

## Evaluación de la defoliación mediante imágenes IKONOS en masas de *Quercus suber* L. en el sur de España

F. Cano<sup>1</sup>, R. M.<sup>a</sup> Navarro Cerrillo<sup>2\*</sup>, A. García Ferrer<sup>3</sup> y M. Sánchez de la Orden<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> AURENSA. San Francisco de Sales, 38. 28003 Madrid. España

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad de Córdoba.  
Apdo. de Correos 3048. 14080 Córdoba. España

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica. Universidad de Córdoba.  
Apdo. de Correos 3048. 04080 Córdoba. España

---

### Resumen

Los sensores remotos de alta resolución espacial ofrecen nuevas posibilidades para estudios de ecosistemas forestales, en particular al estudio de procesos de decaimiento en masas de *Quercus*. En este trabajo se han estudiado los procesos de defoliación en un monte alcornocal (San Roque-Cádiz), a partir de una imagen pancromática y otra imagen multiespectral del sensor IKONOS GEO.

La información obtenida a partir de las bandas espectrales del sensor (banda 4, e infrarrojo cercano), así como los índices de vegetación normalizado y la relación infrarrojo/rojo (ir/r y ndvi) han mostrado una buena correlación con la defoliación, con valores superiores a -0,8 para la banda 4 (banda del infrarrojo cercano) y los índices ir/r y ndvi. Se propone mejorar estos resultados mediante la definición de un índice de estimación de la defoliación (IED) generado a partir de la combinación lineal de las bandas originales del sensor IKONOS. El coeficiente de correlación que presenta el IED propuesto con la defoliación ha sido de 0,8552, permitiendo calcular la defoliación en pies de alcornoque a través de la recta:  $Y_{\% \text{ defo calculado}} = -0,0016 * IED + 1,2162$ . Este IED permite una descripción más acertada del síntoma de defoliación estudiado, que los tradicionales índices de vegetación NDVI e IR/R ampliamente utilizados en la caracterización del estado fitosanitario de las masas forestales.

**Palabras clave:** teledetección, índices de vegetación, defoliación, *Quercus suber*.

### Abstract

#### Forest defoliation using IKONOS sensor for cork oak (*Quercus suber* L.) woods in Southern Spain

Assessment of forest defoliation is severely hampered by the limited information on tree death on short temporal and broad spatial scales. In order to evaluate forest decline rates in cork oak of Southern Spain, an analysis was made of statistical correlation between the 4 IKONOS sensor original bands acquired in 2000, the Normalized Difference Vegetation Index (ndvi) and Infrared/Red Index (ir/r) and defoliation information obtained from the ground study. IKONOS near infrared band was negative correlated with defoliation (Pearson Correlation -0.762). The correlation between defoliation and ir/r ratio (Pearson Correlation -0.506) and ndvi (Pearson Correlation -0.449) was also significantly correlated. The dispersion of data presents in each category of defoliation justifies the use of the median value as the representative variable value for each intervals of defoliation. The Statistical Index of Defoliation (SID), generated from a lineal combination of IKONOS sensor bands, shows a correlation rate of 0.85 with the deforestation ground estimate which allows to estimate defoliation by using the equation:  $Y_{\% \text{ defo calculado}} = -0.0016 * SID + 1.2162$ . This study shows that high-spatial-resolution satellite data can now be used to measure forest decline processes, suggesting many new alternatives to evaluate the impact of forest decline in Mediterranean forests.

**Key words:** remote sensing, vegetation index, defoliation, *Quercus suber*.

---

\* Autor para la correspondencia: irlnacer@uco.es

Recibido: 04-04-05; Aceptado: 11-07-05.

## Introducción

En los últimos años el desarrollo de sensores de alta resolución, y nuevos productos fotogramétricos, como las ortofotografías digitales, ha aumentado el ámbito de aplicaciones forestales de este tipo de productos, pero también plantea la necesidad de experimentar y corroborar la validez y viabilidad de estas nuevas fuentes de información antes de generalizar su uso. En la actualidad los nuevos sensores remotos de alta resolución, como los montados en el SPOT 4, recientemente lanzado, y con resolución espacial 20 m en multiespectral y 10 m en pancromática o IKONOS de hasta 1 m en pancromático y 4 m en multiespectral, permitirán superar algunas de las limitaciones de los anteriores sensores trabajando a escalas de mayor detalle (Tanaka y Sugimura, 2001).

La teledetección es una técnica cada vez más aplicada para los estudios de vegetación, al reducir el coste y el tiempo invertido en la interpretación de cubiertas forestales (Holmgren y Thuresson, 1998). Así por ejemplo, son muchos los estudios que revelan la utilidad de imágenes LANDSAT en el seguimiento de la dinámica forestal, tasas e índices de deforestación, caracterización de coberturas vegetales, áreas incendiadas, o regeneración forestal (Holmgren y Thuresson, 1998; Katoh, 2004).

Desde principios del siglo XX y a lo largo de toda Europa, las especies de *Quercus* han mostrado diversos episodios de estrés que en ocasiones han dado lugar al decaimiento y muerte del arbolado (Brasier, 1996). El decaimiento de *Q. petraea* y *Q. robur* en el norte y centro de Europa en los años 20, 40-50, y más recientemente de los *Quercus* mediterráneos en los 80, estimuló el estudio de sus posibles causas (Brasier, 1996; Sánchez *et al.*, 2003). Después de descartar varias de las hipotéticas causas, actualmente la atención principal recae sobre un agente de podredumbre radical (*Phytophthora cinnamomi*) y sobre factores climáticos (Brasier, 1996; Navarro *et al.*, 2001). De hecho, en los decaimientos de *Quercus* frecuentemente aparecen implicados episodios de sequía severa, encharcamientos prolongados, rápidas fluctuaciones del contenido hídrico del suelo y variaciones en los regímenes de temperaturas. Todos estos procesos pueden tener gran importancia a la hora de iniciar el síndrome de decaimiento, predisponiendo al arbolado a la invasión por insectos xilófagos y/o por hongos patógenos, ya sea a nivel radical o aéreo (Brasier, 1996).

