

ANÁLISIS DE LA UTILIDAD DE LA INFORMACIÓN DEL SENSOR WiFS DEL SATÉLITE INDIO IRS-1C PARA EL INVENTARIO FORESTAL NACIONAL DE ESPAÑA *

JOSÉ MIGUEL CUEVAS*, ANTONIO VÁZQUEZ* Y FEDERICO GONZÁLEZ-ALONSO*

RESUMEN

Se analiza el interés de la información captada por el sensor de resolución espacial media WiFS del satélite indio IRS-1C para el Inventario Forestal Nacional de España en un área mediterránea ocupada por bosques de frondosas. Se han utilizado los datos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional situadas en el Parque Natural de los Alcornocales y una imagen WiFS captada en fecha cercana a las de toma de los datos de campo de estas parcelas. Aunque los coeficientes de correlación obtenidos entre el área basimétrica de las parcelas y la información espectral IRS1-C WiFS no son altos, este tipo de imágenes ha mostrado su gran utilidad para diferenciar las zonas arboladas de las no arboladas, y para dividir el área en estudio en zonas con diferencias estadísticamente significativas en su área basimétrica basándose en la división del NDVI de WiFS en varios rangos.

Palabras clave: Inventario Forestal Nacional, área basimétrica, IRS-1C WiFS, NDVI.

SUMMARY

The interest of the information obtained by the medium spatial resolution WiFS sensor of the indian satellite IRS-1C for the spanish National Forests Inventory has been analyzed in a mediterranean area of hardwood forests. There have been used the data of the ground plots of the Second Spanish National Forest Inventory of Spain located in the Parque Natural de los Alcornocales (provinces of Cádiz and Málaga, Spain) and a IRS-1C WiFS image quite contemporary with the ground plots data. Although the correlation coefficients between the spectral information IRS1-C WiFS and the basal area of the inventory ground plots are not high, these images are of great utility for differentiating the tree covered areas from those without trees, and for the delimitation of forest areas with basal area significantly different using a segmentation of the NDVI of WiFS by ranks.

Key words: National Forests Inventory, basal area, IRS-1C WiFS, NDVI.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre la utilidad de las imágenes captadas por los satélites de recursos naturales

para la inventariación de los recursos forestales son abundantes, pero una gran mayoría están realizados en áreas geográficas del hemisferio norte ocupadas por bosques de coníferas, existiendo un

* Laboratorio de Teledetección CIFOR-INIA. Ctra. de A Coruña, km. 7, 28040 Madrid.

Recibido: 01/03/00.

Aceptado: 26/09/00.

gran vacío en el estudio de la aplicación de las imágenes de satélite al inventario forestal de bosques mediterráneos de frondosas.

A partir de los resultados del Segundo Inventario Forestal Nacional (DGCONA, 1998), se obtiene que las masas forestales con especies dominantes de frondosas ocupan en España 6635038,56 ha, y 1130063,39 ha en que las especies dominantes son coníferas y frondosas. Por tanto, el 55,84% de la superficie arbolada total, 13904659,61 ha, está ocupada por bosques en que las especies dominantes son frondosas, o frondosas y coníferas. Esta mayoría de superficie ocupada por masas forestales en que las frondosas son dominantes, en una gran proporción pertenecientes a quercíneas mediterráneas, hace que tenga gran interés en el caso español el estudio de las posibilidades ofrecidas por las imágenes de satélite a su inventario. Los datos anteriores son sin tener en cuenta la clase del Segundo Inventario Forestal Nacional «Matorral, pastizal, o cultivos con arbolado ralo» que ocupa 3278961,54 ha de las que parte son dehesas de quercíneas de baja densidad.

El Segundo Inventario Forestal Nacional de España (ICONA, 1990) adoptó como diseño un muestreo sistemático adoptándose como puntos de muestreo los vértices de la malla kilométrica UTM en las zonas consideradas como arboladas que se obtuvieron a partir de la digitalización de las hojas a escala 1:50.000 del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

En cada parcela de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2) se anotaron diversos datos relativos a la estación y se midieron los pies mayores, aquellos árboles cuyo diámetro normal fuera igual o superior a 75 mm, en círculos concéntricos de 5, 10, 15 y 25 m de radio. En cada uno de estos círculos se midió el diámetro normal y otros parámetros de los pies mayores cuyo diámetro normal fuese inferior a 125, 225, 425, e igual o superior a 425 mm, respectivamente. Los pies menores, aquellos árboles con diámetro normal mayor de 24 mm y menor de 75 mm, se contaron por especies en un radio de 5 m.

