180° y 180° dependiendo del tipo de vegetación y de la configuración del sensor.

Los tres últimos parámetros que quedan por mencionar, (entropía, alfa y anisotropía) reúnen la información polarimétrica y la descomponen en términos de los mecanismos de retrodispersión que se producen en las cubiertas, lo que está directamente relacionado con su naturaleza (Cloude and Pottier, 1996). La entropía (H) representa el grado de aleatoriedad o desorden estadístico de la dispersión. Varía entre 0, reflexiones de primer orden, y 1, mezcla aleatoria de mecanismos de reflexión. El ángulo alfa proporciona un valor relativo al mecanismo de retrodispersión dominante, oscila entre 0° , dispersión superficial y 90° , reflexión de esquina, con valores intermedios 45° ilustrando la dispersión de volumen. Por último, la anisotropía (A) cuantifica la proporción entre los dos mecanismos de dispersión no dominantes. Su valor varía entre 0 y 1 y da idea de la homogeneidad de la cubierta; valores bajos corresponden a cubiertas homogéneas y viceversa.

Las dos imágenes se han ortorrectificado en el sistema de referencia WGS84, UTM Huso 30, remuestreando las imágenes por medio del algoritmo de convolución cúbica a tamaño de píxel de 10 m. El modelo digital de terreno (MDT) utilizado ha sido de 5 m de resolución.

Preparación de datos

En una segunda fase, se han eliminado los estratos del SIGPAC que no interesan en este estudio, manteniendo solamente la tierra arable o

	σ_{HH}°	σ_{HV}°	σ_{VV}°	Span	$\sigma_{HV}^{\circ}/\sigma_{VV}^{\circ}$	$\sigma_{RR}^{\circ}/\sigma_{RL}^{\circ}$	$\rho_{(HHVV)}$	$\theta_{(HH-VV)}$	α	H	A
σ_{HH}°	—	0,39	0,90	0,97	-0,10	-0,09	0,12	0,00	-0,12	-0,20	0,06
σ_{HV}°		—	0,39	0,50	0,54	0,48	-0,36	0,00	0,44	0,42	-0,23
σ_{VV}°			—	0,96	-0,15	-0,13	0,16	0,00	-0,17	-0,22	0,02
Span				—	-0,05	-0,04	0,08	0,00	-0,08	-0,15	0,01
$\sigma_{HV}^{\circ}/\sigma_{VV}^{\circ}$					—	0,85	-0,75	0,00	0,88	0,86	-0,37
$\sigma_{RR}^{\circ}/\sigma_{RL}^{\circ}$						—	-0,91	0,00	0,95	0,90	-0,20
$\rho_{(HHVV)}$							—	0,00	-0,94	-0,90	0,05
$\theta_{(HH-VV)}$								—	0,00	0,00	0,00
α									—	0,95	-0,16
H										—	-0,24
A											—

Tabla 3. Matriz de correlación de la bandas estudiadas. En negrita se indican las bandas más correlacionadas.

parcelas agrícolas que incluyen los cultivos herbáceos de secano y de regadío (Fig. 2).

Con el fin de seleccionar las bandas más significativas, se han calculado las matrices de correlación (Tabla 3), se han analizado las firmas de la verdad campo de secano y regadío de cada imagen (Fig. 6) y finalmente se ha estudiado la separabilidad entre las bandas generadas (Fig. 7). Los valores de los parámetros estudiados en los gráficos de firmas (Fig. 6), están reescalados entre 0 y 100. Los valores mínimo y máximo utilizados para reescalar cada una de las variables estudiadas son los siguientes: de -180° a 180° para la diferencia de fase, de 0° a 90° para el ángulo alfa, de 0 a 0,5 los coeficientes de retrodispersión de polarización directa (HH y VV), de 0 a 0,1 el coeficiente de retrodispersión de polarización cruzada (HV) y de 0 a 1 el resto de variables estudiadas. Los resultados de estos tres análisis se han utilizado para seleccionar las bandas más interesantes para clasificar los cultivos.