La necesidad de evaluar estos procesos en grandes superficies ha impulsado numerosas investigaciones sobre la aplicación de sensores de media resolución espacial (LANDSAT-TM, LANDSAT-ETM+, SPOT, etc.), demostrado su utilidad para estimar procesos de decaimiento en ecosistemas forestales a través de diferentes parámetros (Ekstrand, 1994; Blackburn, 1998; Sá *et al.*, 1999; Zarco-Tejada *et al.*, 1999). Sin embargo, existen pocos estudios sobre la aplicación de sensores de alta resolución en el seguimiento de estos procesos (Clark *et al.*, 2004), y en particular en ecosistemas mediterráneos.

El objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad de imágenes del sensor IKONOS en la evaluación de procesos de decaimiento forestal en masas de *Quercus suber* L. en el sur de España.

## Material y Métodos

### Descripción del área de trabajo

El monte «La Alcaldesa» se encuentra situado en la Sierra del Arca, dentro de los límites de los términos municipales de Castellar de la Frontera y San Roque (Cádiz) (lat. 36°17'26''–36°15'16'', long. 5°24'09''–5°20'50'') (Figura 1). La extensión total del monte es de 1.302,6 ha, correspondiendo a la hoja 1.075 escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército, serie L y a las hojas 2-1, 2-2 y 3-3 del Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1:10.000. La altitud no es excesivamente elevada, con cotas entre los 70 m y los 250 m, y con un relieve poco pronunciado (10-30% pendiente), localizándose las menores pendientes en la parte noroccidental. La clase fitoclimática a la cual pertenece la zona en estudio, se corresponde con el grupo IV<sub>2</sub> (IV), que se identifica con el clima mediterráneo genuino (Allue, 1990).

La vegetación natural dominante es el alcornocal (*Quercus suber* L.), que en suelos decapitados, sobre todo en los secos y soleados, degenera hacia formaciones de hergüen [*Calicotome villosa* (Poiret) Link], y jarales de *Cistus ladanifer* L. Junto a estas especies suelen encontrarse aulagas (*Genista hirsuta* Vahl.), brezos (*Erica scoparia* L.), espliegos (*Lavandula stoechas* Boiss.) y otras jaras menores (*Cistus salvifolius* L., *Cistus crispus* L.).

Desde el punto de vista edafológico el tipo de suelo predominante es el fersialítico pardo sobre materiales silíceos sin presencia de caliza, en los que se

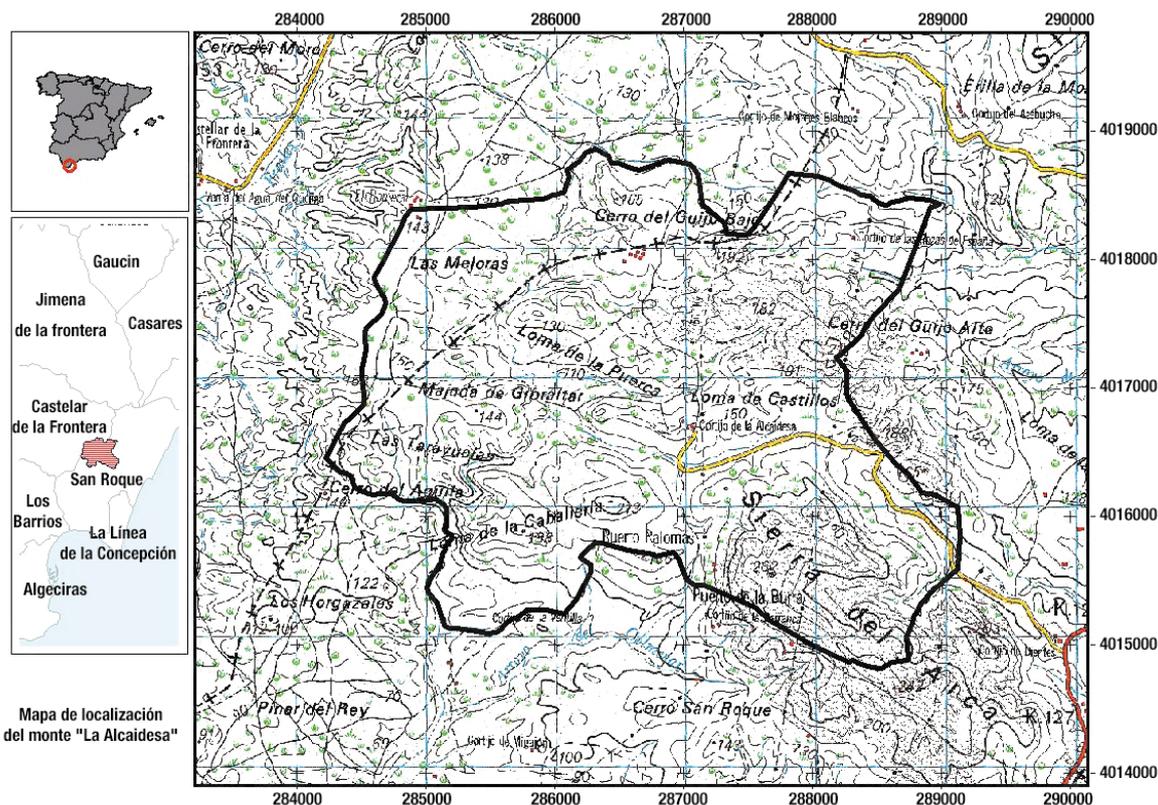


Figura 1. Localización del área de trabajo.

asientan preferentemente los alcornoques. Se ubican en zonas de moderada o poca pendiente. Se trata de suelos evolucionados con tres horizontes, A;B;C, con presencia de arcilla en el horizonte intermedio, lo que permite caracterizarlo como  $B_w$ . En los fondos de valles llegan a aparecer algunos suelos ácidos con horizonte  $B_t$ , en los que tiende a predominar el quejigal. Aparecen también vertisoles litomorfs, formados sobre arcillas y margas, «bujeos», poco permeables y con abundancia de arcilla.

