

# ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA ARBÓREA EN DEHESAS MEDIANTE MODELOS LINEALES DE MEZCLAS ESPECTRALES APLICADAS A IMÁGENES LANDSAT-TM

González Dugo, M<sup>a</sup> Pat <sup>1</sup>, Fernández Rebollo, P. <sup>2</sup>, Guerrero Ginel, J.E. <sup>3</sup>, Giráldez, J.V<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Dpto. Suelos y Riegos, CIFA Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080-Córdoba  
Tfn. 34 957 016030, Fax. 34 957 016043 e-mail: [mariap.gonzalez.ext@juntadeandalucia.es](mailto:mariap.gonzalez.ext@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup>Dpto. Ingeniería Forestal, ETSIAM, Menéndez Pidal s/n, 14080- Córdoba  
Tfn. 34 957 218657, Fax. 34 957 218563 e-mail: [irlferep@uco.es](mailto:irlferep@uco.es)

<sup>3</sup>Dpto. Producción Animal, ETSIAM, Menéndez Pidal s/n, 14080- Córdoba  
Tfn. 34 957 218555, Fax. 34 957 218563 e-mail: [palgugij@uco.es](mailto:palgugij@uco.es)

Palabras clave: Teledetección, encina, *Quercus*,

## Resumen

La dehesa es un ecosistema característico del SW de España con un alto valor económico y ambiental pero frágil ante los cambios climáticos. En este trabajo se determina la cobertura ocupada por el arbolado en una zona de dehesa situada al norte de la provincia de Córdoba usando una imagen Landsat-TM y aplicando un modelo lineal de mezclas espectrales. Se han evaluado cinco métodos para encontrar los factores de referencia que mejor representan los componentes de dicho ecosistema, obteniendo mejor resultado al utilizar el algoritmo no supervisado IKSFA. Los valores de cobertura de vegetación verde estimada por el modelo se han validado midiendo de forma automática la cobertura ocupada por las copas de los árboles sobre fotografía aérea. Los resultados indican que el modelo sobreestima la cobertura arbórea con una desviación media del 4% y que el ajuste mejora al aumentar la cobertura arbórea de las parcelas de control.

## INTRODUCCIÓN

La dehesa es un ecosistema característico del SW de España con un alto valor económico y ambiental pero frágil ante los cambios climáticos. En ellas, el arbolado de *Quercus* desempeña un papel importante, contribuyendo a la diversidad y estabilidad de los pastos y aportando variados productos, entre los que cabe destacar la bellota, base de la alimentación del cerdo Ibérico en la última fase del ciclo productivo. La gran demanda que en la actualidad tienen los productos cárnicos de calidad derivados del cerdo Ibérico, a dado lugar a que el aprovechamiento de la montanera se haya convertido en la actividad principal sobre la que gravita el resto de los aprovechamientos de la dehesa. La situación tan delicada que atraviesa el arbolado en la dehesa, con una reducción generalizada de su vigor y pérdida de individuos a causa no sólo de la intensificación ganadera, sino del cambio climático que propicia la incidencia de determinadas plagas y enfermedades, requiere de metodologías de inventario que permitan de forma ágil estimar la cobertura del arbolado, su estado, así como la evolución del mismo a lo largo del tiempo. La teledetección constituye una herramienta que posibilita el análisis y seguimiento de fenómenos de este tipo gracias al incremento en los últimos años de sensores con una variada resolución espacial, temporal y espectral. En este trabajo se ha tratado de cuantificar la cobertura ocupada por el arbolado en dehesas a partir de una imagen Landsat-5 TM mediante la aplicación de un modelo lineal de mezclas espectrales, evaluándose distintas alternativas para la obtención de los factores de referencia.