La matriz de correlación (Tabla 3), muestra que la potencia total (Span) presenta una alta correlación con los coeficientes σ° de polarización directa. Tanto la entropía como el ángulo alfa muestran una gran correlación con los ratios de polarización cruzada lineal y circular ($\sigma_{HV}^{\circ}/\sigma_{VV}^{\circ}$ y $\sigma_{RR}^{\circ}/\sigma_{RL}^{\circ}$). También presentan una alta correlación entre sí la entropía y el ángulo alfa así como los ratios de polarización cruzada lineal y circular. El coeficiente de correlación de polarización directa ($|\rho_{HHVV}|$), también muestra una alta correlación, aunque negativa, con los ratios de polarización cruzada lineal y circular, la entropía y el ángulo alfa. La diferencia de fase (ϕ_{HHVV}) no está correlacionada con ninguna de las bandas, proba-

blemente debido al amplio rango de valores de ϕ_{HHVV} que pueden tomar las cubiertas vegetales. Por último, mencionar que la anisotropía tampoco muestra una buena correlación con ninguno de los parámetros estudiados.

Estudios anteriores realizados en Navarra (Lerános y Albizua, 2001) demostraron que al estratificar el territorio, se reducía la variabilidad del carácter estudiado, mejorando así las estimaciones obtenidas. En este trabajo, se ha seguido la estratificación propuesta en dicho estudio con lo que los cultivos de secano y de regadío se separan en distintos estratos.

Los cultivos de trigo, cebada y avena, tanto de secano como de regadío, muestran un comportamiento muy similar (Fig. 6), de modo que se han unido estas tres clases en una única clase (denominada CEREAL). En cuanto a los cultivos de regadío, destacan el girasol y el guisante ya que presentan una firma bastante diferente al del resto de los cultivos. En el caso de estos dos cultivos es muy probable que el suelo se encuentre aún desnudo en las fechas de adquisición de imágenes, por lo que el valor del coeficiente de correlación es alto y los ratios de polarización cruzada son bajos. De marzo a mayo, tanto en los cultivos de secano como en los de regadío se aprecia, en general, un ligero ascenso de los valores de los ratios de polarización cruzada así como un descenso de los valores del coeficiente de correlación debido a que al estar el cultivo más desarrollado, la dispersión por volumen aumenta.

La separabilidad entre cultivos, se ha calculado para cada banda a partir de los datos de firmas generados.