El Parque Natural de los Alcornocales está situado en el sur de España en las provincias de Cádiz

y Málaga (Comunidad Autónoma de Andalucía), y tiene una superficie de 170.025 ha. Es una reserva natural de gran importancia que está cubierta en su mayor parte por masas forestales de especies de frondosas, principalmente alcornoque (*Quercus suber* L.) y, en menor proporción, roble o quejigo andaluz (*Quercus canariensis* Willd.), acebuche (*Olea europea* L.), madroño (*Arbutus unedo* L.) y otras especies. La presencia de coníferas es escasa y la de eucaliptos muy escasa.

El número de parcelas de campo del IFN2 situadas en el Parque Natural de Los Alcornocales es 781. Dado que la malla utilizada en el IFN2 es cuadrada de un kilómetro de lado en las zonas consideradas inventariables, se deberían haber realizado 1700 parcelas aproximadamente si todo el Parque estuviera se hubiera considerado inventariable. La diferencia entre ambos números de parcelas es notable en un área eminentemente forestal como es el Parque Natural de los Alcornocales, y una de las razones que han conducido a realizar este estudio utilizando todo el área del parque.

Las diferencias entre este estudio y el realizado sobre el inventario forestal de Oroquieta-Erviti (CUEVAS *et al.*, 1995) son el tipo de imagen utilizada, IRS-1C WiFS y no Landsat TM de 30 m de resolución espacial, el que las parcelas del IFN2 son de radios múltiples y que en este caso la imagen WiFS empleada es bastante coetánea con las fechas de los datos de campo, en tanto que en el caso de Oroquieta-Erviti había una diferencia de tres años entre la imagen Landsat TM utilizada y las fechas de toma de los datos de campo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imagen IRS-1C WiFS empleada

Son varios los satélites puestos en órbita por el programa espacial indio de teledetección (Bhaskara 1 y 2, IRS 1A y 1B, IRS-P2, IRS-1C, IRS-1D). El satélite IRS-1C fue puesto en órbita en diciembre de 1995. En KASTURIRANGAN *et al.* (1996) se encuentra información sobre este satélite y sus sensores. Este satélite tiene una órbita polar a una altura de 817 km y dispone de tres

sensores: una cámara pancromática de alta resolución espacial nominal (5,8 m), el sensor LISS-III (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) con dos bandas en el visible, una en el infrarrojo cercano y una en el infrarrojo lejano, y una resolución espacial nominal de 23,5 m en el visible e infrarrojo cercano y 70,5 m en el infrarrojo lejano, y el sensor WiFS (Wide-Field Sensor) con dos bandas espectrales correspondientes al visible (0,62-0,68 μ) y al infrarrojo cercano (0,77-0,86 μ), y una resolución espacial nominal de 188,3 m.

En este estudio se ha usado una imagen WiFS captada el 17 de agosto de 1996. Las fechas de los datos de las parcelas de campo del IFN2 se extienden desde el 29 de agosto de 1995 al 6 de noviembre de 1996, siendo las 75 parcelas de 1995 parte de las situadas en la Provincia de Málaga. Por tanto, los datos de campo del IFN2 utilizados son bastante coetáneos con la imagen IRS-1C WiFS empleada.

Esta imagen tiene muy buenas características: poca deformación espacial, cubre gran parte de España excepto el sector más septentrional y la cubierta nubosa es muy escasa, siendo nula sobre el Parque Natural de los Alcornocales. Un sector de esta imagen WiFS cubriendo un extenso área que incluye el Parque Natural de los Alcornocales fue georeferenciado adoptando como tamaño de píxel 180 m para lo que se utilizó una digitalización de los límites de la provincia de Cádiz. Se han usado 22 puntos de control, todos ellos situados en la costa (Mar Mediterráneo y Océano Atlántico), obteniéndose un error cuadrático medio de 0,88 equivalente a 158,4 m.

Puesto que el radio mayor de las parcelas de campo del IFN2 es 25 m y la superficie de un círculo de este radio es 1963,49 m², la superficie de una parcela de campo del IFN2 es solamente 6,06% de la superficie cubierta por un píxel IRS1-C WiFS. Esta enorme diferencia de superficies hace que tenga gran interés analizar si el uso de imágenes de satélite de las características de las IRS1-C WiFS puede ser de utilidad para el Inventario Forestal Nacional por su economía, amplio área cubierta y alta resolución temporal, cinco días en la latitud de España peninsular.

Dado los lógicos, y desconocidos, errores cometidos en la localización de las parcelas de campo en el terreno, la utilización de imágenes de resolución espacial media como las IRS1-C WiFS puede ser de gran interés, aun cuando el error cuadrático medio obtenido en la georeferenciación de la imagen utilizada equivalga a una distancia considerable. SALVADOR (1999) ha propuesto un modelo paramétrico que ha aplicado a la estimación de las relaciones entre información de las parcelas de campo del inventario ecológico y forestal de Cataluña, que, al igual que en este caso, se asume localizadas con poca precisión, e información Landsat TM.