## Inventario de campo

En el monte «La Alcaldesa» se realizó en el verano del año 2000 un inventario forestal (Consejería de Medio Ambiente-EGMASA) y un censo de daños de *seca* (Departamento de Ingeniería Forestal-Universidad de Córdoba). El tipo de inventario adoptado fue un inventario sistemático estratificado con punto de arranque aleatorio, y parcela circular de 18 m de radio y  $150 \times 150$  m de tamaño de malla donde predominaba el alcornoque y el quejigo y 13 m de radio y  $200 \times 200$  m de tamaño de malla donde predominaba

el pino o el eucalipto. El número total de parcelas tomadas fue de 483.

En segundo lugar, se realizó un censo de daños, que consistió en la detección y delimitación de focos afectados de *seca* para posteriormente realizar una evaluación del estado fitosanitario de los árboles que lo forman (Cano *et al.*, 2003). Este censo de daños se realizó durante los meses de septiembre y octubre del año 2000, siguiendo el Manual de Campo para el Inventario de Daños Sobre Masas de *Quercus* afectadas de daños de *seca* (Navarro *et al.*, 2000). El procedimiento que se siguió para llevar a cabo este censo de daños se puede separar en 3 fases sucesivas que se describen a continuación:

### Detección de focos

Se determinó la existencia de los focos de *seca* en la zona de estudio y se localizaron sobre la cartografía de referencia. Un foco de *seca* está definido como un rodal en el cuál la vegetación arbórea aparece afectada en su mayor parte (más de un 50% de los pies), con síntomas claros de muerte regresiva o súbita.

### Delimitación de los focos

Una vez identificado los focos se procedió a delimitar su perímetro mediante la utilización de un GPS diferencial con antena base situada en la ETSIAM de Córdoba (TOPSAT V.3.0. y GEOTEC para el paso de posiciones GPS en sistema WGS-84 al sistema de referencia local)

### Evaluación de los focos e individuos

Consistió en una descripción de daños (agentes bióticos y abióticos) de los pies presentes en el foco. Se seleccionaron e identificaron un total de 592 árboles de alcornoque (*Quercus suber* L.) para la evaluación de defoliación. Todos los individuos fueron georeferenciados mediante GPS monofrecuencia. La determinación de las coordenadas de cada árbol se hizo mediante un procesado diferencial por cálculo de pseudodistancias de las mediciones realizadas con este equipo quedando una precisión métrica ( $< 1\text{m}$ ) para los puntos de salida (TOPSAT V.3.0. y GEOTEC). A cada individuo se le asignó un porcentaje de defoliación de copa en categorías del 5% de acuerdo a los criterios establecidos para el seguimiento de daños en la Red Europea de Seguimiento del Estado Sanitario de Bosques (Ferreti, 1994) (Tabla 1).

### Procesamiento previo de las imágenes IKONOS

La elaboración de este estudio se ha hecho a partir de dos imágenes IKONOS GEO, una imagen pancromática y otra imagen multiespectral. Ambas recubren exactamente la misma porción de territorio de  $11 \times 11$  km y han sido tomadas en el mismo instante. Dichas

**Tabla 1.** Clases de defoliación según porcentaje de defoliación de copa (Ferreti, 1994) utilizadas en el inventario del Monte de la Alcaidesa

Clase de defoliación	Porcentaje de defoliación	Código	N.º árboles
Defoliación nula	0-10%	0	38
Defoliación ligera	11-25%	1	13
Defoliación moderada	26-0%	2	95
Defoliación grave	> 60%	3	102
Defoliación total	100%	4	0

imágenes fueron captadas el 2 de octubre del año 2000 a las 11:10 con un ángulo de elevación en la adquisición de  $65,39091^\circ$ . La zona objeto de interés en este estudio queda totalmente cubierta en ambas imágenes. La cobertura de estas imágenes cortadas recogen un área de aproximadamente  $5 \times 5$  km que engloba completamente la zona a estudiar.

Dada la existencia de estudios anteriores que apuntan sobre la mejora en las posibilidades de explotación de imágenes fusionadas a distinta resolución espacial (Chávez *et al.*, 1991; Grasso, 1993) se realizó la fusión entre la imagen compuesta por las 4 bandas multiespectrales de resolución espacial de 4 m con la imagen de la banda pancromática de 1 m. El algoritmo usado en la fusión de estas imágenes ha sido el análisis de componentes principales (Chávez *et al.*, 1991). El proceso de fusión de imágenes se realizó a través de un modelo desarrollado en ERDAS Imagine. Esta fusión crea una imagen de salida con las características espectrales de la imagen multiespectral y con la resolución espacial aportada por la banda pancromática.

### Ortorrectificación de la imagen

De acuerdo a las características de las dos imágenes empleadas, éstas tenían una corrección geométrica estándar, con lo que teóricamente la precisión geométrica que presentaban era de 50 m de error circular. En el caso concreto de las imágenes con las que se está trabajando este error aumenta considerablemente por la topografía del terreno y por el ángulo de toma del sensor. Así, para la generación de la ortoimagen IKONOS se recurrió al programa informático *PCI Geomatics* (Canada Centre for Remote Sensing), el cual incorpora un módulo específico para generar ortoimágenes a partir de imágenes IKONOS GEO. Este módulo denominado *OrthoEngine Ikonos Orthorectification* incluye un modelo paramétrico que se basa en información incluida en los metadatos y en el fichero imagen (Tokola *et al.*, 1996; Toutin y Cheng, 2000).

Debido a problemas externos sólo se pudo orrorrectificar con fiabilidad la banda pancromática de Ikonos, procediéndose posteriormente a realizar una rectificación de las bandas multiespectrales en la que no se utiliza información de elevaciones del terreno. En la rectificación de la imagen multiespectral se utilizó el módulo *Geometric Correction* de ERDAS, introduciendo 42 puntos de control cuyas coordenadas de referencia proceden también de la ortofotografía.