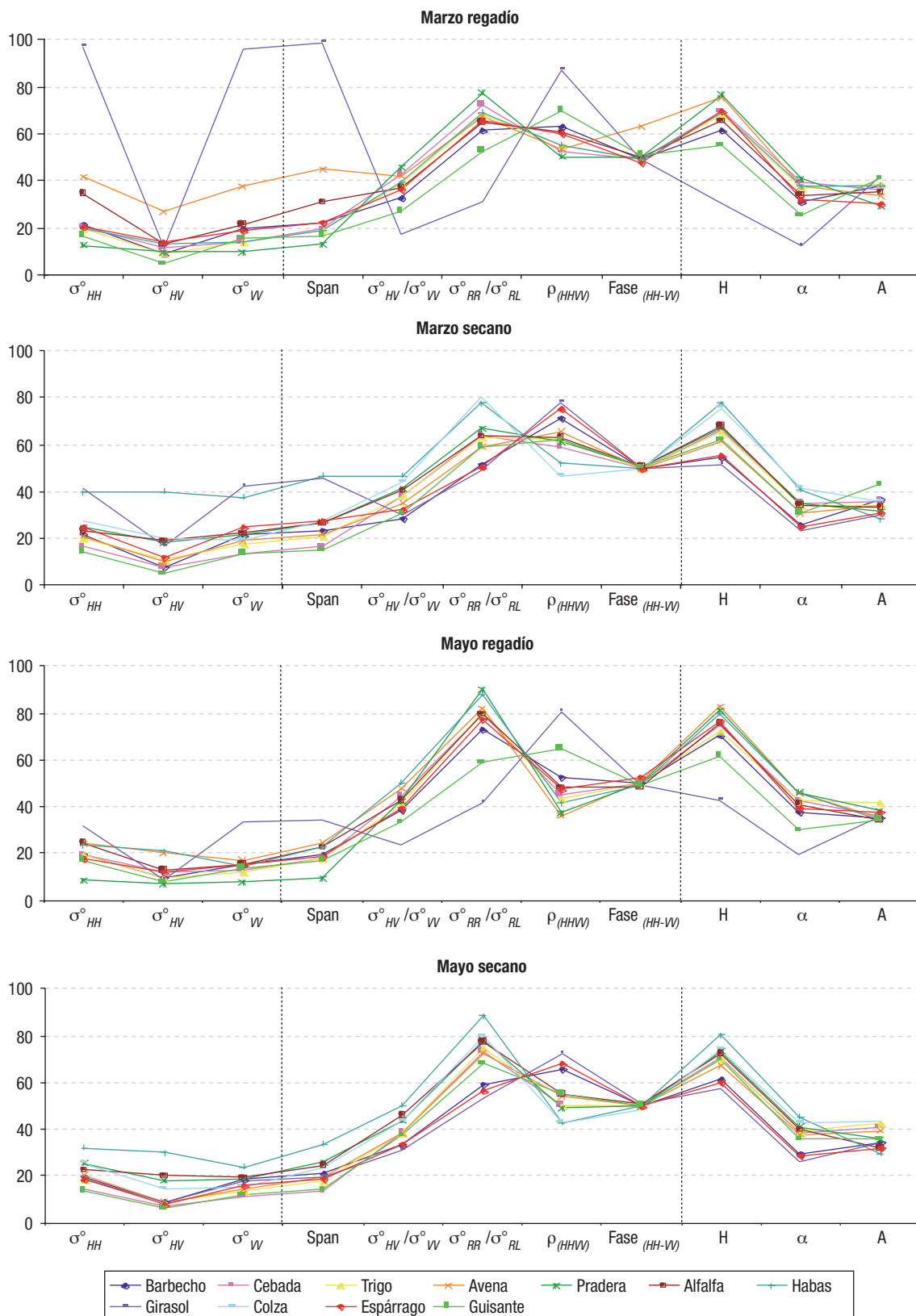


Figura 6. Análisis de firmas, los valores de los distintos parámetros están normalizados.

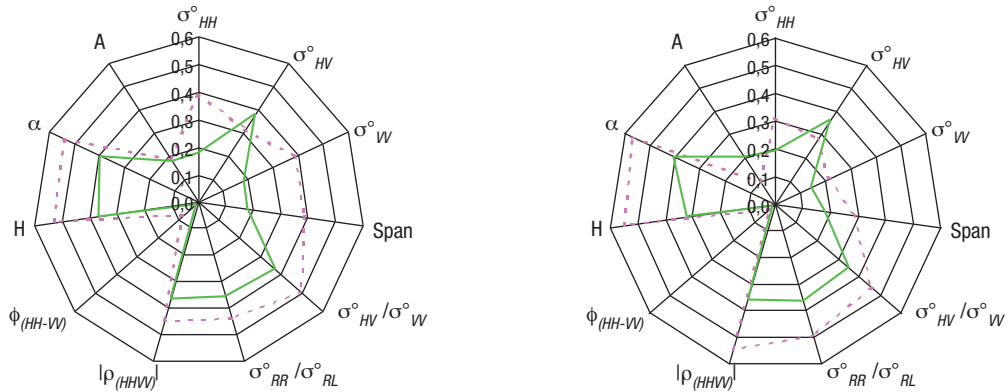


Figura 7. Separabilidad de las bandas de las imágenes de marzo (izquierda) y mayo (derecha). Las líneas continuas representan los cultivos de secano mientras que las discontinuas los de regadío.

$$Separabilidad = \frac{\chi_{cultivo1} - \chi_{cultivo2}}{\sigma_{cultivo1} - \sigma_{cultivo2}}$$

donde, χ representa el valor medio para cada clase de un determinado parámetro y σ su desviación típica (Lee *et al.*, 2001). En las siguientes figuras, se representa la separabilidad media de cada banda para los cultivos de secano y regadío, y para cada imagen.