## MATERIAL Y MÉTODO

El trabajo se ha llevado a cabo en la comarca de los Pedroches situada al norte de la provincia de Córdoba. El relieve es ondulado, con una altitud media moderada, alrededor de los 600 m. Las precipitación media se sitúa en torno a 500-600 mm, aunque desigualmente distribuida a lo largo del año, con una acusada sequía estival, que junto a temperaturas medias anuales cercanas a los 17° y un marcado contraste entre verano e invierno, definen un clima mediterráneo con una clara influencia continental. Previamente, y para poder aplicar los modelos de mezclas espectrales de manera correcta, se seleccionaron aquellas zonas de dehesa que presentaran un mismo tipo de suelo. La delimitación de

las zonas de dehesa se realizó mediante clasificación supervisada de una imagen Landsat-TM (GÓNZALEZ, 2002), y el tipo de suelo elegido fue la unidad 38 del mapa de suelos de Andalucía a escala 1:400.000 del IARA-CSIC. Esta es la unidad dominante en la comarca y está dominada principalmente por cambisoles eutrícos. La aplicación de estas dos máscaras nos determina una zona de trabajo de 105.109 Ha (Figura 1).

Se ha usado una imagen Landsat-5 TM, de julio de 1995, junto con fotografías aéreas color de la misma zona correspondiente a septiembre de 1995. Estas fotografías aéreas fueron escaneadas, realizándose la digitalización con una resolución de 600 ppi, lo que equivale a un tamaño de píxel de 2,5 m, y posteriormente georreferenciadas. Se han usado para la validación de la cobertura de vegetación verde obtenida a partir del modelo de mezclas espectrales. La elección de una imagen de verano se debe a que el estado de las cubiertas vegetales de la zona en esta época del año facilita su diferenciación. Sin riego, todas las cubiertas herbáceas, pasto y cultivos, están secas, mientras que las especies leñosas, fundamentalmente *Quercus* de porte arbóreo y/o arbustivo, se mantienen verdes y con actividad fotosintética, lo que facilita su diferenciación, especialmente en la región infrarroja del espectro. La imagen Landsat-5 TM fue corregida geométricamente mediante un polinomio de segundo grado, y atmosféricamente mediante la aplicación del modelo COST (CHAVEZ, 1996), el cual corrige el efecto aditivo de la dispersión Rayleigh por el método DOS y deriva la transmitancia de la atmósfera como el coseno del ángulo cenital solar. Las dos condiciones para su aplicación, un ángulo cenital solar menor de 55° (30° para la imagen de Julio) y un entorno árido o semiárido se cumplen en este caso. Los valores digitales del objeto oscuro se han calculado usando zonas de vegetación densa en sombra y agua.

Se ha aplicado un modelo lineal de mezclas espectrales, el cual supone que la reflectividad de cada píxel es una combinación lineal de las reflectividades de los componentes puros presentes en la zona, ponderados por la superficie ocupada por cada uno dentro del píxel. El modelo nos proporciona por tanto como resultado, la superficie ocupada por cada componente dentro del píxel. Previamente a la aplicación del modelo es necesario definir qué componentes integran el modelo y cuál es la reflectividad de cada uno en las distintas bandas (factores o vectores de referencia). Teniendo en cuenta la dimensión de los datos de una imagen Landsat-5 TM y las características de la vegetación de la dehesa en verano, se han considerado cuatro componentes que pueden ser de interés a la hora de describir este ecosistema: vegetación verde, que se corresponde en su mayoría con el arbolado de *Quercus* presente en la zona, ya que la presencia de matorrales es escasa; vegetación seca, representada por el pasto herbáceo seco; suelo y sombra causada por el arbolado o la topografía. Se han evaluado cinco aproximaciones distintas para determinar los factores de referencia correspondientes a los componentes vegetación verde, vegetación seca y suelo. Para la sombra se ha considerado en todos los casos una respuesta constante de reflectancia igual al 0.01% en todas las bandas. Tres de estas aproximaciones recogen los espectros de cada componente mediante medidas en campo o laboratorio, y dos lo determinan a partir de la propia imagen. Así, entre aproximaciones externas para establecer los factores de referencia se han considerado las siguientes:

- Bibliotecas espectrales. Se ha empleado para la vegetación seca el espectro denominado Dry-Long-Grass AV87-2 de la biblioteca espectral del Servicio Geológico de los EEUU (CLARK *et al.*, 1993). Para el suelo desnudo se ha considerado el espectro proporcionado por un entisol denominado 87P706 arena marrón a marrón oscuro y recogido en la Universidad Jonh Hopkins. Para la vegetación verde se ha empleado la curva de reflectancia espectral para encina medida con radiómetro GER (SIRIS) en localidades de la península ibérica (HURCOM y HARRISON, 1998).
- Espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR). Se tomaron en campo muestras de suelo, pasto herbáceo seco y hojas y ramas de encina cuya reflectividad se midió con un equipo de barrido continuo, FOSS NIRSystem 6500 del SCAI de la Universidad de Córdoba utilizando una cápsula rectangular para sólidos (Simple cell NR-7080) y trabajando con el material intacto. El intervalo espectral que cubre el equipo (400-2500 nm) permite reproducir las seis bandas del Landsat-Tm, promediándose posteriormente los valores obtenidos en el intervalo correspondiente a cada banda.
- Espectroscopia de campo. Se han caracterizado los distintos componentes mediante el radiómetro portátil Exotech 100-BX, el cual proporciona medidas en el intervalo 0.4-1.1  $\mu\text{m}$ , seleccionando

como campo de observación un objetivo circular de 15°. Se han utilizado los filtros correspondientes a las cuatro primeras bandas del sensor TM de Landsat-5. Como blanco de referencia se utilizó un panel circular que posteriormente fue calibrado con un panel Spectralon.

Como aproximaciones internas para determinar los factores de referencia se han estimado:

- Geometría del recinto convexo. Se proyectan los datos en un espacio bidimensional, localizando los píxeles extremos. Se calcula el índice de pureza del píxel (PPI) como el número de veces que éste se sitúa en un extremo de la proyección bidimensional de los datos. Aquellos píxeles con mayor PPI serán los seleccionados como factores de referencia. Siguiendo las recomendaciones de SMALL (2001) en lugar de los datos de reflectividad del sensor TM de Landsat se ha realizado este análisis con las primeras bandas de la transformación de mínimo ruido.
- Rotación de factores. Se ha usado el método iterativo IKSFA, algoritmo incluido en un conjunto de programas de análisis factorial denominado Target-90 (MALINOWSKI, 1989), aplicándolo a una muestra representativa de la imagen.

Los resultados de la aplicación del modelo lineal de mezclas espectrales considerando las distintas vías para llegar a determinar los factores de referencia se han comparado, seleccionándose aquel que mejor cumpla los siguientes criterios. En primer lugar, el error medio cuadrático (rms) medio y máximo de la matriz de error debe ser bajo y siempre inferior que el nivel de ruido del sensor TM. Además, se consideran aceptables valores de rms medio inferiores a 0.0065 (MUSTARD y SUNSHINE, 1999) y rms máximos que no superen el valor 0.02 (ROBERTS *et al.*, 1993). En segundo lugar, las fracciones de los componentes en cada píxel deben variar mayoritariamente entre cero y uno. Y por último, la imagen de error no debe contener información espacial. Una vez seleccionado el método de extracción de los factores de referencia que nos proporciona los mejores resultados, se ha procedido a la validación de la cobertura de vegetación verde obtenida mediante la aplicación del modelo lineal de mezclas espectrales. Para ello, se han seleccionado 171 parcelas de una superficie de 90 m x 90 m, distribuidas de forma sistemática por toda la zona de estudio. Para cada una de estas parcelas se ha determinado la cobertura ocupada por el arbolado sobre la fotografía aérea utilizando un algoritmo desarrollado por el JRC de la Comisión Europea (KAY *et al.*, 2000). Los valores de cobertura arbórea obtenidos de esta forma se han relacionado mediante regresión lineal con la cobertura de vegetación verde que proporciona el modelo lineal de mezclas espectrales para estas parcelas.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 1 recoge la reflectividad por banda para cada componente puro del modelo según las distintas aproximaciones analizadas para determinar los factores de referencia. Como era de esperar y aún cuando hay alguna diferencia notable, en general los valores están bastante correlacionados (Tabla 2), superando todos los coeficientes de correlación el 0.71. Las mayores similitudes se encuentran entre los factores externos (la espectroscopia de campo y el infrarrojo cercano alcanzan una correlación de 0.94) y los internos entre sí (llegan al 0.95).