## Análisis de la imagen

La evaluación de daños de defoliación se realizó mediante un análisis estadístico de correlación entre variables obtenidas de la imagen satélite e información procedente del trabajo de campo. Las variables seleccionadas en la imagen del sensor IKONOS fueron las 4 bandas originales y los índices de vegetación normalizado (NDVI) y la combinación de la banda del infrarrojo y del rojo (IR/R) (útiles en la cuantificación del vigor de la vegetación). La variable de campo, «verdad terreno», con la que se busca correlación es el porcentaje de defoliación que presentan las copas de los alcornoques censados. El remuestro de niveles digitales (ND) a su posición corregida se realizó por el método del *vecino más próximo* ya que es el que supone menor transformación de los ND originales.

El análisis de correlación se llevo a cabo sobre 248 árboles. La diferencia entre el número de pies censados de los que se dispone del valor de defoliación (592 pies) y el número final de pies sobre los que se realizó el análisis de correlación (248), fue debido a la exclusión de este análisis de las muestras que se corresponden con píxeles de mezcla o de sombra. Es decir, mediante un minucioso análisis visual de cada una de la muestras, se eligieron únicamente aquellos árboles de los que se tenía la certeza que el valor del píxel recogía preferentemente información de la copa de un árbol individual (correspondiéndose

con el árbol caracterizado en campo); debiendo además recibir radiación solar directamente sobre la copa (Tabla 1).

De cada una de las muestras se extrae un único valor del ND correspondiente a las variables seleccionadas (bandas 1, 2, 3, 4, NDVI e IR/R). Aunque en un principio se pensó en seleccionar un tercio de la muestra para la consiguiente validación de los resultados, posteriormente se desestimó debido al reducido número de árboles disponibles en algunas de las categorías de defoliación.

En el análisis estadístico se emplearon diferentes técnicas: medidas de asociación (correlación de Pearson), análisis de conglomerados, y análisis discriminante (Quinn y Keough, 2002). Los cálculos necesarios en este análisis estadístico fueron realizados con el programa estadístico *Minitab v.13*.

## Resultados

### Correlación entre los valores de las bandas, IR/R y NDVI con la defoliación

Los resultados obtenidos en la fase inicial del análisis estadístico realizado (Tabla 2), mostraron que la banda IRc de Ikonos presenta un elevado coeficiente de correlación con la defoliación. El coeficiente de Pearson entre Defoliación y ND recogido para la banda 4 es de  $-0,762$ , mientras que los coeficientes de co-

**Tabla 2.** Matriz de correlación de Pearson entre los valores de los números digitales obtenidos en la imagen IKONOS y los valores de defoliación en campo. Los valores en cursiva son significativos con un nivel de confianza del 95%

	<b>Defoliación (%)</b>	<b>Índice IR/R</b>	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>
Índice IR/R	<i>-0,506</i> <0,001					
Banda 1	<i>0,231</i> <0,001	-0,641 <0,001				
Banda 2	<i>0,200</i> <i>0,002</i>	-0,624 <0,001	<i>0,736</i> <0,001			
Banda 3	<i>0,168</i> <i>0,008</i>	-0,813 <0,001	<i>0,757</i> <0,001	<i>0,0752</i> <0,001		
Banda 4	<i>-0,762</i> <0,001	<i>0,467</i> <0,001	-0,103 <i>0,105</i>	<i>0,064</i> <i>0,317</i>	-0,021 <i>0,740</i>	
NDVI	<i>-0,449</i> <0,001	<i>0,939</i> <0,001	-0,712 <0,001	-0,651 <0,001	-0,906 <0,001	<i>0,420</i> <0,001

relación entre Índices y Defoliación se quedan en  $-0,506$  para el ratio IR/R y en  $-0,449$  para el NDVI.

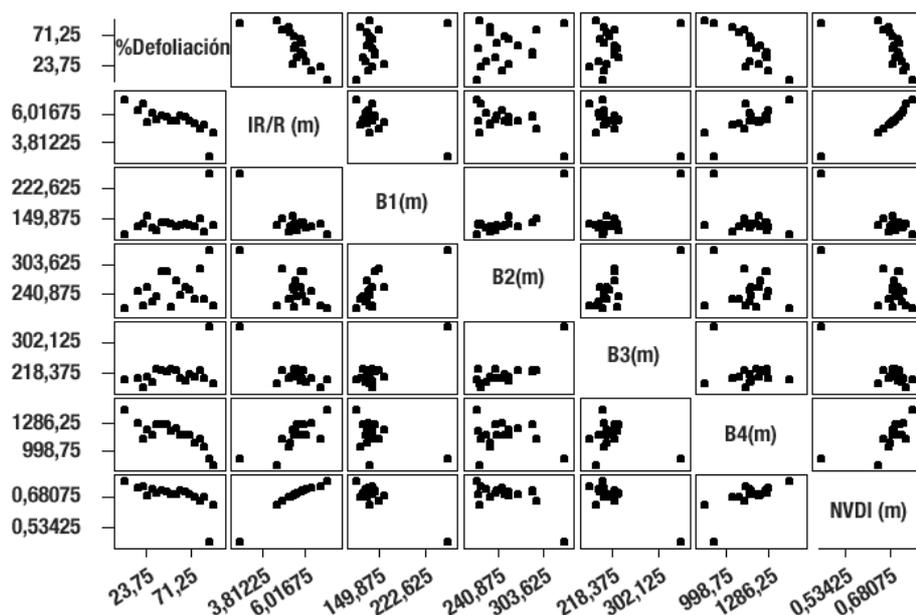
La tendencia que siguen los valores de la Banda 4, el índice IR/R y el NDVI frente a la defoliación pueden observarse en la Figura 2, donde están representados todos los valores muestrales, presentándose una dispersión evidente entre los valores de los ND de la imagen para el mismo porcentaje de defoliación.