En general (excepto para valores de sigma de polarizaciones cruzadas), los cultivos de regadío presentan mayor separabilidad que los de secano (Fig. 7). Las bandas que mayor separabilidad presentan, tanto en secano como en regadío son: H, α , $|\rho_{HHVV}|$, $\sigma_{HV}^{\circ}/\sigma_{VV}^{\circ}$ y $\sigma_{RR}^{\circ}/\sigma_{RL}^{\circ}$.

Una vez analizadas las signaturas, las matrices de correlación y la separabilidad, se ha decidido seleccionar las siguientes bandas para clasificar los cultivos: σ_{HH}° , σ_{HV}° , α , $|\rho_{HHVV}|$, $\sigma_{HV}^{\circ}/\sigma_{VV}^{\circ}$ y $\sigma_{RR}^{\circ}/\sigma_{RL}^{\circ}$.

Varios autores (Alberga, 2007; Quegan *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 2001) han observado que la clasificación por parcela da mejores resultados que la clasificación por píxel. En este trabajo, se ha realizado una segmentación utilizando como objetos las parcelas agrícolas obtenidas del SIG-PAC correspondiente a la zona de estudio. Posteriormente, a cada una de las parcelas se les ha asignado el valor medio de sus píxeles en cada una de las bandas.

Clasificación supervisada

Rodriguez *et al.* (2003) ya demostraron que las clasificaciones supervisadas daban mejores resultados que las no supervisadas. Por lo tanto

en este trabajo se ha empleado el algoritmo de clasificación supervisada de máxima verosimilitud. Este clasificador permite asignar cada objeto (en este caso parcela) a una determinada clase según una función de probabilidad.

Previamente al proceso de clasificación se han asignado probabilidades a priori (o peso) a cada uno de los cultivos a clasificar. Estas probabilidades se han obtenido a partir de los datos de Coyuntura Agraria 2007. Esta asignación ayuda a discriminar mejor entre aquellos cultivos con respuesta similar ya que desplaza a un lado u otro las distribuciones de probabilidad en función del valor de probabilidad «a priori» asignado.

El resultado de la clasificación ha consistido en la asignación de cada parcela a una determinada clase asociándose además el valor de tipicidad con que ha sido asignada. Este valor permite conocer el grado de fiabilidad de pertenencia a esa clase. Así, tipicidades altas indican probabilidad de pertenencia a esa clase elevada y viceversa.

Análisis de resultados

Se calcula la matriz de confusión, el índice Kappa global y de cada cultivo (Tablas 4 y 5).

La colza, no se cultiva en los campos de regadío, por eso aparece en gris en la Tabla 4. La alfalfa tanto de secano como de regadío no se ha clasificado correctamente. Esto puede deberse a que se disponía de poca muestra de este cultivo y además la alfalfa, suele recibir varios cortes a lo largo de su ciclo productivo. En esta zona de estudio en concreto, la alfalfa que se

	Sec. + Reg.	Secano	Regadío
Fiabilidad global	0,85	0,87	0,61
Kappa global	0,52	0,54	0,34
Kappa por cultivo			
Barbecho	0,53	0,55	0,16
Cereales	0,52	0,52	0,33
Pradera	—	—	—
Alfalfa	0,09	0,08	0,26
Habas	0,91	0,91	0,74
Girasol	0,68	0,51	0,81
Colza	0,29	0,29	
Espárrago	0,18	0,78	0,02
Guisante	0,88	0,57	1,00

Tabla 4. Resultados obtenidos, globales y por cultivo.

siembra en septiembre suele recibir cuatro o cinco cortes mientras que la alfalfa que se siembra en primavera, recibe tres o cuatro cortes durante el verano. Esto hace que sea un cultivo muy heterogéneo por lo que la firma obtenida para la alfalfa es poco precisa y, en consecuencia, no se clasifica adecuadamente. La pradera, otra clase que presenta bastante heterogeneidad, tampoco se ha clasificado bien y se confunde principalmente con los cereales, > 70% de las praderas se han clasificado como cereales (Tablas 4 y 5).