No se han realizado correcciones radiométricas ni atmosféricas a esta imagen ya que se iba a operar exclusivamente con una sola imagen (ROBINOVE 1982). El sector de la imagen WiFS cubriendo el Parque Natural de Los Alcornocales ha quedado constituido por 52898 píxeles. En la Lámina 1 aparece la información WiFS del área del Parque Natural de los Alcornocales y los límites de éste.

Como información espectral de WiFS se ha utilizado las dos bandas de este sensor (visible e infrarrojo cercano) y el Índice de Vegetación Normalizado, NDVI (TUCKER 1979). El NDVI tiene como expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{visible}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{visible})$$

El NDVI correspondiente a las parcelas del IFN2 en el Parque Natural de los Alcornocales tiene en cinco casos un valor igual o inferior a cero y en cuatro casos un valor inferior a cero, y su histograma aparece representado en la figura 1.

Esta misma imagen IRS1-C WiFS se ha utilizado para estimar la superficie cubierta por las copas en los pinares de pino piñonero de Barbate (Cádiz) también a partir de los datos de las parcelas de campo del IFN2 (CUEVAS *et al.*, 2000).

Parámetros forestales empleados

Se ha empleado como parámetro forestal fundamental deducido de los datos de las 781 parcelas de campo del IFN2 situadas en el área en estudio su área basimétrica, suma de las secciones de los

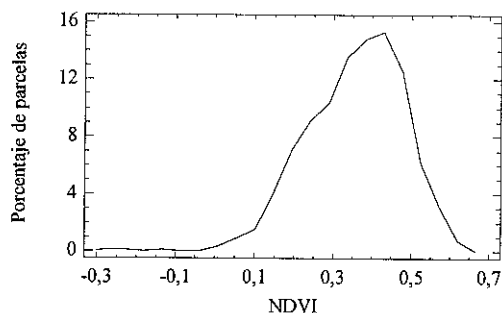


Fig. 1. Histograma del NDVI de IRS-1C WiFS correspondiente a las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional situadas en el Parque Natural de Los Alcornocales. [Histogram of the IRS-1C WiFS NDVI of the Second National Forest Inventory ground plots located into the Parque Natural de los Alcornocales.]

pies mayores a 1,3 m del suelo expresada en metros cuadrados por hectárea. El área basimétrica permite la descripción de una masa forestal en base a unos datos de campo obtenibles con sencillez y fiabilidad como son los diámetros normales de los árboles. El área basimétrica ha sido utilizada en diversos estudios de Teledetección (BROCKHAUS & KHORRAM, 1992; CUEVAS *et al.*, 1995; GEMMEL, 1995).

No se ha utilizado otros parámetros forestales como volúmenes de madera, debido a que para su cálculo es necesaria la utilización de ecuaciones o tarifas de cubicación, lo que en el caso de las frondosas mediterráneas, y muy especialmente en el caso del alcornoque, es problemático y una fuente adicional de errores. También se ha empleado el número de pies menores presente en las parcelas con el objetivo de analizar las parcelas totalmente desarboladas, es decir, sin pies mayores ni menores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación entre el área basimétrica de las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional y la información del sensor WiFS

El área basimétrica media de las parcelas del IFN2 en el Parque Natural de los Alcornocales es 10,14 m²/ha. El 70,91% del área basimétrica corresponde al alcornoque, el 15,31% a los queji-

gos, el 7,85 % al acebuche, el 3,01% a diversas especies de pinos (*Pinus pinaster* Ait. y *Pinus pinea* L. en su mayoría) y el 1,75% al madroño. El número de parcelas en que el área basimétrica es nula, es decir, sin pies mayores, es 105, un 13,44%. El valor máximo del área basimétrica es 43,69 m²/ha. El 25% de las parcelas tiene un área basimétrica inferior a 2,57 m²/ha y el 25% superior a 16,06 m²/ha.

El histograma del área basimétrica de las parcelas (figura 2) pone de manifiesto que las masas forestales del Parque Natural de los Alcornocales en su conjunto son bastante irregulares. En la tabla 1 figuran los parámetros estadísticos básicos de las parcelas del IFN2 en el Parque Natural de los Alcornocales y de la información IRS-1C WiFS correspondiente.

Los coeficientes de correlación obtenidos entre el área basimétrica y los datos espectrales WiFS, sin excluir y excluyendo las 105 parcelas en que el área basimétrica es nula, y sin excluir y excluyendo las parcelas con un NDVI menor o igual a cero aparecen en la tabla 2. El mayor coeficiente de correlación (0,409) es con el NDVI excluyendo las cinco parcelas en que éste es menor o igual a cero.

