

# Productividad Potencial Climática y una imagen IRS-1C WiFS en el Parque Natural Los Alcornocales. Relación con la biomasa forestal real

J. M. Cuevas\*, F. González-Alonso, A. Roldán y M. Huesca

Laboratorio de Teledetección, CIFOR-INIA. Crta. A Coruña, km. 7,5. Apto. 8111. 28040 Madrid.

---

## Resumen

Se estudia el uso del Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España como fuente de información en base a la que clasificar una imagen captada por el sensor WiFS del satélite hindú IRS-1C en el Parque Natural Los Alcornocales (Andalucía, España), una extensa área protegida y cubierta por bosques naturales de quercíneas mediterráneas, principalmente alcornoque (*Quercus suber* L.). Se han agrupado las clases de productividad potencial climática de esta cartografía en tres macroclases que han resultado significativamente diferentes entre sí al 99% de probabilidad fiducial respecto al visible y el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) de la imagen WiFS empleada. Mediante clasificación supervisada de máxima verosimilitud del NDVI de esta imagen, utilizando las macroclases de productividad potencial climática como áreas de verdad de campo, se han obtenido clases que son significativamente diferentes entre sí al 90% respecto al área basimétrica de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal de España situadas en el Parque.

**Palabras clave:** productividad potencial climática, NDVI, alcornoque, *Quercus suber* L., Segundo Inventario Forestal Nacional de España, área basimétrica.

## Abstract

### Climatic potential productivity and an IRS-1C WiFS image in Natural Park Los Alcornocales. Relationship with the standing forest biomass

It is studied the use of the Map of Forest Potential Productivity of Spain as information in base to which classify an Indian IRS-1C WiFS satellite image in Los Alcornocales Natural Park (Andalucía, Spain), a large forest area covered by natural forests of Mediterranean broadleaved species, mainly cork oak (*Quercus suber* L.). Grouping the classes of climatic potential productivity of this map were obtained three macroclasses that resulted significantly different among them at the 99% confidence level for the visible and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the WiFS image. It was built a classifier using these macroclasses of climatic potential productivity as ground truth areas. By maximum likelihood supervised classification of the NDVI were obtained classes who resulted significantly different among them at the 90% confidence level for the basal area from the Second Spanish National Forest Inventory ground plots located in the park.

**Key words:** Climatic potential productivity, NDVI, cork oak, *Quercus suber* L., Second Spanish National Forest Inventory, basal area.

---

## Introducción

### El Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España

El Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) adopta como definición de Productividad Potencial

Forestal (PPF) la de “máxima producción maderera que se puede llegar a obtener en un monte que cumpla las siguientes condiciones: a) Suelo estable, en equilibrio con el clima y evolucionado con arreglo al condicionamiento fijado por el substrato, b) Gestión técnica adecuada que suponga la ordenación de los aprovechamientos, la conservación de la espesura normal y la regeneración natural de la masa. c) Buen estado fitosa-

---

\* Corresponding author: [cuevas@inia.es](mailto:cuevas@inia.es)  
Received: 02-06-08. Accepted: 12-08-09.

nitario. d) Especie forestal de mayor crecimiento y compatible con la estabilidad del medio”.

La metodología seguida en el desarrollo de esta cartografía de PPF comprendió dos etapas: la elaboración de una cartografía de la productividad potencial climática (PPC), y la definición y cartografía de clases litológicas isoproductivas. La PPC utilizó como base el índice climático de Paterson (Paterson, 1956), que tiene como expresión:  $IP = (V \cdot F \cdot P \cdot G)/12A$ . Siendo IP el valor del índice de Paterson, V la temperatura media del mes más cálido en grados centígrados, F un factor de insolación función del número anual de horas de sol, P la precipitación media anual en mm, G la duración del periodo vegetativo de acuerdo al criterio de Gaussen y A el rango anual de temperaturas, estimado por la diferencia entre la media de la máximas del mes más cálido y la media de las mínimas del mes más frío, expresadas en grados centígrados. La PPC, en m<sup>3</sup> de madera/ha/año, está relacionada con este índice por la expresión logarítmica:  $PPC = 5,3 \log IP - 7,4$ . De acuerdo con los valores obtenidos se definieron siete clases de PPC. Con el objeto de hacer patente un mayor detalle, se consideraron subdivisiones de las clases de PPC, estableciéndose intervalos de media clase de productividad para las clases II a VI, y de tres para la clase I. La clase VII, con una productividad inferior a 0,5m<sup>3</sup>/ha/año, no se dividió.

El siguiente paso (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) fue modificar la PPC en función de los

distintos sustratos litológicos, en el sentido de considerar a éstos como capaces de generar suelos con diferentes características y condicionamientos que permitan alcanzar altas producciones de las masas arbóreas instaladas, o, por el contrario, limitar dichas producciones. Para ello se agruparon las litologías presentes en España en ocho clases litológicas (Serrada, 1976), asignándose a cada una de ellas un coeficiente corrector de la PPC con valor entre 0,00 y 1,66. Esta cartografía de PPF, a escala 1:200000 y en formato digital, tiene catorce clases. El reparto de la superficie de España en estas clases y sus características aparece en la Tabla 1. La información del Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España se ha utilizado en el estudio de la regeneración natural post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Madrigal *et al.*, 2005a) en una zona de la Sierra de Guadarrama en que solamente existen dos clases de PPF. Vázquez *et al.* (2006) han analizado la relación entre esta cartografía de PPF y los incendios forestales en España peninsular, encontrando una relación en general significativa, aunque moderada, entre la incidencia de los incendios forestales y la PPF.