Se ha calculado, partiendo de la imagen de residuos, el error medio cuadrático máximo y medio alcanzados por el modelo con la utilización de los distintos factores de referencia. Comparando estos resultados, que aparecen en la Tabla 3, se puede concluir que el mejor resultado es el obtenido por la rotación de factores. Tanto el rms máximo como el medio están dentro de todos los límites encontrados en la bibliografía. Los demás resultados ofrecen errores demasiado altos para considerarlos como soluciones válidas. Como era de esperar, los errores de los factores provenientes de la imagen son sensiblemente inferiores a aquellos obtenidos por métodos externos. Esto corrobora la necesidad de una buena corrección atmosférica para utilizar factores que no incorporen en el modelo estas desviaciones debidas, fundamentalmente a la atmósfera, pero también a variaciones en la topografía o iluminación. En la Tabla 4 se pueden comparar los píxeles fuera del intervalo 0-1 en cada método. El mejor resultado es el obtenido por las bibliotecas espectrales y el peor por la espectroscopia NIR. No parece que haya diferencias significativas entre los factores internos y

externos. El suelo es el factor que mayores problemas ocasiona, por exceso o por defecto, en todos los métodos excepto en la geometría convexa, donde el fallo es mayor en los otros dos tipos de cubiertas. El análisis de la información espacial contenida en la imagen de error se ha repetido varias veces sobre distintas zonas de la escena y distintos niveles de acercamiento, ordenándose éstas de mayor a menor coherencia espacial, obteniéndose siempre el mismo resultado: la espectroscopía NIR y la rotación de factores parece que no engloban en el error demasiada información espacial que debe haber sido reproducida por el modelo.

Considerando por tanto estos tres criterios, se ha seleccionado el modelo desarrollado mediante la rotación de factores. Las imágenes que muestran las fracciones de cada factor en la zona de aparecen en la Figura 2. La fracción correspondiente a vegetación verde se ha comparado con los datos de cobertura arbórea medidos en las parcelas de validación, comprobándose una buena relación entre ambos parámetros. El modelo de regresión lineal obtenido (Figura 3) presenta un coeficiente de determinación de 0,76. Se observan mayores residuales o una mayor dispersión de los datos para coberturas arbóreas bajas y un mejor ajuste a partir de datos de cobertura arbórea del 20%. Esto coincide con los resultados de otros trabajos realizados en entornos áridos, que muestran coeficientes de determinación similares a éste ( $r^2=0.74$ ) en zonas de baja cobertura (MCGWIRE *et al.*, 2000), mejorando considerablemente ( $r^2=0.83$ ) cuando la cobertura vegetal aumenta (SMITH *et al.*, 1990). Como media, la cubierta arbórea estimada mediante los datos de satélite está sobreestimada alrededor de un 4% respecto a la medida a partir de la fotografía aérea.

## CONCLUSIONES

Los componentes de un ecosistema de dehesa, formado básicamente por árboles dispersos en un ambiente semiárido, son bien reproducidos por un modelo lineal de mezclas espectrales, si bien es conveniente reducir el ámbito de estudio de forma que los componentes a considerar no superen la dimensión de los datos originales. En este caso y con imágenes de sensor TM de Landsat-5, el máximo número de componentes posibles ha sido cuatro, obteniendo un resultado satisfactorio aplicando una limitación de tipo y uso del suelo. La obtención de los factores de referencia mediante la rotación de factores, además de no requerir supervisión, ha arrojado errores medios en el modelo similares al nivel de ruido del sensor y en conjunto un resultado superior al ofrecido por los otros métodos. El modelo sobreestima la cobertura arbórea con una desviación media del 4%, mejorando el ajuste al aumentar la cobertura arbórea de las parcelas de control.