El excluir del análisis aquellas parcelas con área basimétrica nula, es decir, sin pies mayores, disminuye la correlación notablemente. El coefi-

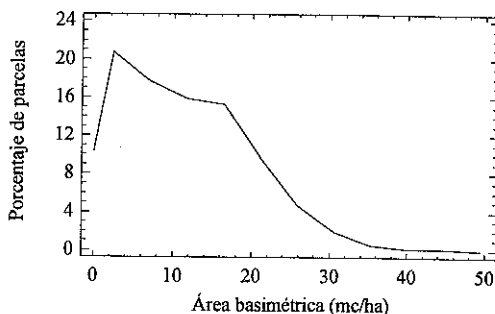


Fig. 2. Histograma del área basimétrica de las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional situadas en el Parque Natural de los Alcornocales. [Histogram of the basal area of the Second National Forest Inventory ground plots located into the Parque Natural de los Alcornocales.]

TABLA 1

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES Y DE LOS PÍXELES CORRESPONDIENTES EN LA IMAGEN IRS-1C WIFS. [STATISTICAL PARAMETERS OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES AND THE CORRESPONDING PIXELS IN THE IRS1-C WIFS IMAGE.]

	Área basimétrica (m ² /ha)	Visible	Infrarrojo cercano	NDVI
Media	10,14	62,12	129,36	0,356
Desviación Típica	8,42	16,22	12,57	0,122
Mínimo	0	37	42	-0,282
Máximo	43,69	143	170	0,642

TABLA 2

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÁREA BASIMÉTRICA DE LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES Y LA INFORMACIÓN IRS-1C WIFS. [CORRELATION COEFFICIENTS AMONG THE BASAL AREA OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES AND THE IRS1-C WIFS INFORMATION.]

	Visible	Infrarrojo cercano	NDVI	NDVI>0
Área basimétrica	-0,365	0,197	0,387	0,409
Área basimétrica mayor de cero	-0,314	0,184	0,331	0,350

ciente de correlación entre el área basimétrica y el NDVI excluyendo las cuatro parcelas en que el NDVI es menor de cero es igual al obtenido por SALVADOR (1999) entre la cubierta arbórea y el ratio banda 4/banda 3 de una imagen Landsat TM usando 156 parcelas ocupadas mayoritariamente por *Pinus nigra* Arn. localizadas al azar del inventario ecológico y forestal de Cataluña.

Los coeficientes de correlación obtenidos utilizando la misma imagen WIFS y el área basimétrica de las parcelas de IFN2 en los pinares de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) de Barbate (CUEVAS *et al.*, 2000) son muy diferentes: -0,594 con

el visible, 0,599 con el infrarrojo cercano y 0,519 con el NDVI. Destaca el coeficiente de correlación entre área basimétrica y el infrarrojo cercano, que en los pinares de pino piñonero de Barbate es negativo y relativamente alto, en tanto que en el Parque Natural de los Alcornocales es positivo y muy bajo (0,197). Esto pone de manifiesto la muy diferente respuesta espectral de las masas forestales de frondosas (alcornoque y quejigo andaluz) y las de coníferas bastante xerófilas como los pinares de pino piñonero de Barbate.

En la tabla 3 aparecen los coeficientes de correlación entre el NDVI y el área basimétrica para distintos rangos de ésta utilizando sólo los casos en que el NDVI es mayor de cero, 776 parcelas. El coeficiente de correlación entre el área basimétrica de las parcelas del IFN2 y el NDVI de WIFS es muy bajo si sólo se consideran las parcelas con un área basimétrica baja (ex: 0,152 para las 277 parcelas en que el área basimétrica es menor de 5 m²/ha). El mayor coeficiente de correlación, 0,421, se obtiene excluyendo exclu-

TABLA 3

COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE EL NDVI DE WIFS Y EL ÁREA BASIMÉTRICA DE LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES PARA DISTINTOS RANGOS DE ÉSTA. USANDO SÓLO LOS CASOS EN QUE EL NDVI ES MAYOR DE CERO, 776 PARCELAS. [CORRELATION COEFFICIENTS AMONG THE WIFS NDVI AND THE BASAL AREA OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES FOR DIFFERENT RANKS OF THIS. USING ONLY THE CASES WITH NDVI GREATER THAN ZERO, 776 GROUND PLOTS.]

Rango de área basimétrica (m ² /ha)	Número de parcelas	Coefficiente de correlación
< 1	133	0,295
< 2	170	0,214
< 5	277	0,152
< 10	417	0,170
< 15	556	0,282
< 20	661	0,316
< 25	739	0,348
< 30	744	0,410
< 35	770	0,421
< 40	775	0,414
≤ 43,69	776	0,409

sivamente aquellas parcelas en que el área basimétrica es igual o superior a 33 m²/ha, o 35 m²/ha que en este caso es lo mismo, y que son sólo seis parcelas.