### La productividad forestal y las imágenes de satélite

En Mäkelä *et al.* (2000), Landsberg (2003), Coops y White (2003) y Skovsgaard *et al.* (2008) aparecen revi-

**Tabla 1.** Clases de Productividad Potencial Forestal en España (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000), y en el Parque Natural Los Alcornocales

Clases de productividad potencia forestal	Productividad potencial forestal (m <sup>3</sup> /ha/a)	Superficie en España (ha)	Porcentaje de la superficie de España	Superficie en el Parque Natural Los Alcornocales (ha)	Porcentaje de la superficie del Parque Natural Los Alcornocales
Ia	> 9,00	3 770 846	7,45	7 390,4	4,31
Ib	8,25 - 9,00	1 493 008	2,95	0	0
Ic	7,50 - 8,25	1 911 684	3,78	8 440,2	4,92
IIa	6,75 - 7,50	2 825 674	5,58	68 182,6	39,78
IIb	6,00 - 6,75	3 197 926	6,32	21 785,8	12,71
IIIa	5,25 - 6,00	3 856 003	7,62	20 732,8	12,10
IIIb	4,50 - 5,25	5 330 888	15,53	6 447,6	3,76
IVa	3,75 - 4,50	5 367 275	10,60	24 546,2	14,32
IVb	3,00 - 3,75	8 067 123	15,93	11 952,4	6,97
Va	2,25 - 3,00	8 414 621	16,61	583,2	0,34
Vb	1,50 - 2,25	5 085 710	10,04	213,8	0,12
VIa	1,00 - 1,50	404 328	0,80	0	0
VIb	0,50 - 1,00	128 308	0,25	0	0
VII	< 0,50	778 191	1,54	1 114,6	0,65

siones sobre el estado de las investigaciones sobre modelización y productividad forestal. Fox III *et al.* (1985) evaluaron el potencial de la combinación de datos Landsat, topográficos y de zonación ecológica para inventariar y cartografiar la productividad forestal en dos áreas del noroeste de California (USA). Cook *et al.* (1989) analizaron la productividad de varios tipos de bosques de Norteamérica de condiciones muy diferentes utilizando datos Landsat TM y datos biogeográficos, y como parámetro forestal el crecimiento anual en volumen de madera, y en sus conclusiones afirman “las características de un ecosistema determinadas a partir de datos espectrales están muy estrechamente relacionadas con la productividad forestal”.

Coops *et al.* (1998), Coops (1999), Coops y Waring (2001a,b), Coops *et al.* (2001), Waring *et al.* (2006), Coops *et al.* (2007), Nightingale *et al.* (2007a,b) y Nightingale *et al.* (2008a,b) han utilizado el modelo matemáticos determinístico, no estadístico, 3-PGS (Physiological Principles for Predicting Growth with Satellite data) para estimar la productividad forestal. El modelo 3-PGS es similar al modelo 3-PG (Landsberg y Waring, 1997) que usa valores medios mensuales de radiación solar, temperatura, precipitación, días de helada, y déficit de la presión del vapor de agua, así como factores específicos del lugar, las condiciones iniciales de la masa forestal y valores dependientes de la especie, pero incorpora información procedente de sensores remotos. Coops *et al.*, (1998) han empleado el modelo 3-PGS, usando el Índice de Vegetación Normalizado, NDVI (Tucker, 1979) de imágenes de satélite NOAA AVHRR, para evaluar la productividad forestal de bosques de Australia y Nueva Zelanda de eucaliptos y *Callitris*. El NDVI tiene como expresión:

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

El NDVI está estrechamente relacionado con la productividad primaria neta y es un estimador lineal de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación, ya que la estructura de las hojas verdes refleja la radiación en el infrarrojo próximo, mientras que la clorofila y otros pigmentos absorben una gran proporción de la radiación incidente en el rojo. Las estimaciones de la producción anual y del flujo neto de dióxido de carbono están relacionadas directamente con el NDVI en la estación de crecimiento vegetativo, y la productividad forestal está correlacionada positivamente con el NDVI (Pettorelli *et al.*, 2005).

Wang *et al.* (2004) han encontrado en bosques de frondosas de las grandes llanuras del este de Kansas (USA) correlaciones altas entre los valores del NDVI integrados bisemanalmente de imágenes NOAA AVHRR en la época de crecimiento vegetativo y datos relacionados con la productividad forestal. Estos autores concluyen que el NDVI es un predictor excelente de la productividad forestal. Van Tuyl *et al.* (2005) han estudiado la productividad forestal primaria neta y la biomasa en el oeste de Oregón (USA) utilizando el LAI (Leaf Area Index) medido en parcelas de campo, y expandiendo los datos de campo mediante una imagen de satélite Landsat ETM+. Maselli y Chiesi (2005, 2006) han estimado la productividad en pinares de *Pinus pinea* L. y *Pinus pinaster* Ait. de Italia utilizando los modelos C-Fix y Forest-BGC e integrando imágenes de satélite de alta resolución espacial Landsat TM y ETM+, y de alta resolución temporal AVHRR y SPOT-VEGETATION. Waring *et al.* (2006) han estudiado la capacidad de crecimiento en un extenso área de Oregón (USA) ocupada por bosques de *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laud. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco combinando la modelización, mediante el modelo 3-PG, y la teledetección, usando el índice de vegetación EVI (“Enhanced Vegetation Index”) obtenido a partir de compuestos de ocho días de imágenes de satélite MODIS captadas en la época de mayor actividad vegetativa.

Coops *et al.* (2007) han comparado la productividad primaria total en una masa de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. en la isla de Vancouver, Columbia Británica, Canadá, estimada a partir de datos de campo y de imágenes de satélite MODIS utilizando el modelo 3-PGS. Chirici *et al.* (2007) han obtenido la productividad forestal primaria neta de Italia utilizando el modelo C-Fix e imágenes de satélite SPOT VEGETATION. Chiesi *et al.* (2007) y Maselli *et al.* (2008) han estudiado mediante los modelos C-Fix y BIOME-BGC bosques mediterráneos de diversas especies de coníferas y frondosas en Italia usando imágenes de satélite SPOT VEGETATION. Olofsson *et al.* (2007) han estimado la producción primaria neta de los bosques escandinavos utilizando una serie temporal de imágenes MODIS. Nightingale *et al.* (2007a,b) y Nightingale *et al.* (2008a,b) han utilizado el modelo 3-PG y una versión modificada de 3-PGS usando el NDVI de imágenes de satélite NOAA AVHRR y MODIS para simular el crecimiento y la acumulación de biomasa en bosques tropicales húmedos de Australia.