Los cultivos mayoritarios de la zona y por lo tanto los que mayor probabilidad a priori tienen son los cereales y se han clasificado adecuadamente, más del 90% se han clasificado en la clase que les correspondía. Los cultivos minoritarios, la colza, el espárrago y los guisantes, que

quedan peor clasificados, se confunden con cultivos mayoritarios como los cereales y el barbecho (Tabla 5).

En términos generales, los cultivos de secano se han clasificado mejor que los de regadío (Tabla 4). Esto puede deberse a que (1) la muestra de cultivos de regadío era menor que la de secano, (2) el tamaño medio de las parcelas de regadío también era inferior a las de secano y (3) se sabe, gracias a las visitas a campo realizadas en fechas próximas a las adquisiciones de las imágenes, que en algunas de las parcelas acababan de instalar recientemente la infraestructura para el riego, aunque mantenían un sistema de producción de secano.

La fecha en la que se adquieren las imágenes es vital en el resultado de la clasificación debi-

	Verdad campo								
	BA	Cereal	PR	AF	HA	GI	CO	ES	GU
<i>Clasificado</i>									
BA	59,78	4,13	11,63	11,48	0,11	10,83	0,00	24,39	29,51
Cereal	37,58	94,82	70,93	61,45	17,91	0,00	47,60	53,52	55,06
PR	0,17	0,15	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
AF	1,19	0,20	1,29	12,56	9,47	0,00	0,00	0,00	0,00
HA	0,32	0,14	0,25	0,00	54,46	0,00	0,00	0,00	0,00
GI	0,23	0,03	0,00	0,00	3,62	89,17	0,00	0,00	0,00
CO	0,46	0,15	8,17	0,00	12,28	0,00	52,40	0,00	0,00
ES	0,27	0,34	7,73	14,51	0,00	0,00	0,00	22,08	0,00
GU	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,43
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación total (secano y regadío) en tanto por cien.

do al distinto estado de desarrollo vegetativo del cultivo. Para este trabajo se han utilizado las imágenes ALOS disponibles. Lamentablemente, no había ninguna imagen de verano por lo que se han utilizado solo imágenes de primavera.

Los cultivos de verano, no se deberían de haber incluido en la clasificación debido a que las fechas de adquisición de estas imágenes no son adecuadas para tal fin. No se disponía de ninguna otra imagen adquirida en fechas más adecuadas para clasificar los cultivos de verano.

En el caso del girasol, es importante mencionar que en Navarra, el grueso de las siembras se realiza a finales del mes de abril y a principios de mayo (fuente: ITG Agrícola). Por lo tanto, hay que interpretar con cuidado los resultados obtenidos para esta clase, dado que en marzo y mayo se habrá observado el suelo desnudo y no el cultivo en sí. En definitiva, es importante conocer el ciclo productivo de todos estos cultivos para interpretar los resultados adecuadamente.

Aún conociendo todas las limitaciones que se acaban de mencionar, el resultado final obtenido ha sido bueno. El índice Kappa global de 0,52, corresponde a una calidad buena (Kappa > 0,4) según la categorización propuesta por Landis y Koch (1977) y la fiabilidad global indica que un 85% de las parcelas se han clasificado correctamente.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- La clasificación se ha llevado a cabo utilizando clasificadores convencionales y los resultados obtenidos han sido satisfactorios (Kappa global, 0,52) y similares a los obtenidos en otros estudios que utilizan el mismo tipo de clasificador (Rodrigues *et al.*, 2003).
- Es interesante realizar un análisis previo de todas las bandas generadas y seleccionar las más importantes, ya que se pueden obtener resultados similares con menor coste computacional.
- El trigo, avena y cebada se confunden mucho debido a que la época en la que se han captado las imágenes, el desarrollo vegetativo de estos cultivos es muy parecido. Es por eso que estos tres cultivos se han

unido en una única clase. Este hecho suele ser también habitual en clasificaciones basadas en imágenes ópticas y se suele actuar de forma similar.