La dispersión que presentan los valores de la muestra en cada categoría de defoliación justifica la elección del valor de la mediana de las variables para cada uno de los intervalos de defoliación como valor representativo de clase. Debido al gran número de muestras pertenecientes a la categoría de defoliación 0% se procedió a reclasificar las 38 muestras incluidas en ésta categoría en tres intervalos: 0%, 5% y 10%. Con ello se consiguió que la muestra cubra todo el rango posible de defoliación. Para ello se realizó un análisis de conglomerados (distancia euclídea y el método de agrupación de Ward) con los valores de las bandas asociados a cada uno de los 38 árboles de defoliación 0%. El análisis del dendrograma (datos no incluidos) permite agrupar el conjunto de observaciones tomadas para la categoría inicial 0% de defoliación en 3 grupos, que se asignan a las categorías construidas 0%, 5% y 10%, y que formaron el nuevo conjunto muestral (Tabla 3). En total se establecieron 20 categorías que englobaban el rango de defoliación

desde el 0% hasta el 95%, ambos inclusive, en intervalos del 5%.

Se realizó de nuevo un análisis de correlación ahora para valores de mediana en cada una de las nuevas categorías de defoliación definidas. En la Tabla 4 se recogen los valores del coeficiente de Pearson, donde se observa que se mejoran los valores obtenidos previamente (Tabla 2) para todas las variables consideradas debido a que se reduce la dispersión de los valores por categoría de defoliación.

La representación gráfica de los valores de mediana para las variables defoliación y ND de la banda 4 (Figura 3) mostraron valores anómalos para algunas de las categorías de defoliación (10-30%). Estos valores se salían fuera de la tendencia general apreciada para el conjunto de la serie. Son varios los motivos posibles de este hecho, entre los que se apunta el reducido número de muestras para algunas de las categorías de defoliación reconocidas por análisis visual de la imagen, y que dan una medida poco representativa de la clase de defoliación; y sobre todo, la resolución espacial de la imagen. Cabe recordar en este punto, que la resolución de la imagen sobre la que se tomó el valor de ND de cada muestra es de 4 m, lo que conlleva que el valor único por píxel de la imagen sea consecuencia no sólo de la reflectividad aportada por la copa del pie en cuestión que sería lo deseable, sino que en un indeterminado porcentaje de las muestras, pro-



**Figura 2.** Matriz de gráficos bidimensionales para la variable defoliación y las bandas e índices utilizados en el análisis de defoliación.

**Tabla 3.** Valores de mediana de los números digitales para las bandas e índices de la imagen IKONOS para cada categoría de defoliación incluyendo los nuevos grupos para la categorías 0%, 5% y 10%

%D	N	IR/R	B1	B2	B3	B4	NDVI
0	15	6,921	119,00	262,00	211,00	1.438,00	0,748
5	16	7,445	108,00	193,00	190,00	1.425,50	0,763
10	7	6,883	115,00	205,00	197,00	1.343,00	0,746
15	2	6,293	132,50	245,50	205,00	1.285,50	0,724
20	2	6,790	138,00	216,00	176,50	1.130,50	0,732
25	9	5,396	158,00	256,00	208,00	1.225,00	0,687
30	11	6,058	127,00	223,00	194,00	1.162,00	0,717
35	11	5,613	123,00	236,00	230,00	1.273,00	0,698
40	11	5,906	142,00	289,00	224,00	1.271,00	0,710
45	13	5,766	142,00	289,00	222,00	1.273,00	0,704
50	12	5,434	138,00	211,00	227,00	1.202,50	0,689
55	15	5,482	130,00	269,00	224,00	1.230,00	0,692
60	22	5,858	134,00	239,00	205,00	1.167,50	0,708
65	24	5,788	138,00	255,50	195,50	1.166,00	0,705
70	25	5,436	134,00	249,00	213,00	1.160,00	0,689
75	11	5,255	130,00	229,00	208,00	1.090,00	0,680
80	15	4,862	150,00	295,00	224,00	1.125,00	0,659
85	12	5,211	119,00	229,00	205,00	1.042,50	0,678
90	7	4,705	135,61	251,06	211,415	916	0,66
95	8	4,604	134,00	214,00	190,00	855,00	0,642

D: Porcentaje de defoliación. N: Número de muestras tomadas. IR/R: Ratio entre bandas 4 y 3. B1: ND de la banda 1. B2: ND de la banda 2. B3: ND de la banda 3. B4: ND de la banda 4. NDVI: Índice de vegetación normalizado.

ceda de materiales adyacentes al árbol evaluado. Pese a ésta aparente limitación impuesta por la resolución espacial del sensor IKONOS en la evaluación del vigor de pies individuales, es evidente la existencia de una clara tendencia decreciente entre ND y defoliación para la muestra extraída.

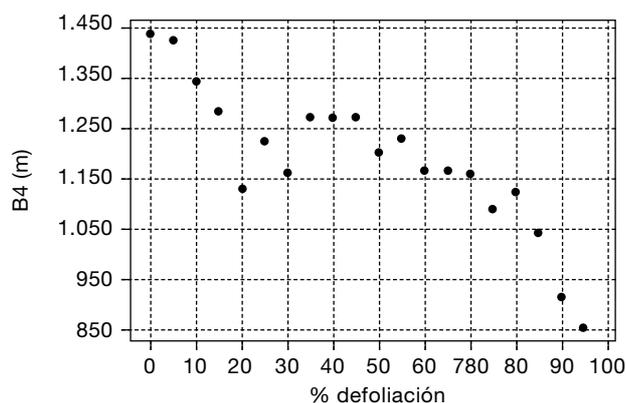
### Índice de defoliación

La definición de un índice de defoliación se hizo mediante un análisis discriminante a partir de las categorías de defoliación estimadas en campo, considerando la redefinición estadística realizada para el in-