## Material y métodos

### El Parque Natural Los Alcornocales

Este Parque Natural es una reserva natural de enorme importancia gracias a su muy especial situación geográfica, en el extremo sur del continente europeo, y a las peculiaridades de su clima que es de tipo mediterráneo, pero con una fuerte componente oceánica, que le hacen asemejarse a los ecosistemas subtropicales (Alcaraz *et al.*, 2006). Se ha seleccionado para realizar este estudio el Parque Natural Los Alcornocales por reunir varias características que le hacen un área adecuada para un estudio de estas características: a) Estar cubierto en su inmensa mayoría por vegetación forestal. b) Ser el área geográfica más extensa actualmente existente en Europa cubierta por bosques naturales y de tipo climácico de especies forestales frondosas mediterráneas. c) Contener el mayor alcornocal de Europa y uno de los mayores del mundo. d) Ser un área con una orografía bastante diversa, si bien no son frecuentes los terrenos escarpados y las fuertes pendientes. Los usos del suelo y la vegetación predominante en el Parque Natural según su Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de 1994 aparecen en la Tabla 2. Las clases Pastizal, Cultivos y Otros ocupan 35535 ha, solamente 20,90% del Parque Natural, y de estas tres clases la clase Pastizal es con diferencia la más abundante.

El Parque Natural Los Alcornocales está situado en el sur de España en las provincias de Cádiz y Málaga (Comunidad Autónoma de Andalucía). El substrato es silíceo, en su mayor parte formado por areniscas eocénicas del Algibe. Torres y Montero (2000) estudiaron la potencialidad del territorio para el alcornocal en este Parque Natural. Sánchez-Palomares *et al.* (2007) han

**Tabla 2.** Usos del suelo en el Parque Natural Los Alcornocales según su Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de 1994

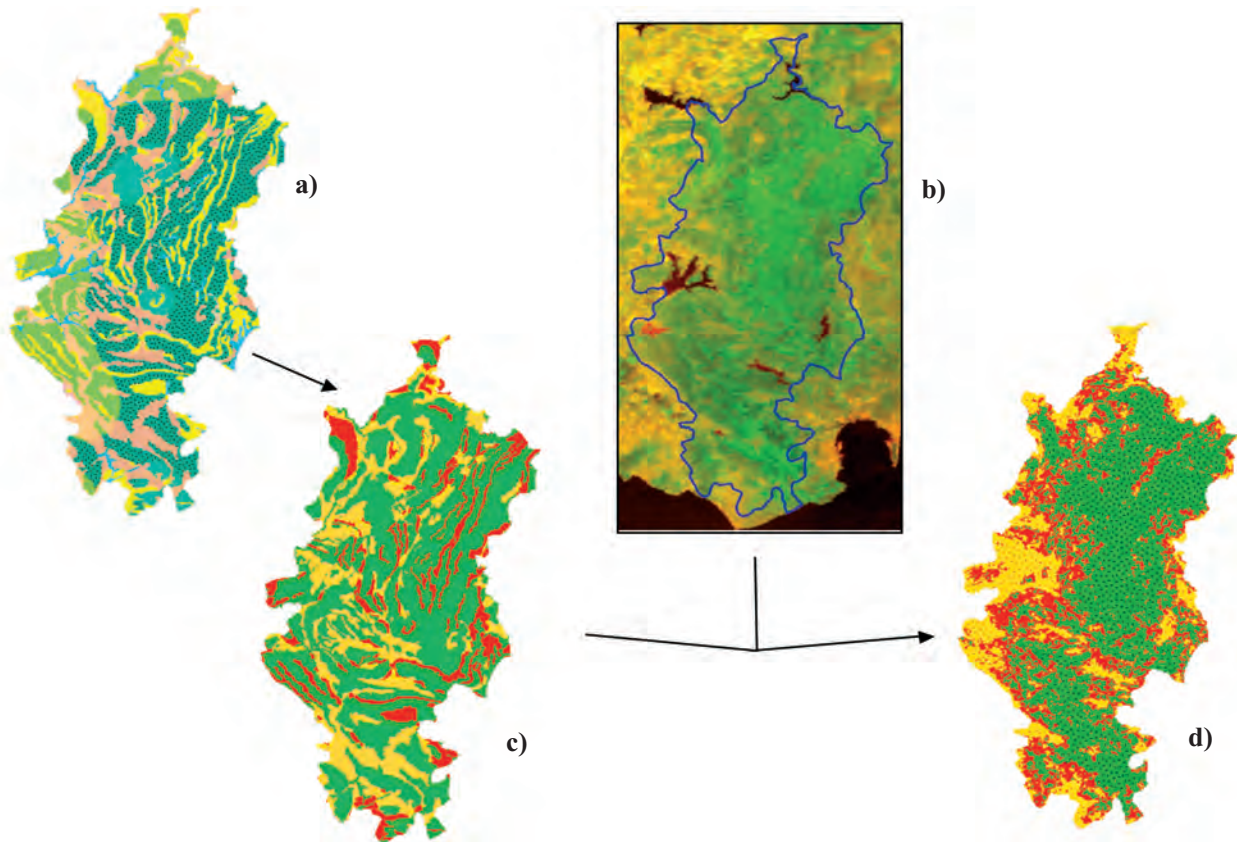
Clase	Superficie (ha)	Porcentaje
Alcornocal	82 462,5	48,5
Matorral	38 765,7	22,8
Pastizal	26 693,9	15,7
Quejigar	6 290,9	3,7
Cultivos	5 440,8	3,2
Repoblaciones	3 910,6	2,3
Acebuchares	3 060,4	1,8
Otros	3 400,5	2,0

estudiado las características de las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles utilizando información de 173 parcelas de campo, 38 de ellas situadas en el Parque Natural Los Alcornocales.

Las masas forestales están constituidas por frondosas mediterráneas, principalmente alcornoque (*Quercus suber* L.) y, en menor proporción, roble o quejigo andaluz (*Quercus canariensis* Willd.), acebuche (*Olea europea* L.), madroño (*Arbutus unedo* L.), aliso (*Alnus glutinosa* (Gaethn.)), fresno (*Fraxinus* sp.), agracejo (*Phyllirea latifolia* L.) y otras especies. La presencia de coníferas es escasa y la de eucaliptos muy escasa. La conservación de estos bosques es consecuencia de una explotación racional realizada por los habitantes del área a lo largo de la historia. Hoy día, algunos de los aprovechamientos tradicionales han desaparecido, pero la extracción del corcho se ha mantenido, o incluso aumentado. En Jurado (1999) se encuentra información sobre las transformaciones históricas de estos montes.