De estos resultados se deduce que en este caso la correlación del NDVI de WiFS y el área basimétrica es en buena medida consecuencia de la existencia de parcelas con un área basimétrica nula o muy baja. Esto apunta a un aspecto de gran interés práctico como es la utilidad del NDVI de WiFS para delimitar las zonas que presentan interés para ser consideradas como inventariables en un inventario de las características del Inventario Forestal Nacional de España. Las dos bandas de WiFS por separado tienen un coeficiente de correlación menor con el área basimétrica, ligeramente inferior en el caso del visible y muy bajo en caso del infrarrojo cercano.

Con el objetivo de analizar si la información WiFS permite diferenciar clases de área basimétrica definidas a priori se han agrupado las parcelas de IFN2 en el área en estudio por rangos de área basimétrica. Se han definido cuatro clases de parcelas con los siguientes límites de área basimétrica: nula, > 0 y < 5 m²/ha, ≥ 5 y < 15 m²/ha, y ≥ 15 m²/ha. Estas cuatro clases de parcelas se pueden describir como sin masa forestal arbolada, con masa forestal arbolada de densidad baja, con masa forestal arbolada de densidad media y con masa forestal arbolada de alta densidad, entendiendo que se está utilizando como criterio el área basimétrica que se obtiene exclusivamente a partir de los pies mayores. Las características de

estas cuatro clases de parcelas según el área basimétrica aparecen en la tabla 4.

El NDVI de WiFS medio de estas cuatro clases de parcelas según el área basimétrica es mayor según aumenta el rango de área basimétrica y las desviaciones típicas del NDVI de las cuatro clases son inferiores a la desviación típica del NDVI del conjunto de las parcelas. Las cuatro clases de parcelas definidas según el área basimétrica son significativamente diferentes respecto al NDVI de WiFS al 99,6% (F = 48,19) y respecto al visible al 99,8% (F = 42,05). No son estadísticamente diferentes ni al 66% respecto al infrarrojo cercano (F = 14,78). Es decir, las cuatro clases de área basimétrica definidas se pueden diferenciar por el visible y el NDVI de WiFS.

Análisis de las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional sin arbolado en la imagen WiFS

De las 781 parcelas de campo del IFN2 en el área en estudio 105, un 13,44% del total, no tienen pies mayores, y por tanto su área basimétrica es nula. En 89 parcelas el número de pies menores es cero. El número de parcelas de campo del IFN2 en que tanto el número de pies mayores como el número de pies menores es cero, es decir, totalmente desarboladas, es 39, un 4,48% del total. En la tabla 5 figuran los valores WiFS de las parcelas con pies mayores (676 parcelas) y sin pies mayores (105 parcelas).

Las parcelas de campo del IFN2 con pies mayores y las parcelas de campo del IFN2 sin pies mayo-

TABLE 4
CARACTERÍSTICAS DE LAS CUATRO CLASES DE PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES SEGÚN EL ÁREA BASIMÉTRICA.
[CHARACTERISTICS OF THE FOUR CLASSES OF GROUND PLOTS OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES ACCORDING TO THE BASAL AREA]

Clases de área basimétrica	Rango de área basimétrica (m ² /ha)	Número de parcelas	Área basimétrica media (m ² /ha)	Desviación típica del área basimétrica (m ² /ha)	NDVI medio	Desviación típica del NDVI
1	0	105	0	—	0,275	0,113
2	> 0 y < 5	174	2,62	1,36	0,323	0,116
3	≥ 5 y < 15	282	10,00	2,97	0,355	0,121
4	≥ 15	220	21,01	4,99	0,422	0,097
Total	0 - 43,69	781	10,14	8,42	0,356	0,122

TABLA 5

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL SENSOR IRS-1C WiFS CORRESPONDIENTES A LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES CON PIES MAYORES Y SIN PIES MAYORES. [STATISTICAL PARAMETERS OF THE IRS-1C WiFS SENSOR CORRESPONDING TO THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES WITH AND WITHOUT TREES WITH NORMAL DIAMETER GREATER THAN 75 MM.]