**Tabla 4.** Matriz de correlación de Pearson entre los valores de los números digitales obtenidos en la imagen IKONOS y los valores de defoliación reclasificados. Los valores en cursiva son significativos con un nivel de confianza del 95%

	Defoliación (%)	Índice IR/R	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Índice IR/R	<i>-0,870</i> <0,001					
Banda 1	0,099 0,695	<i>-0,323</i> 0,191				
Banda 2	0,153 0,544	<i>-0,253</i> 0,311	0,013			
Banda 3	0,109 0,666	<i>-0,338</i> 0,170	0,147 0,560	0,548 0,019		
Banda 4	<i>-0,820</i> <0,001	0,733 0,001	<i>-0,116</i> 0,511	0,166 0,511	0,319 0,196	
NDVI	<i>-0,875</i> <0,001	0,985 <0,001	<i>-0,327</i> 0,186	<i>-0,191</i> 0,448	<i>-0,238</i> 0,341	0,790 <0,001

Gráfico defoliación estimada en campo y banda B4 (mediana)



**Figura 3.** Representación de los valores de la mediana para la variable banda 4 (ND en la región IRc) frente al porcentaje de defoliación estimado en campo.

intervalo 0%, y tomando los valores mediana de los valores de las bandas 1, 2, 3 y 4 (Tabla 3). Las muestras de árboles fueron agrupadas previamente en 6 intervalos de defoliación de acuerdo a la similitud de valores que presentan las diferentes variables (valores mediana) en las categorías definidas (Tabla 5).

Posteriormente se procedió al análisis discriminante, el cual permitió establecer el grado de acierto estadístico en la clasificación previamente realizada en intervalos de defoliación, esto es, la verosimilitud de que una determinada muestra pertenezca al grupo previsto. Así, para los 6 grupos definidos, que corresponden a intervalos de defoliación se obtuvo un grado de acierto del 95% (Lambda de Wilks = 0,010;  $\chi^2 = 64,304$ ,  $P < 0,001$ ). Este resultado asegura la bondad estadística de la clasificación realizada. Las Funciones Discriminantes Lineales (FDLs) obtenidas permitieron una nueva clasificación de las muestras (Tabla 6). Del conjunto de FDLs para nuestro análisis, las que ofrecen una mayor separación corresponden a las categorías 0 y 5, es decir, las de 0%-10% y de 90-95% de defoliación.

Utilizando la función discriminante correspondiente al grupo 0 (0-10%) de defoliación (Tabla 6) se con-

**Tabla 5.** Correspondencia entre los grupos de defoliación procedentes del análisis discriminante y los valores reclasificados de defoliación

Grupo	Categorías de defoliación (%)
0	0-10
1	15-25
2	30-45
3	50-70
4	75-85
5	90-95

siguió generar un índice estadístico de defoliación (IED) a partir de las variables B1, B2, B4 y NDVI, cuya correlación con la defoliación estimada en campo mejora, para el espacio muestral considerado, la correlación mostrada por el NDVI y el IR/R, índices generados, igualmente, a partir de las variables originales (B3 y B4) (Tabla 7). Este IED está formado por una combinación lineal de las variables de partida que han demostrado una mejor definición frente a la variable de campo defoliación. El IED muestra un coeficiente de correlación de Pearson de  $-0,925$  con el porcentaje de defoliación estimado en campo (Tabla 7).

Por tanto, el análisis multivariable permitió generar un índice estadístico de defoliación (IED) a partir de las variables que ofrece el satélite Ikonos (bandas 1, 2, 3, 4). Así este IED generado es una nueva variable, estadísticamente creada, que de una forma más precisa permitió estimar el grado de defoliación. Una vez que se calcula el IED a través de los valores de mediana para cada categoría de defoliación, es posible obtener la función de regresión lineal entre la variable defoliación y el IED (Tabla 8).

Con la función de regresión obtenida es posible calcular la defoliación de los pies de la muestra a partir de información procedente únicamente de la imagen IKONOS (Figura 4). Esto permite disponer, para cada uno de los árboles, de un valor de defoliación evaluada en

**Tabla 6.** Funciones Discriminantes Lineales (FDLs) obtenidas para las categorías de defoliación

	0	1	2	3	4	5
Constante	-3.701,8	-3.488,3	-3.358,4	-3.287,6	-3.050,5	-2.770,6
B1	8,4	8,6	8,3	8,3	8,0	7,7
B2	-1,4	-1,3	-1,2	-1,2	-1,1	-1,0
B4	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6
NDVI	7.290,9	7.124,3	6.994,7	6.928,7	6.708,1	6.464,5

B1: banda 1. B2: banda 2. B4: banda 4. NDVI: Índice de vegetación normalizado.

**Tabla 7.** Matriz de correlación de Pearson entre los valores de los números digitales obtenidos en la imagen IKONOS y el índice de estimación de defoliación (IED) y los valores de defoliación reclasificados. Los valores en cursiva son significativos con un nivel de confianza del 95%

	Defoliación (%)	Índice IR/R	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	NDVI
Índice IR/R	-0,889 < 0,001						
Banda 1	0,313 0,179	-0,537 0,015					
Banda 2	0,195 0,410	-0,333 0,152	0,589 0,006				
Banda 3	0,188 0,426	-0,410 0,072	0,269 0,251	0,609 0,004			
Banda 4	-0,858 < 0,001	0,795 < 0,001	-0,331 0,154	0,060 0,802	0,167 0,483		
NDVI	-0,898 < 0,001	0,989 < 0,001	-0,528 0,017	-0,276 0,239	-0,327 0,160	0,837 < 0,001	
IDE	-0,925 < 0,001	0,877 < 0,001	-0,304 0,193	-0,103 0,665	-0,058 0,807	0,963 < 0,001	0,899 < 0,001

campo y de otro de defoliación calculada a través de las bandas de la imagen. Como medida de la separación entre la defoliación estimada en campo y la calculada con la metodología anteriormente escrita, se calcula el Error cuadrático por categoría de defoliación.