### La productividad potencial forestal en el Parque Natural Los Alcornocales

En el Parque Natural Los Alcornocales están presentes seis de las siete clases de PPC y once de las catorce clases de PPF del Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España. En la Tabla 1 aparece la abundancia de las clases de PPF en el Parque Natural. La clase VI es la única ausente, y la clase VII, que es muy poco abundante, corresponde a cuerpos de agua o zonas urbanas. La comparación de la PPF del Parque Natural con la del conjunto de España muestra como aquél tiene una PPF muy superior a la media española. Sin embargo, la clase de mayor PPC (I), que se extiende fundamentalmente por la cornisa cantábrica y Galicia, y ocupa 14,18% de la superficie de España, supone sólo 9,23% del Parque Natural. La subclase IIa, de PPF bastante elevada (6,75 - 7,50 m<sup>3</sup>/ha/a), ocupa 39,78% del Parque Natural, en tanto que sólo supone 5,58% de España. Lo anterior es consecuencia de la situación de este Parque Natural en una de las dos zonas del sur de España de mayor PPF debido a sus especiales características climáticas, con temperaturas moderadas (12° de media en enero y 25° de media en agosto) y precipitaciones bastante elevadas que superan 800 mm anuales, alcanzando en determinadas zonas 1400 mm, que compensan el substrato litológico silíceo dominante. En la Figura 1a aparece representada la PPF del Parque Natural.



**Figura 1.** (a) Sector del Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España correspondiente al Parque Natural Los Alcornocales con las clases litológicas diferenciadas. (b) Sector utilizado de la imagen IRS-1C WiFS georeferenciada (visible en rojo, infrarrojo cercano en verde) y límite del Parque Natural Los Alcornocales en azul. (c) Mapa de la productividad potencial forestal del Parque Natural Los Alcornocales con las clases agrupadas en las tres macroclases de productividad potencial climática empleadas como áreas de verdad de campo. Clase 1 en verde, clase 2 en rojo y clase 3 en ocre. (d) Resultados obtenidos mediante clasificación supervisada de máxima verosimilitud del NDVI de IRS-1C WiFS. Iguales colores que (c).

### Imagen IRS-1C WiFS empleada

Los satélites puestos en órbita por el programa espacial indio de teledetección que están actualmente en servicio son IRS-1C, IRS-1D, IRS-P3, IRS-P4 (OCEANSAT-1), IRS-P5 (CARTOSAT-1) e IRS-P6 (RESOURCESAT-1). El satélite IRS-1C fue puesto en

órbita el 28 de mayo de 1995. En Kasturirangan *et al.* (1996) y Navalungd (2006) 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 (5,8 m), el sensor LISS-III (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) con dos bandas en el visible, una

**Tabla 3.** Macroclases de productividad potencial climática (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) empleadas como áreas de verdad de campo en el Parque Natural Los Alcornocales

Macroclases de productividad potencial climática	Clases de productividad potencial climática	Productividad potencial forestal (m <sup>3</sup> /ha/a)	Superficie (ha)	Porcentaje de superficie
1	I, II	> 6,00	105799,0	61,73
2	III	> 4,50 - < 6,00	27180,4	15,86
3	IV, V, VII	< 4,50	38410,2	22,41

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  $\mu$ ) y al infrarrojo cercano (0,77 - 0,86  $\mu$ ), y una resolución espacial nominal de 188 m y temporal de cinco días.

Son varios los estudios sobre la vegetación o de carácter forestal realizados utilizando imágenes WiFS: Singh *et al.* (1999) estudiaron la cubierta vegetal en el estado de Gugarat (India occidental); Kale *et al.* (2001) han estimado la radiación fotosintéticamente activa en bosques tropicales indios; Jhosi *et al.* (2001) estudiaron la cubierta forestal en Himalaya occidental; Tomppo *et al.* (2002) han estudiado el uso combinado de información Landsat TM e IRS-1C WiFS junto a datos de campo de los inventarios forestales nacionales de Suecia y Finlandia para obtener el volumen de fuste y la biomasa forestal aérea en dos áreas de estos países; Roy y Joshi (2002) han obtenido que la cubierta forestal del noreste de India era bastante inferior a la estimada por el Inventario Forestal de India, y que estas imágenes eran adecuadas para estudio de la cubierta vegetal a nivel regional; Saura y San Miguel (2002) han cartografiado la cubierta vegetal en un área del centro de España.

Jain y Chaudhry (2003) han estudiado la cubierta forestal y nivosa en el norte de India; Joshi *et al.* (2004) han estudiado las cubiertas forestales tropicales de hoja caduca del centro de India; García-Gigorro *et al.* (2005) han comparado la estructura espacial obtenida en base a sensores de muy diferente resolución espacial como Landsat TM y WiFS; Kale *et al.* (2005) han estimado el LAI de un distrito del centro de India; Joshi *et al.* (2006) han cartografiado la vegetación de toda India utilizando un compuesto de imágenes WiFS de dos años, y Roy *et al.* (2006) han realizado una cartografía de los biomas de India cruzando esta cartografía y parámetros climáticos como temperatura, precipitación media anual y evapotranspiración potencial.

La imagen empleada fue captada el 17 de agosto de 1996. Esta imagen se ha utilizado en otros estudios relacionados con masas forestales mediterráneas haciendo uso de los datos de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España, como en el Parque Natural Los Alcornocales (Cuevas *et al.* 2000a), en los pinares de pino piñonero de Barbate (Cuevas *et al.* 2000b) y en los pinsapares en el Parque Natural de la Sierra de Grazalema (Cuevas *et al.*, 2005). Las características de esta imagen son buenas: poca deformación espacial y la cubierta nubosa es muy escasa, siendo nula sobre el Par-

que Natural Los Alcornocales. Un sector de esta imagen WiFS incluyendo el Parque Natural 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. El sector de la imagen WiFS cubriendo el Parque Natural quedó constituido por 52898 píxeles y aparece representado en la Figura 1b.