## BIBLIOGRAFIA

- CHAVEZ, P. S.; 1996. Image-based atmospheric corrections —Revisited and improved. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 62:1025-1036.
- CLARK, R.N.; SWAYZE, G.A.; GALLAGHER, A.; KING, T.V.V. & CALVIN, W.M.; 1993. The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library, V 1: 0.2-3.0 um. USGS Open file Rep. 93-592, Washington, D.C.
- GONZALEZ, M.P.; 2002. *Tipificación y cartografía de vegetación en ecosistemas de dehesa mediante sensores remotos*. Tesis doctoral. Dpto de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba.
- HURCOM, S. J.; HARRISON, A.R.; 1998. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *Int. J. Rem. Sens.* 19: 3109-3125.
- KAY, S.; LÉO, O. & PEEDELL, S.; 2000. Computer-assisted recognition of olive tree in digital imagery. SAI MARS Project, [http://mars.aris.sai.jrc.it/wine\\_olive/olicount2000](http://mars.aris.sai.jrc.it/wine_olive/olicount2000)
- MALINOWSKI, E. R.; 1991. *Factor Analysis in Chemistry*. Wiley, 2ª ed. Nueva York.
- MCGWIRE, K.; MINOR, T. & FENSTERMARKER, L.; 2000. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments. *Remote Sens. Environ.* 72: 360-374.
- MUSTARD, F.F.; SUNSHINE, J.M.; 1999. Spectral Analysis for Earth Science: investigation using remote sensing data. En: Renz A.N. (ed), *Remote Sensing for Earth Science: ASPRS Manual of Remote Sensing*, Wiley, N.Y., pp: 251-306.

ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O. & ADAMS, J. B.; 1993. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.* 44: 255-269.

SMALL, C.; 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *Int. J. Rem. Sens.* 22: 1305-1334.

SMITH, M.O.; USTIN, S.L.; ADAMS, J.B. & GILLESPIE, A.R.;1990. Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sens. Environ.* 31: 1-26.

**Tabla 1.** Reflectividad por banda para los distintos componentes: suelo, vegetación verde y vegetación seca según el método de extracción de los factores de referencia.

Banda	1	2	3	4	5	7
<b>Suelo</b>						
Espectrometría campo	0.085	0.113	0.141	0.206		
Bibliotecas espectrales	0.083	0.156	0.209	0.269	0.407	0.405
Infrarrojo cercano	0.061	0.080	0.099	0.179	0.338	0.225
Rotación de factores	0.232	0.217	0.229	0.377	0.567	0.438
Geometría convexa	0.227	0.232	0.262	0.454	0.641	0.484
<b>Vegetación seca</b>						
Espectrometría campo	0.131	0.181	0.222	0.350		
Bibliotecas espectrales	0.177	0.251	0.305	0.352	0.296	0.204
Infrarrojo cercano	0.156	0.218	0.280	0.377	0.396	0.254
Rotación de factores	0.219	0.189	0.196	0.351	0.569	0.413
Geometría convexa	0.334	0.328	0.316	0.441	0.597	0.507
<b>Vegetación verde</b>						
Espectrometría campo	0.050	0.058	0.064	0.297		
Bibliotecas espectrales	0.025	0.058	0.042	0.270	0.154	0.083
Infrarrojo cercano	0.081	0.106	0.084	0.408	0.197	0.088
Rotación de factores	0.181	0.157	0.143	0.331	0.330	0.206
Geometría convexa	0.198	0.175	0.159	0.420	0.364	0.234

**Tabla 2.** Coeficientes de correlación de Pearson entre los factores de referencia obtenidos por los distintos métodos.