## Discusión

La tecnología actual de sensores remotos ha posibilitado la puesta a punto de nuevas técnicas para la obtención de datos de mayor detalle de la superficie terrestre hasta llegar a los satélites de alta resolución como es el caso del satélite IKONOS o del QuickBird (Tanaka y Sugimura, 2001). Sin embargo, son muy recientes los estudios sobre clasificación digital de imágenes de satélite IKONOS aplicados al estudio de ecosistemas forestales (Franklin *et al.*, 2001; Tao *et al.*, 2004; Kato, 2004). Los estudios de procesos de decaimiento de ecosistemas forestales han utilizado sensores de media

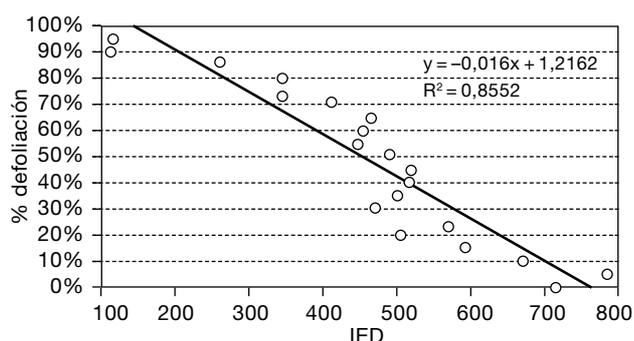
resolución espacial (Ekstrand, 1994; Zarco-Tejada *et al.*, 1999; Granica *et al.*, 2000), utilizando la variable defoliación. Lambert *et al.* (1995) utiliza una regresión logarítmica y un test no paramétrico Kruskal-Wallis para diferenciar entre categorías de daños forestales, consiguiendo clasificar mediante ecuaciones de regresión tres categorías de daños con un 71-75% de precisión para parcelas mayores de 40 años.

Sin embargo, los procesos de decaimiento en masas de *Quercus* presentan bastantes limitaciones al empleo de este tipo de sensores, en particular los derivados de la escasa cobertura del arbolado (Navarro *et al.*, 1997). En parte estos problemas pueden resolverse mediante el uso de sensores de alta resolución espacial (Wulder *et al.*, 2004; Clark *et al.*, 2004). En este trabajo se ha utilizado una imagen de alta resolución espacial y espectral procedente del sensor IKONOS, para estudiar su posible aplicación al estudio de procesos de decaimiento en masas huecas de *Quercus suber*. La información obtenida a partir de las bandas espectrales del

**Tabla 8.** Ecuación de regresión entre el Índice de Estimación de la Defoliación (IED) y los valores de defoliación estimados en campo

Ecuación	R <sup>2</sup>	F	Significación
$Y_{\% \text{ defo calculado}} = -0,0016 * IED + 1,2162$	0,85	12,387	$P < 0,001$

Variable dependiente D: defoliación. Variable independiente IED: Índice de Estimación de la Defoliación derivado de la imagen IKONOS.



**Figura 4.** Recta de regresión entre los valores de defoliación estimados en campo y los valores obtenidos a través del Índice de Estimación de la Defoliación (IED).

sensor (banda 4, IRc), así como los índices más frecuentes (IR/R y NDVI) han mostrado una buena correlación con la defoliación, aunque con valores del coeficiente de correlación menor de  $-0,5$ . Una forma de mejorar estos valores es reclasificar los valores de defoliación para cubrir todo el rango de valores (0-95%), y que todas las categorías consideradas en este caso (20 categorías de defoliación) tengan un número suficiente de muestras. Con estos cambios se ha logrado mejorar notablemente los coeficientes de correlación, con valores superiores a  $-0,8$  para la banda 4 (banda IRc) y los índices IR/R y NDVI.

No obstante, es posible mejorar estos resultados mediante la definición de un índice de estimación de la defoliación (IED) generado a partir de la combinación lineal de las bandas originales del sensor Ikonos. El IED es la variable extraída del análisis estadístico que mejor correlación presenta sobre la defoliación de copa medida en campo. El coeficiente de correlación que presenta es de  $0,8552$ , permitiendo calcular la defoliación en pies de alcornoque a través de la recta:  $Y_{\% \text{ defo calculado}} = -0,0016 * IED + 1,2162$ . Este IED permite una descripción más acertada del síntoma de defoliación estudiado, que los tradicionales índices de vegetación NDVI e IR/R ampliamente utilizados en la caracterización del estado fitosanitario de las masas forestales (Clark *et al.*, 2004).

La aportación que realiza cada una de las bandas del sensor IKONOS al nuevo IDE puede deducirse de la matriz de correlaciones calculada (Tabla 7). En esta matriz la banda 4 (banda IRc) muestra un coeficiente de correlación IED-B4 de  $0,963$  lo que indica que gran parte de la información que contiene el IED proviene de la respuesta espectral mostrada por la vegetación en el Infrarrojo cercano. Este hecho está en consonancia con las conclusiones de Granica *et al.*, (2000)

que evalúan la defoliación de algunas de las principales especies forestales europeas a través de la información aportada por los canales Infrarrojo cercano con los satélites Landsat TM e IRS-1C LISS. Los coeficientes de correlación mostrados por ambos sensores están en torno al  $0,8$  considerando parcelas de *Picea abies* del norte de Europa. En la región mediterránea, el bajo coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,25$ ) obtenido para las parcelas de *Quercus* sp. es atribuible a la alta heterogeneidad propia del área de estudio, frente a la resolución espacial de las imágenes empleadas (30 metros de Landsat TM). El Índice Estadístico de Defoliación (IED), generado a partir de combinación lineal de bandas del sensor IKONOS, mejora la descripción de la variable defoliación para el espacio muestral considerado, frente a los índices de vegetación clásicos. Sin embargo, la validación de los correspondientes resultados es imprescindible antes de poder extraer conclusiones definitivas.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado bajo la supervisión del Servicio de Ordenación de los Recursos Forestales y el Departamento de Plagas y Enfermedades de la Dirección General de Gestión del Medio Natural de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a través del Convenio *Seguimiento de los daños de seca sobre masas de Quercus en Andalucía. Propuesta de soluciones*. El trabajo forma parte de las conclusiones del proyecto FEDER (1FD97-0911-C03-03), *Causas del decaimiento y seca de las masas de Quercus L. mediterráneas. Técnicas de amortiguamiento*.