## El Segundo Inventario Forestal Nacional de España en el Parque Natural Los Alcornocales

Como información de campo se han empleado datos procedentes del Segundo Inventario Forestal Nacional de España (DGCN, 1996). Los datos de los Inventarios Forestales Nacionales constituyen junto a la información aportada por las imágenes de satélite un recurso fundamental e imprescindible para satisfacer las necesidades actuales de supervisión y manejo de los espacios forestales (McRoberts *et al.*, 2007; Tomppo *et al.*, 2008). Este inventario tuvo como diseño un muestreo sistemático, adoptándose como centro de las parcelas de campo los vértices de una malla UTM de un kilómetro de lado en las zonas consideradas como arboladas. En cada parcela de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional (SIFN) se anotaron diversos datos relativos a la estación y se midieron los pies mayores, aquellos árboles con diámetro normal, medido a 1,30 m del suelo, igual o superior a 75 mm en cuatro 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 con diámetro normal mayor de 24 y menor de 75 mm, se contaron por especies en un círculo de 5 m de radio. Puesto que el radio mayor de las parcelas de campo del SIFN es 25 m y la superficie de un círculo de este radio es 1963,49 m<sup>2</sup>, una parcela de campo del SIFN tiene una superficie solamente 6,06% de la superficie cubierta por un píxel IRS-1C WiFS. Dado los lógicos, y desconocidos, errores cometidos en la localización de las parcelas de campo del SIFN en el terreno, la utilización de imágenes de resolución espacial media como las IRS-1C WiFS es de gran interés.

Las fechas de toma de los datos de campo de las parcelas del SIFN se extienden desde agosto de 1995 a noviembre de 1996, perteneciendo las 75 parcelas de 1995 a la provincia de Málaga. Por tanto, los datos de

campo del SIFN utilizados son bastante coetáneos con la imagen WiFS empleada. El número de parcelas de campo del SIFN situadas en el Parque Natural Los Alcornocales es 781. Como parámetro obtenido a partir de los datos de campo de estas parcelas se ha empleado el área basimétrica, que es un indicador óptimo de la densidad vegetal y es esperable que sea determinante de las propiedades espectrales de los bosques (Maselli *et al.*, 2005). El área basimétrica se ha utilizado como parámetro evaluador de la biomasa forestal aérea cuya estrecha relación con la productividad forestal ha sido analizada por Keeling y Philips (2007). En el Parque Natural Los Alcornocales 70,91% de área basimétrica corresponde al alcornoque, 15,31% a los quejigos, 7,85% al acebuche, 3,01% a diversas especies de pinos, 1,75% al madroño, 0,49% al aliso, 0,46% al fresno, 0,30% al agracejo y 0,25% a eucaliptos. El número de parcelas en que el área basimétrica es nula, es decir, sin pies mayores, es 105, un 13,44%. Solamente 39 parcelas, 4,48%, están totalmente desarboladas, sin pies mayores ni menores.

## Resultados

Para analizar el interés del Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España como fuente de informa-

ción en base a la que definir las áreas de verdad de campo utilizadas para construir un clasificador de tipo supervisado con el que clasificar la imagen de satélite se agruparon las seis clases de PPC presentes en el Parque Natural en tres macroclases formadas por clases correlativas (Figura 1c). Se utilizaron tres macroclases ya que se había comprobado previamente (Cuevas *et al.*, 2000a) que con una segmentación por rangos del NDVI de esta misma imagen en tres clases era posible obtener clases significativamente diferentes entre sí respecto al área basimétrica de las parcelas de campo del SIFN. Destaca el tamaño mayor de la macroclase 1 por incluir la clase de PPF IIa, que por sí sola representa 39,78% del Parque Natural. Esto mismo sucede, pero de forma más acusada, en el caso de utilizar otras agrupaciones diferentes.

Los valores del visible, el infrarrojo cercano y el NDVI de las tres macroclases de PPF empleadas como áreas de verdad de campo, y del conjunto del Parque Natural aparecen en la Tabla 4. El visible medio de estas tres macroclases es mayor cuanto es menor la PPC y los NDVI medios de estas tres macroclases de PPC disminuyen según ésta es menor, lo que tiene un gran sentido biológico y espectral. En el análisis de varianza del NDVI en estas tres macroclases se obtiene:

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Prob.
Entre los grupos	76,8648	2	38,4324	1 914,29	0,0000
Dentro de los grupos	1 061,95	52 895	0,0200766		

Estas tres macroclases de PPC son significativamente diferentes entre sí respecto al NDVI de WiFS al 99%. También son significativamente diferentes entre sí estas tres macroclases respecto al visible de WiFS al 99%, pero respecto al infrarrojo cercano sólo son diferentes al

66%. En la Tabla 5 aparece el reparto de las parcelas de campo del SIFN entre las tres macroclases de PPC, y sus valores de área basimétrica. El análisis de varianza del área basimétrica para las tres macroclases de PPC es:

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Prob.
Entre los grupos	218,844	2	109,422	1,55	0,2138
Dentro de los grupos	55 071	778	70,7858		

Estas tres macroclases de PPC son significativamente diferentes entre sí respecto al área basimétrica de las parcelas de campo del SIFN sólo al 66%, en que lo son las macroclases 1 y 3 exclusivamente, pero no los otros dos pares de macroclases.