	Parcelas con pies mayores	Parcelas sin pies mayores
	Visible	
Media	60,28	73,65
Desviación típica	14,61	20,84
Mínimo	37	39
Máximo	143	138
	Infrarrojo cercano	
Media	129,82	126,40
Desviación típica	12,75	10,90
Mínimo	42	100
Máximo	170	153
	NDVI	
Media	0,369	0,275
Desviación típica	0,119	0,113
Mínimo	-0,282	0,031
Máximo	0,642	0,583

res son estadísticamente diferentes al 99,9999% ($F = 66,39$) respecto al visible de WiFS, al 99% respecto al infrarrojo cercano ($F = 6,78$) y al 99,9999% ($F = 56,86$) respecto al NDVI de WiFS. Esto corrobora lo dicho antes, y apoya el gran interés del sensor IRS-1C WiFS para delimitar las zonas a considerar como inventariables en el Inventario Forestal Nacional de España en áreas ocupadas por frondosas mediterráneas.

Un tema de interés es analizar la influencia de la presencia de pies menores. En este caso el número anotado está entre 0 y 6, siendo la media de los valores anotados 2,82, es decir, 278,33 pies/ha. En la tabla 6 figura el reparto de las parcelas de campo de IFN2 según el número de pies menores presente.

Si se analizan las parcelas que no tienen ni pies mayores ni pies menores (39 parcelas), es decir, totalmente desarboladas, se obtiene que el NDVI de estas parcelas es significativamente diferente al de las demás parcelas al 99,9999% ($F = 74,07$), el visible al 99,9999% ($F = 138,41$) y el

TABLA 6

DISTRIBUCIÓN DE LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES SEGÚN EL NÚMERO DE PIES MENORES. [DISTRIBUTION OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES ACCORDING TO THE NUMBER OF TREES WITH NORMAL DIAMETER SMALLER THAN 75 MM.]

Número de pies menores anotado	Número de pies menores/ha	Número de parcelas
0	0	89
1	127,32	186
2	254,65	203
3	381,97	179
4	509,30	88
5	636,62	28
6	763,94	18

infrarrojo cercano no es significativamente diferente ni al 66% ($F = 1,01$). Estos resultados confirman lo dicho antes sobre el interés de las imágenes WiFS, mostrando que la presencia de pies menores, que en el caso de las masas de quercíneas es frecuente que sea un hecho de gran importancia en las masas tratadas en monte bajo, no supone un inconveniente.

División del área en estudio por rangos del NDVI de WiFS

Como se vio las cuatro clases de parcelas del IFN2 definidas por rangos de área basimétrica son significativamente diferentes respecto a la información WiFS (visible y NDVI). Es, por tanto, de gran interés desarrollar una metodología que permita a partir de la información WiFS delimitar zonas geográficas en el área en estudio con área basimétrica significativamente diferente.

Se ha utilizado para ello una metodología consistente en dividir el área en estudio por intervalos del NDVI de WiFS y analizar si las parcelas pertenecientes a estos rangos son estadísticamente diferentes respecto al área basimétrica. El interés de esta aproximación es el que no es dependiente de la delimitación del área en estudio, ni de si ésta es toda forestal o no.

Esta metodología se puede incluir dentro de las denominadas técnicas de segmentación (PAL *et al.*, 2000). Segmentación es el proceso de división del espacio de la imagen en varias regiones homogéneas, no superpuestas y con significado. Gran parte de las aproximaciones realizadas para la segmentación de imágenes de satélite están basadas en la clasificación de los píxeles. Las técnicas de división por niveles de gris, aunque menos costosas desde el punto de vista computacional, no han merecido demasiada atención. Si la imagen dispone de una sola banda la segmentación basada en división por niveles de gris aparece como conveniente y apropiada.

En la tabla 7 aparecen las tres divisiones de las parcelas por rangos del NDVI estudiadas y los valores del área basimétrica de las parcelas de campo del IFN2 correspondientes.

Con la división utilizada en tres clases del NDVI de WiFS por rangos se obtienen clases de área basimétrica significativamente diferentes entre sí al 99,999% (F = 67,06). Con la división empleada en cuatro clases del NDVI por rangos se obtienen clases de área basimétri-

ca significativamente diferentes entre sí al 99,2% (F = 45,49). Con la división utilizada en cinco clases del NDVI por rangos se obtiene que las clases 1 y 2 no son significativamente diferentes entre sí al 95% y las demás sí, siendo significativamente diferentes entre sí todas las clases al 90%.

Las medias de las áreas basimétricas de las parcelas pertenecientes a cada una de las tres clases procedentes de la división por rangos del NDVI son ascendentes según el rango del NDVI corresponden a mayores valores de éste. Las desviaciones típicas de las áreas basimétricas de cada uno de estas tres clases de parcelas son en un caso inferior y en los otros dos similares a la desviación típica del área basimétrica en el conjunto de las parcelas (8,42).