	Espectroscopía campo	Bibliotecas espectrales	Infrarrojo cercano	Rotación de factores
Bibliotecas espectrales		0,93		
Infrarrojo cercano		0,94	0,78	
Rotación de factores		0,78	0,72	0,71
Geometría convexa		0,89	0,83	0,81

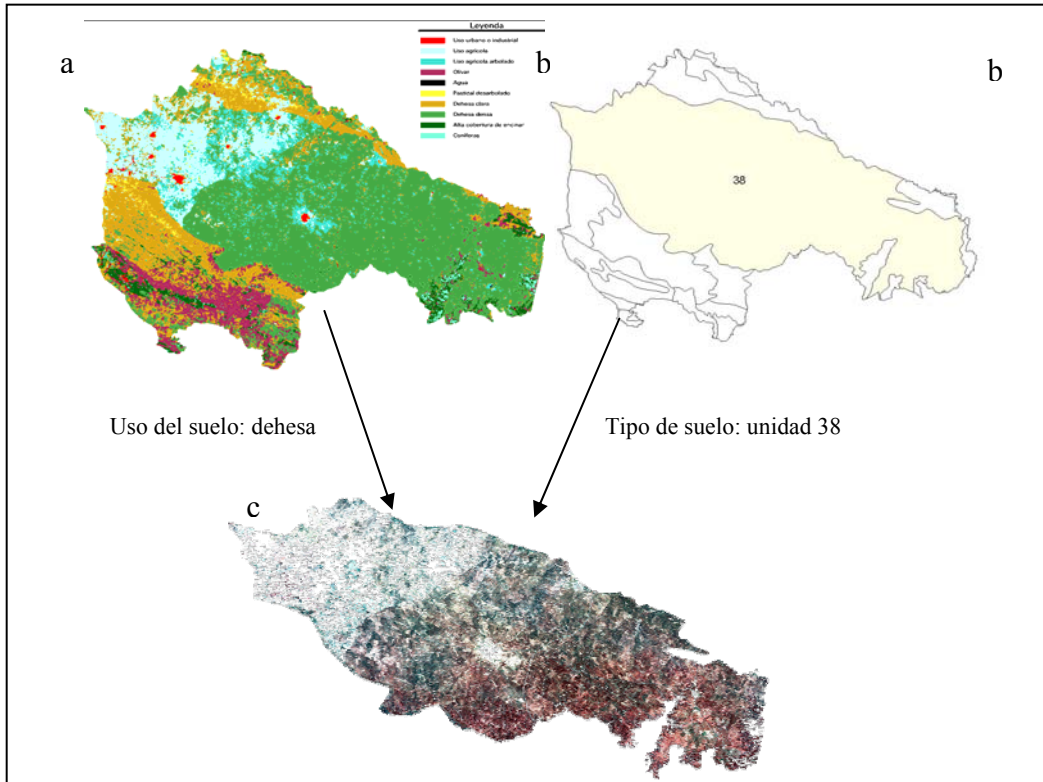
**Tabla 3.** Error medio cuadrático medio y máximo obtenido por cada método de determinación de los factores de referencia

	RMS medio	RMS max
Espectroscopía campo		0.038
Bibliotecas espectrales		0.052
Infrarrojo cercano		0.033
Rotación de factores		0.004
Geometría convexa		0.012

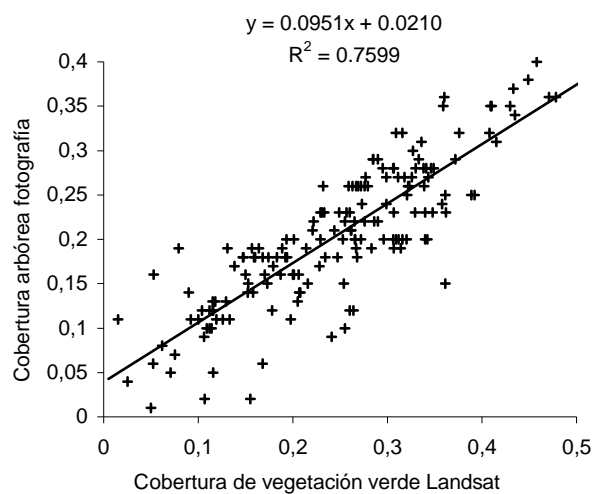
**Tabla 4.** Porcentaje de píxeles que presentan fracciones inferiores a 0 ó superiores a 1 en algunos de los componentes del modelo lineal de mezclas espectrales para cada método de determinación de los factores de referencia.