Se clasificó supervisadamente por máxima verosimilitud el NDVI de WiFS del Parque Natural utilizando las tres macroclases de PPC como áreas de verdad de campo. En la Tabla 6 aparecen la superficie y los valores del NDVI de las tres clases obtenidas. Los

**Tabla 4.** Valores en la imagen IRS-1C WiFS del Parque Natural Los Alcornocales y de las tres macroclases de productividad potencial climática (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) empleadas como áreas de verdad de campo

Macroclases de productividad potencial climática (m <sup>3</sup> /ha/a)	Visible				Infrarrojo				NDVI			
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
1. > 6,00	62,64	30	171	17,55	126,08	29	178	15,25	0,340	- 0,426	0,678	0,136
2. > 4,50 - < 6,00	72,72	35	188	21,80	128,87	28	178	12,79	0,289	- 0,347	0,615	0,134
3. < 4,50	76,44	34	185	22,32	126,29	24	184	19,86	0,250	- 0,407	0,627	0,160
P. N. Los Alcornocales	67,33	30	188	20,34	126,57	24	184	16,09	0,312	- 0,426	0,678	0,147

NDVI medios son decrecientes según la PPC de origen va disminuyendo, y no hay solape entre los rangos de NDVI de las clases obtenidas. Hay una diferencia significativa entre el NDVI de estas tres clases obtenidas por clasificación supervisada de máxima verosimilitud del NDVI de WiFS a otro al 99%. En la Tabla 7 aparece el reparto de las parcelas de campo del SIFN en

estas tres clases y los valores del área basimétrica en cada una de estas clases. El área basimétrica media de las parcelas de campo del SIFN de las tres clases obtenidas va decreciendo según las clases corresponden a menor productividad potencial climática. El análisis de varianza del área basimétrica para las tres clases obtenidas es:

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Prob.
Entre los grupos	6 531,08	2	3 265,54	52,10	0,0000
Dentro de los grupos	48 759,1	778	62,6724		

Estas clases obtenidas son significativamente diferentes entre sí respecto al área basimétrica de las parcelas de campo del SIFN al 90% por el método de Fischer y al 95% por los métodos de Student-Newman-Keuls y de Duncan. Las clases 1 y 2, y 1 y 3, tienen medias de área basimétrica significativamente diferentes entre sí al 99%. Las clases 2 y 3, tienen medias de área basimétrica significativamente diferentes entre sí al 95% por los métodos de Student-Newman-Keuls y de Duncan.

## Discusión

En el estudio sobre la segmentación por rangos del NDVI de esta misma imagen WiFS (Cuevas *et al.*, 2000a) en tres clases definidas apriorísticamente se obtuvieron clases con área basimétrica de las parcelas de campo del SIFN significativamente diferentes entre sí al 99 % (F = 67,06). Con una metodología menos compleja, que no hacía uso de información ajena a la imagen empleada, se obtuvo en el mismo área un resul-

**Tabla 5.** Área basimétrica de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional (SIFN) de España en las tres macroclases de productividad potencial climática (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) empleadas como áreas de verdad de campo

Macroclases de productividad potencial climática (m <sup>3</sup> /ha/a)	Número de parcelas de campo del SIFN	Área basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)			
		Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
1. > 6,00	492	10,53	0	43,69	8,29
2. > 4,50 - < 6,00	140	9,67	0	35,77	8,52
3. < 4,50	149	9,27	0	36,26	8,72



**Tabla 6.** Superficie y valores del NDVI de las tres clases obtenidas mediante clasificación supervisada del NDVI de WiFS

Clase	Número de píxeles	Superficie (ha)	NDVI			
			Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
1	27 968	90 616,3	0,419	0,319	0,678	0,066
2	14 568	47 200,3	0,264	0,200	0,319	0,034
3	10 362	33 572,9	0,091	- 0,426	0,198	0,117

tado de una mejor calidad desde un punto de vista dasométrico. Pero lo interesante en este caso es haber comprobado como la utilización combinada de una cartografía de PPC, que está basada en atributos de carácter climático, en un área forestal bien conservada y de una imagen de satélite permite definir zonas con área basimétrica significativamente diferentes entre sí a un nivel aceptable.

En la Tabla 8 aparece la matriz de confusión (Congalton y Green, 1999) resultante de cruzar las macroclases de productividad potencial climática empleadas como áreas de verdad de campo y los resultados obtenidos mediante clasificación supervisada de máxima verosimilitud del NDVI de WiFS. La CHI2 de esta tabla es 3 587,49 ( $P = 0,0000$ ) mostrando que se puede rechazar la hipótesis de independencia de las filas y las columnas a un nivel de confianza de 99%. El número de píxeles clasificado en la misma clase que la de partida es 26 154, solamente 49,44% del Parque Natural. El número de píxeles que ha empeorado o mejorado en una clase en la clasificación es 18 545, 35,06% del Parque Natural. El número de píxeles que ha empeorado o mejorado dos clases es 8 199, 15,50% del Parque Natural y corresponden en la mayoría de los casos a superficies sin cubierta forestal como embalses, y los restantes están situados mayoritariamente en la periferia del Parque Natural donde son más frecuentes las áreas sin cubierta forestal.

En el Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España de este área (Figura 1a) abundan las teselas con formas lineales, en gran parte pertenecientes a la clase IIIa, que tienen su origen en diferencias litológicas, que no se reflejan ni en la imagen WiFS empleada (Figura 1b) ni en los resultados obtenidos mediante clasificación de ella (Figura 1d). En este último caso la distribución de las manchas de las tres clases es bastante “concéntrica”, estando la clase 1 mayoritariamente rodeada por la clase 2, y ésta por la 3. Esto tiene sentido biológico y forestal, como consecuencia de la mayor altitud y la mejoría de las condiciones meteorológicas, unido a una menor presión histórica humana cuanto más al interior del Parque. Es decir, la clase obtenida a partir de la macroclase de mayor PPC y la información WiFS, y con mejores parámetros dasométricos reales, está rodeada por una clase de peores características dasométricas, y ésta a su vez por la clase con las peores características dasométricas. Asimismo, se puede observar como la clase obtenida 1 ocupa el centro del Parque Natural pero se extiende hacia el este y el sur, que es la zona donde se sitúan las masas de mayor densidad (Torres y Montero, 2000).