Las superficies de cada una de las clases procedentes de la división del NDVI en tres rangos, así como los valores del NDVI de las parcelas de campo del IFN2 en cada una de las clases figuran en la tabla 8. Los coeficientes de correlación entre el área basimétrica de las parcelas del IFN2 y las variables espectrales para cada una de las tres clases de NDVI construidas son muy bajos:

TABLA 7

DIVISIONES ESTUDIADAS DE LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES POR RANGOS DEL NDVI DE IRS-1C WiFS Y SU ÁREA BASIMÉTRICA. [STUDIED DIVISIONS OF THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES BY RANKS OF THE IRS-1C WiFS NDVI AND THEIR BASAL AREA.]

Clase	Rango de NDVI	Número de parcelas	Área basimétrica (m ² /ha)			
			Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
División en cinco clases						
1	≤ 0,2	93	5,11	5,80	0	21,46
2	> 0,2 y ≤ 0,3	150	6,81	6,62	0	28,36
3	> 0,3 y ≤ 0,4	230	9,41	8,25	0	43,69
4	> 0,4 y ≤ 0,5	231	13,09	8,42	0	36,16
5	> 0,5	77	15,98	8,10	0	31,82
División en cuatro clases						
1	≤ 0,25	155	5,58	6,02	0	28,36
2	> 0,25 y ≤ 0,35	191	7,84	7,33	0	43,69
3	> 0,35 y ≤ 0,45	248	11,43	8,87	0	38,13
4	> 0,45	187	14,54	7,95	0	32,58
División en tres clases						
1	≤ 0,3	243	6,16	6,36	0	28,36
2	> 0,3 y ≤ 0,4	230	9,41	8,25	0	43,69
3	> 0,4	308	13,81	8,42	0	36,16

Clase	NDVI	Visible	Infrarrojo cercano
1	0,080	-0,157	-0,072
2	0,136	-0,098	-0,001
3	0,176	-0,113	0,167

Las medias de las áreas basimétricas de las parcelas pertenecientes a cada una de las cuatro clases procedentes de la división por rangos del NDVI son ascendentes según el rango del NDVI corresponde a mayores valores de éste. Las desviaciones típicas de las áreas basimétricas de cada uno de estas cuatro clases de parcelas son inferiores, en un caso ligeramente superior, a la desviación típica del área basimétrica del conjunto de las parcelas (8,42).

Las superficies de cada una de las clases procedentes de la división del NDVI en tres rangos, así como los valores del NDVI de las parcelas de campo del IFN2 en cada una de las clases figuran

en la tabla 9. Los coeficientes de correlación entre el área basimétrica y las variables espectrales para cada una de las cuatro clases de NDVI construidas son muy bajos:

Clase	NDVI	Visible	Infrarrojo cercano
1	-0,001	-0,166	-0,143
2	0,092	-0,008	0,072
3	0,144	-0,130	-0,017
4	0,211	-0,117	0,215

Si se cruzan las divisiones de las parcelas estudiadas en tres y cuatro clases por rangos del NDVI se obtiene una CHI2 de 892,94 que permite rechazar la independencia entre ambas clasificaciones al 99% de nivel de confianza. En la Lámina 2 aparece representada la división del área en estudio en cuatro clases por rangos del NDVI.

Las divisiones del área en estudio por rangos del NDVI de WiFS obtenidas se podrían también

TABLA 8

VALORES DEL NDVI DE IRS1-C WIFS CORRESPONDIENTES A LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES PERTENECIENTES A LAS CLASES OBTENIDAS POR DIVISIÓN DEL NDVI EN TRES RANGOS. [IRS1-C WIFS NDVI VALUES CORRESPONDING TO THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES IN EACH OF THE CLASSES OBTAINED BY DIVISION IN THREE RANKS OF THE NDVI]

Clase	Rango de NDVI	Superficie (ha)	Número de parcelas	NDVI			
				Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
1	≤ 0,3	71616,96	243	0,211	0,079	-0,282	0,300
2	> 0,3 y ≤ 0,4	49406,76	230	0,354	0,028	0,300	0,400
3	> 0,4	50365,80	308	0,472	0,048	0,401	0,642

TABLA 9

VALORES DEL NDVI DE IRS1-C WIFS CORRESPONDIENTES A LAS PARCELAS DEL SEGUNDO INVENTARIO FORESTAL NACIONAL EN EL PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES PERTENECIENTES A LAS CLASES OBTENIDAS POR DIVISIÓN DEL NDVI EN CUATRO RANGOS. [IRS1-C WIFS NDVI VALUES CORRESPONDING TO THE SECOND NATIONAL FOREST INVENTORY GROUND PLOTS IN THE PARQUE NATURAL DE LOS ALCORNOCALES IN EACH OF THE CLASSES OBTAINED BY DIVISION OF THE NDVI IN FOUR RANKS].