Elementos (%)	Componente	Espectroscopía campo	Bibliotecas espectrales	Infrarrojo cercano	Rotación factores	Geometría convexa
Menor que cero	Suelo	0.00	0.00	0.001	35.60	0.06
	Vegetación seca	0.00	0.00	0.00	7.06	19.70
	Vegetación verde	12.47	0.00	29.19	4.74	26.46

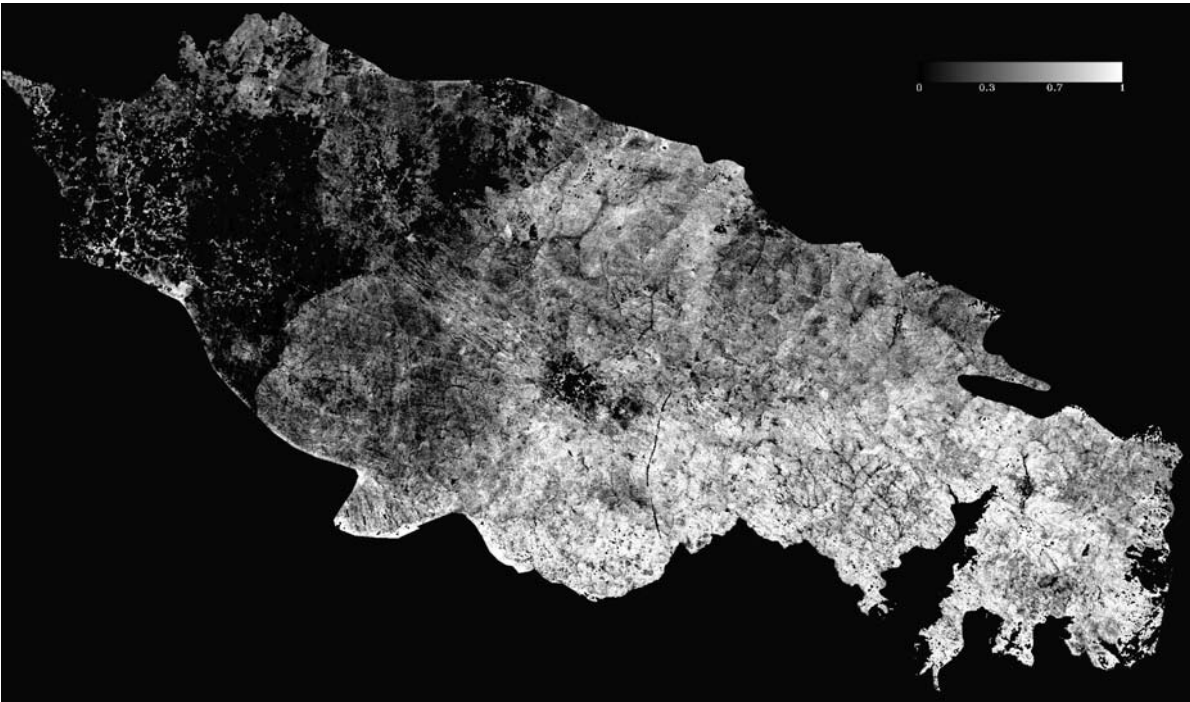
Mayor que uno	Suelo	22.00	10.98	58.58	3.00	1.20
	Vegetación seca	12.0	0.00	0.007	6.00	0.00
	Vegetación verde	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00



**Figura 1:** Zona seleccionada para la aplicación del modelo lineal de mezclas espectrales: áreas de dehesa con suelos del tipo cambisoles eútricos.



**Figura 3:** Relación entre los resultados de cobertura de vegetación verde obtenidos por la aplicación del modelo lineal de mezclas espectrales y los estimados a partir de fotografía aérea.



**Figura 2:** Imagen que representa la fracción de cobertura de vegetación verde obtenida para la zona de estudio mediante la aplicación de un modelo lineal de mezclas espectrales utilizando una imagen Landsat-5 TM y como método de determinación de los factores de referencia la rotación de factores (IKSFA). Debido a que la imagen fue tomada en el mes de julio, la vegetación verde se corresponde en su mayoría con arbolado de *Quercus*.