## Conclusiones

El Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España es de utilidad para la estimación de la biomasa

**Tabla 7.** Área basimétrica de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional (SIFN) de España en cada una de las tres clases obtenidas mediante clasificación supervisada del NDVI de WiFS

Clase	Número de parcelas de campo del SIFN	Área basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)			
		Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
1	510	12,21	0	43,69	8,65
2	177	6,89	0	28,36	6,59
3	94	4,99	0	21,42	5,71

**Tabla 8.** Tabla de contingencia, en píxeles, entre las macroclases de productividad potencial climática (Sánchez-Palomares y Sánchez-Serrano, 2000) empleadas como áreas de verdad de campo y los resultados obtenidos mediante clasificación supervisada del NDVI de IRS-1C WiFS

		Clases de productividad potencial climática y productividad (m <sup>3</sup> /ha/a)	Clasificación supervisada del NDVI de WiFS			
			1	2	3	Total
Macroclases de productividad potencial climática	1	I, II (> 6,00 )	20 046	8 432	4 176	32 654
	2	III (> 4,50 - < 6,00 )	3 899	2 206	2 284	8 389
	3	IV, V, VII (< 4,50 )	4 023	3 930	3 902	11 855
	Total		27 968	14 568	10 362	52 898

forestal real, evaluada mediante el área basimétrica, cuando se combina con la información de una imagen de satélite en un área, como el Parque Natural Los Alcornocales, protegida y ocupada por vegetación natural autóctona y climática, compuesta en su mayoría por quercíneas mediterráneas.

Mediante agrupación correlativa de las clases de este mapa se han obtenido tres macroclases de productividad potencial climática que han resultado significativamente diferentes entre sí al 99% respecto el visible y el NDVI de una imagen de satélite IRS-1C WiFS. La clasificación supervisada del NDVI de esta imagen haciendo uso de estas macroclases de productividad potencial climática para definir las áreas de verdad de campo permite obtener clases significativamente diferentes entre sí respecto a un atributo dasométrico real de gran significado e importancia forestal como es el área basimétrica.

## Agradecimientos

Se agradece al Banco de Datos de la Naturaleza de la Dirección General para la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 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

ALCARAZ D., PARUELO J., CABELLO J., 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography* 15, 200-212.  
 CHIESI M., MASELLI F., MORIONDO M., FIBBI L., BINDI M., RUNNING S.E., 2007. Application of BIOME-

BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecological Modelling* 206, 179-190.  
 CHIRICI G., BARBATI A., MASELLI F., 2007. Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. *Forest Ecology and Management* 246, 285-295.  
 CONGALTON R.G., GREEN K. 1999. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Boca Raton, Lewis Publishers, Florida, USA.  
 COOK E., IVERSON L.R., GRAHAM R. L., 1989. Estimating forest productivity with Thematic Mapper and bigeographical data. *Remote Sensing of Environment* 28, 131-141.  
 COOPS N.C., WARING R.H., LANDSBERG, J.J., 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management* 104, 113-127.  
 COOPS N.C., 1999. Improvement in predicting stand growth of *Pinus radiata* (D. Don) across landscapes using NOAA AVHRR and Landsat imagery combined with a forest growth process model (3-PGS). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 65, 1149-1156.  
 COOPS N.C., WARING R.H., 2001a. The use of multiscale remote sensing imagery to derive regional estimates of forest growth capacity using 3-PGS. *Remote Sensing of Environment* 75, 324-334.  
 COOPS N.C., WARING R.H., 2001b. Estimating forest productivity in the eastern Syskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. *Canadian Journal of Forest Research - Revue Canadienne de Recherche Forestière* 31, 143-154.  
 COOPS N.C., WARING R.H., LANDSBERG J.J., 2001. Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records. *International Journal of Remote Sensing* 22, 3797-3812.

- COOPS N.C., WHITE J.D., 2003. Modelling forest productivity using data acquired through remote sensing. En: Wulder M. A. and Franklin S.E. (eds.), 2003. Remote sensing of forest environments: Concepts and case studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/Londres.
- COOPS N.C., BLACK T.A., JASSAL R.S., TROFYMOW J.A., MORGENSTERN K., 2007. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment* 107, 385-401.
- CUEVAS J. M., VÁZQUEZ A., GONZÁLEZ-ALONSO F., 2000a. Análisis de la utilidad de la información WiFS del satélite indio IRS-1C para el Inventario Forestal Nacional de España. *Ecología* 14, 169-179.
- CUEVAS J. M., GONZÁLEZ-ALONSO F., VÁZQUEZ A., 2000b. 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.
- CUEVAS J. M., GONZÁLEZ-ALONSO F., MERINO S., 2005. Relación entre la información de una imagen de satélite IRS-1C WiFS y parámetros forestales en el área del pinsapar de Grazalema. *Ecología* 19, 47-58.
- DGCN, 1996. II Inventario Forestal Nacional 1986-1996. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid
- FOX III L., BROCKHAUS J.A., TOSTA N.D., 1985. Classification of timberland productivity in Northwestern California using Landsat, topographic, and ecological data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 51, 1745-1752.
- GARCÍA-GIGORRO, S., SAURA S., 2005. Forest fragmentation estimated from remotely sensed data: is comparison across scales possible?. *Forest Science* 51, 51-63.
- JAIN S.K., CHAUDRY A., 2003. Snow and forest cover assessment of Uttaranachal state using IRS 1C WiFS data. *Journal of The Indian Society of Remote Sensing*, 31, 91-100.
- JOSHI P.K., SINGH S., AGARWAL S., ROY P.S., 2001. Forest cover assessment in western Himalayas, Himachal Pradesh using IRS 1C/1D WiFS data. *Current Science*, 80, 941-947.
- JOSHI P.K., JHOSI P.C., SINGH S., AGARWAL S., ROY P.S., 2004. Tropical forest covers type characterization in central highlands of India, using multi-temporal IRS-1C WiFS data. *Indian Journal of Forestry* 27, 157-168.
- JOSHI P.K., ROY P.S., SINGH S., AGARWAL S., YADAV D., 2006. Vegetation cover mapping in India using multi-temporal IRS Wide Field Sensor (WiFS) data. *Remote Sensing of Environment* 103, 190-202.
- JURADO V., 1999. Biogeografía, transformaciones históricas y gestión forestal de los bosques del Parque Natural de los Alcornocales (Cádiz-Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- KALE M.P., SINGH S., ROY P.S., 2001. Satellite remote sensing (IRS-WiFS) for estimating intercepted photosynthetically active radiation in tropical forest ecosystem. *Asian Journal of Geoinformatics* 2, 59-71.
- KALE M.P., SINGH S., ROY P.S., 2005. Estimation of Leaf Area Index in dry deciduous forests from IRS-WiFS in central India. *International Journal of Remote Sensing* 26, 4855-4867.
- KASTURIRANGAN K., ARAVAMUDAN R., DEEKSHATULU B.L., GEORGE J., CHANDRASEKHAR M. G. 1996. Indian Remote Sensing satellite IRS 1C-the beginning of a new era. *Current Science* 70, 495-500.
- KEELING H.C., PHILLIPS O.L., 2007. The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography* 16, 618-631.
- LANDSBERG J.J., WARING R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95, 209-228.
- LANDSBERG J.J., 2003. Modelling forest ecosystems: state-of-the-art, challenges and future directions. *Canadian Journal of Forest Research - Revue Canadienne de Recherche Forestière* 33, 385-397.
- MADRIGAL J., HERNANDO C., MARTÍNEZ E., GUIJARRO M., DÍEZ C., 2005. Regeneración post-incendio de *Pinus pinaster* Ait. en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central, España): modelos descriptivos de los factores influyentes en la densidad inicial y la supervivencia. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 14, 36-51.
- MÄKELÄ A., LANDSBERG J., EK A.R., BURK T.E., TERMIKAEKIAN M., ÅGREN G.I., OLIVER C.D., PUTTONEN P., 2000. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology*, 20, 289-298.
- MASELLI F., CHIRICI G., BOTTAI L., CORONA P., MARCHETTI M., 2005. Estimation of Mediterranean forest attributes by the application of k-NN procedures to multi-temporal Landsat ETM+ images. *International Journal of Remote Sensing* 26, 3781-3796.
- MASELLI F., CHIESI M., 2005. Integration of high and low resolution satellite data to estimate pine forest productivity in a Mediterranean coastal area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43, 135-143.
- MASELLI F., CHIESI M., 2006. Integration of multi-source NDVI data for the estimation of Mediterranean forest pro-