Clase	Rango de NDVI	Superficie (ha)	Número de parcelas	NDVI			
				Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
1	≤ 0,25	13254,84	155	0,172	0,078	-0,282	0,25
2	> 0,25 y ≤ 0,35	48807,36	191	0,303	0,029	0,251	0,35
3	> 0,35 y ≤ 0,45	81268,92	248	0,401	0,030	0,351	0,45
4	> 0,45	28058,40	187	0,502	0,042	0,451	0,642

haber analizado utilizando otros parámetros forestales derivados de la información de las parcelas de campo del IFN2 como los volúmenes de madera, lo que no se ha efectuado por las especiales características de la especie dominante en el Parque Natural de los Alcornocales, el alcornoque.

parcelas sin pies mayores. La división del sector de imagen cubriendo el área en estudio de acuerdo a rangos del Índice de Vegetación Normalizado ha demostrado su interés, ya que con ella es posible la delimitación de áreas geográficas en que el área basimétrica es significativamente diferente.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado la utilidad de la información de las imágenes de resolución espacial media del sensor WiFS del satélite indio IRS-1C como apoyo a la realización del Inventario Forestal Nacional de España en zonas ocupadas por bosques de frondosas mediterráneas. Las parcelas de campo con pies mayores tienen una respuesta espectral significativamente diferente de las

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Banco de Datos de la Naturaleza de la Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, por haber facilitado los datos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional pertenecientes a las provincias de Cádiz y Málaga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROCKHAUS, J.A. & KHORRAN, S. 1992. A comparison of SPOT and Landsat TM data for use in conducting inventories of forest resources. *International Journal of Remote Sensing*, 13(16): 3035-3043.
- CUEVAS, J.M., GONZÁLEZ-ALONSO, F. & HERRÓN, M. 1995. Estudio de la utilidad de la información espectral Landsat TM para el inventario forestal de hayedos del norte de España. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 5(2): 317-331.
- CUEVAS, J.M., GONZÁLEZ-ALONSO, F. & VÁZQUEZ, A. 2000. Estimación de la superficie cubierta por las copas en los pinares de pino piñonero de Barbate (Cádiz) a partir de una imagen IRS-1C WiFS y los datos de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional. *Revista de Teledetección*, 13: 51-58.
- DGCONA, 1998. Segundo Inventario Forestal Nacional. 1986 - 1996. España. Madrid
- GEMMEL, F.M. 1995. Effects of forest cover, terrain and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a Rocky mountain site. *Remote Sensing of Environment*, 51: 291-305.
- ICONA 1990. Segundo Inventario Forestal Nacional. Explicaciones y métodos. Madrid.
- KASTURIRANGAN, K., ARAVAMUDAN R., DEEKSHATULU B.L. & GEORGE J. 1996. Indian Remote Sensing satellite IRS-1C-the beginning of a new era. *Current Science*, 70(7): 495-500.
- PAL S.F., GOSH, A., UMA SHANKAR B., 2000. Segmentation of remotely sensed images with fuzzy thresholding, and quantitative evaluation. *International Journal of Remote Sensing*, 21(11), 2269-2300.
- ROBINOVÉ, CH.J. 1982. Computation with physical values from Landsat digital data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(5): 781-784.
- SALVADOR, R. 1999. A parametric model for estimating relations between unprecisely located field measurements and remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 67: 99-107.
- TUCKER, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.



Lam. 1. Información IRS1-C WiFS georeferenciada del entorno del Parque Natural de los Alcornocales. Visible en rojo, infrarrojo cercano en verde. Límites del Parque en blanco. [Georeferenced IRS1-C WiFS information of the Parque Natural de los Alcornocales area. Visible in red, near infrared in green. Limits of the Park in white.]



Lam. 2. División del área del Parque Natural de los Alcornocales en cuatro niveles del NDVI de IRS-1C WiFS. Entre paréntesis valor medio del área basimétrica de las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional situadas en cada nivel de NDVI. Amarillo: $NDVI \leq 0,25$ (5,58 m²/ha), rojo: $NDVI > 0,25$ y $\leq 0,35$ (7,84 m²/ha), azul: $NDVI > 0,35$ y $\leq 0,45$ (11,43 m²/ha), verde: $NDVI > 0,45$ (14,54 m²/ha). [Division of the area of the Parque Natural de los Alcornocales according to four levels of the IRS-1C WiFS NDVI. Among brackets the mean basal area of the Second National Forest Inventory of Spain ground plots located in each level of NDVI. Yellow: $NDVI \leq 0,25$ (5,58 m²/ha), red: $NDVI > 0,25$ and $\leq 0,35$ (7,84 m²/ha), blue: $NDVI > 0,35$ and $\leq 0,45$ (11,43 m²/ha), green: $NDVI > 0,45$ (14,54 m²/ha).]