- Es importante conocer el calendario o ciclo productivo de los cultivos a clasificar y, a ser posible, seleccionar las imágenes en función del mismo.

Las futuras líneas de trabajo son:

- Incorporar al análisis imágenes de fechas más adecuadas para clasificar los cultivos de verano.
- Estudiar clasificadores más específicos de clasificación a nivel de objeto y para imágenes multitemporales (función discriminante y random forests).
- Analizar distintos tipos de imágenes radar (distintas bandas, ángulos de incidencia y fechas) y ver cuales son los más adecuados para este tipo de clasificación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Subprograma Torres Quevedo, al Fondo Social Europeo y al Proyecto CGL2007-63453/HID del Plan Nacional de I+D+i.

REFERENCIAS

- ALBERGA, A. 2007. A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 28(17): 3851-3870.
- CLOUDE, S. R., & POTTIER, E. 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 498-518.
- CLOUDE, S. R., & POTTIER, E. 1997. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SARs. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 35(2): 68-78.
- DONG, Y., MILNE, A. K., & FORSTER, B. C. 2001. Segmentation and classification of vegetated areas using polarimetric SAR image data. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 39(2): 321-329.
- FREEMAN, A., & DURDEN, S. L. 1992. A three component scattering model to describe polarimetric SAR data. *Proc. SPIE, Radar Polarimetry*, 1748: 213-225.

- LANDIS, J. R., & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159-174.
- LEE, J. S., GRUNES, M. R., AINSWORTH, T. L., LIJEN, D. U., SCHULER, D. L., & CLOUDE, S. R. 1999. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 37/1(5): 2249-2258.
- LEE, K. Y., LIEW, S. C., & KWOH, L. K. 2001. Land cover classification using NASA/JPL polarimetric SAR data. *International Paper presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing*.
- LERÁNOZ, A., & ALBIZUA, L. 2001. Mejoras en la estratificación para la estimación de superficies cultivadas en Navarra. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, pp. 91-94.
- OUARZEDDINE, M., SOUISSI, B., & BELHADJ-AISSA, A. 2007. Unsupervised classification using Wishart classifier. *Proc. of ESA POLINSAR 2007 Workshop*.
- QUEGAN, S., LE TOAN, T., SKRIVER, H., GOMEZ-DANS, J., GONZALEZ-SAMPEDRO, M. C., & HOEKMAN, D. H. 2003. Crop classification with multitemporal polarimetric SAR data. *Proc. of ESA POLINSAR 2003 Workshop*.
- RODRIGUES, A., CORR, D. G., POTTIER, E., FERRO-FAMIL, L., & HOEKMAN, D. H. 2003. Land cover classification using Polarimetric SAR data. *Proc. of ESA POLINSAR 2003 Workshop*.
- SKRIVER, H., SVENDSEN, M. T., & THOMSEN, A. G. 1999. Multitemporal C- and L- band Polarimetric Signatures of Crops. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2413-2428.
- SKRIVER, H., DALL, J., LE TOAN, T., QUEGAN, S., FERRO-FAMIL L., POTTIER, E., LUMSDON, P., & MOSHAMMER, R 2005. Agriculture classification using POLSAR data. *Proc. of ESA POLINSAR 2005 Workshop*.
- TOUZI, R., GOZE, S., LE TOAN, T., LOPES, A., & MOUGIN, E. 1992. Polarimetric discriminators for SAR images. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 30(5): 973-980.
- ULABY, F. T., & ELACHI, C. 1990. Eds, Radar Polarimetry for Geoscience Applications. *Artech House*.