## Referencias bibliográficas

- ALLUE J.L., 1990. Atlas Fitoclimático de España. Taxonomías. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. I.N.I.A. Madrid.
- BLACKBURN G.A., 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *Int J Remote Sensing* 19(4), 657-675.
- BRASIER C.M., 1996. *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann Sci For* 5 (4), 347-558.
- CANO GONZÁLEZ F., NAVARRO CERRILLO R.M., GARCÍA-FERRER PORRAS A., 2003 Clasificación de la vegetación en un monte alcornocal mediante imágenes IKONOS. *Revista de Teledetección* 1, 31-42.

- CHÁVEZ P.S., SIDES S.C., ANDERSON J.A., 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogramm Eng Remote Sensing* 57(3), 295-303.
- CLARK D.B., SOTO C., ALFARO L., READ J., 2004. Quantifying mortality of tropical rain forest trees using high-spatial-resolution satellite data. *Ecology Letters* 7, 52-59.
- EKSTRAND S., 1994. Assessment of forest damage with Landsat TM: Correction for varying forest stand characteristic. *Remote Sens Environ* 47(3), 291-302.
- FERRETTI M. (ed.), 1994. *Especies forestales mediterráneas. Guía para la evaluación de las copas*. Publicaciones de la Comisión de las Comunidades Europeas. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Brusels, Ginebra.
- FRANKLIN S.E., WULDER M.A., GERYLO G.R., 2001. Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International. Int J Remote Sensing* 22(13), 2627-2632.
- GRANICA K., SCHARDT M., GALLAUN H., 2000. Monitoring of Protection Forests by Means of SPOT4 Satellite Data. *Proceedings of 20<sup>th</sup> EARSEL-Symposium «A Decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation»*, 14-16 June 2000, Dresden, Germany.
- GRASSO D.N., 1993. Applications of the IHS color transformation for 1:24,000 scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative. *Photogramm Eng Remote Sensing* 59(1):73-80.
- HOLMGREN P., THURESSON T., 1998. Satellite remote sensing for forestry planning- a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(1), 90-110.
- KATOH M., 2004. Classifying tree species in a northern mixed forest using high-resolution IKONOS data. *J For Res* 9, 7-14.
- LAMBERT N.J., ARDO J., ROCK B.N., VOGELMANN J.E., 1995. Spectral characterization and regression-based classification of forest damage in Norway spruce stands in the Czech Republic using Landsat Thematic Mapper data. *Int J Remote Sensing* 16(7), 1261-1287.
- NAVARRO CERRILLO R.M., FERNÁNDEZ REBOLLO P., CHANFREUD R., GONZÁLEZ M.P., 1997. Seguimiento mediante imágenes Landsat-Tm de los daños producidos por un periodo prolongado de sequía sobre encinares en Sierra Morena (Córdoba). *Primeros resultados Actas del I Congreso Forestal Hispano Luso- II Congreso Forestal Español Tomo II: 234-240*.
- NAVARRO CERRILLO R.M., FERNÁNDEZ REBOLLO P., RUIZ NAVARRO J.M., 2000. *Manual de Campo para el Inventario de Daños sobre masas de Quercus sp. afectadas de daños de Seca*. Servicio de Ordenación de los Recursos Forestales. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 33 pp.
- NAVARRO CERRILLO R.M., FERNÁNDEZ REBOLLO P., TRAPERO A., SÁNCHEZ M.E., 2001. *Desarrollo de modelos de evaluación de daños producidos por la seca de especies del género Quercus L. en Andalucía. Propuestas de solución. Informe Final 2001*. Departamento de Ingeniería Rural y Departamento de Agronomía (ET-SIAM, Universidad de Córdoba), Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. 160 pp.
- QUINN G.P., KEOUGH, M., 2002. *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. University Press, Cambridge, 527 pp.
- SÁ I.B., ANTONIO R., ALMOROX J.A., 1999. Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación. *Comunicación expuesta en el VIII Congreso Nacional de Teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Diputación de Albacete. Albacete.
- SÁNCHEZ M.E., SÁNCHEZ J.E., NAVARRO R.M., FERNÁNDEZ P., TRAPERO A., 2003. Incidencia de la podredumbre radical causada por *Phytophthora cinnamomi* en masas de Quercus en Andalucía. *Bol San Veg Plagas* 29(1), 89-108.
- TAO C., HU Y.; JIANG W., 2004. Photogrammetric exploitation of IKONOS imagery for mapping applications. *Int J Remote Sensing* 25(14), 2833-2853.
- TANAKA S., SUGIMURA T., 2001. A new frontier of remote sensing from IKONOS images. *Int J Remote Sensing* 22(1), 1-5.
- TOKOLA T., PITKANEN J., PATINEN S., MUINONEN E., 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *Int J Remote Sensing* 17(12), 2333-2351.
- TOUTIN T., CHENG P., 2000. Demystification of Ikonos. *EOM* 9(7), 17-21.
- WULDER M., WHITE J., NIEMANN K., NELSON T., 2004. Comparison of airborne and satellite high spatial resolution data for the identification of individual trees with local maxima filtering. *Int J Remote Sensing* 25(11), 2225-2232.
- ZARCO-TEJADA P.J., MILLER J.R., MOHAMMED G.H., NOLAND T.L., SAMPSON P. H., 1999. Índices ópticos obtenidos mediante datos hiperespectrales del sensor CASI como indicadores de estrés en zonas forestales. *Comunicación expuesta en el VIII Congreso Nacional de Teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Diputación de Albacete. Albacete.