- ductivity. *International Journal of Remote Sensing* 27, 1, 55-72.
- MASELLI F., CHIESI M., FIBBI L., MORIONDO M., 2008. Integration of remote sensing and net ecosystem modelling techniques to estimate forest net carbon uptake. *International Journal of Remote Sensing* 29, 2437-2443.
- McROBERTS R.E., TOMPPO E.O., 2007. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 110, 412-419.
- NAVALUNGD R.R., 2006. Indian Earth Observation Systems: An Overview. *Geoinformatics*, 6, 1. [http://www.geoinfo.ait.ac.th/ajg/Vol6\\_No1.php](http://www.geoinfo.ait.ac.th/ajg/Vol6_No1.php)
- NIGHTINGALE J.M., HILL M.J., PHINN S.R., HELD A.A., 2007a. Comparison of satellite-derived estimates of gross primary production for Australian old-growth tropical rainforest. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33, 278-288.
- NIGHTINGALE J.M., COOPS N.C., WARING R.H., HARGROVE W.W., 2007b. Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across U.S.A. with those generated by a simple process model, 3-PGS. *Remote Sensing of Environment*, 109, 4, 500-509.
- NIGHTINGALE J.M., HILL M. J., PHINN S.R., DAVIES I.D., HELD A.A., ERSKINE P.D., 2008a. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. *Forest Ecology and Management* 254, 107-121.
- NIGHTINGALE J.M., HILL M. J., PHINN S.R., DAVIES I.D., HELD A.A., 2008b. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests II. An integrated system for modelling forest growth and scenario assessment within the wet tropics bioregion. *Forest Ecology and Management* 254, 122-133.
- OLOFSSON P., EKLUNDH L., LAGERGREN F., JÖNSSON P., LINDROTH A., 2007. Estimating net primary production for Scandinavian forests using data from Terra/MODIS. *Advances in Space Research*, 39, 125-130.
- PATERSON S.S., 1956. The forest area of the world and its potential productivity. Göteborg University. Göteborg.
- PETTORELLI N., VIK J.O., MYSTERUD A., GAILLARD J.-M., TUCKER C.J., STENTSETH N.C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 503-510.
- ROY P.S., JOSHI P. K., 2002: Forest cover assessment in north-east India—the potential of temporal wide swath satellite sensor data (IRS-1C WiFS). *International Journal of Remote Sensing* 23, 4881-4896.
- ROY P.S., JOSHI P.K., SINGH S., AGARWAL S., YADAV D., JEGANNATHAN C., 2006. Biome mapping in India using vegetation type map derived using temporal satellite data and environmental parameters. *Ecological Modelling* 197, 148-158.
- SÁNCHEZ-PALOMARES O., SÁNCHEZ-SERRANO F., 2000. Mapa de la Productividad Potencial Forestal de España. Cartografía digital. Dirección General de Conservación de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente, Serie Cartográfica, Madrid. 317 pp + planos.
- SÁNCHEZ-PALOMARES O., JOVELLAR L.C., SARMIENTO L.A., RUBIO A., GANDULLO J.M., 2007. Las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles. Monografías INIA, Serie Forestal 14.
- SAURA S., SAN MIGUEL-AYANZ J., 2002. Forest cover mapping in Central Spain with IRS-WIFS images and multi-extent textual-contextual measures. *International Journal of Remote Sensing* 23, 603-608.
- SERRADA R., 1976. Método para la evaluación con base ecológica de la productividad potencial de las masas forestales y su aplicación a la España peninsular. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- SINGH S., AGARWAL S., JOSHI P.K., ROY P.S., 1999. Biome level classification of vegetation in western India – an application of wide field view sensor (WiFS). En: Proceedings of the Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/1, I/3 and IV/4: Sensors and Mapping from Space, Hanover, Germany, 27-30 septiembre, pp. 81-96.
- SKOVSGAARD J.P., VANCLAY J.K., 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81, 13-31.
- TOMPPO E., NILSSON, M., ROSENGREN M., AALTO P., KENNEDY P., 2002. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment* 82, 156-171.
- TOMPPO E., OLSSON H., STÅHL G., NILSSON, M., HAGNER O., KATILA M., 2008. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment* 112, 1982-1999.
- TORRES E., MONTERO G., 2000. Los alcornocales del macizo del Algibe y sierras del Campo de Gibraltar. MAPA.
- TUCKER C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127-150.
- VAN TUYL S., LAW B.E., TURNER D.P., GITELMAN A.I., 2005. Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests—an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing. *Forest Ecology and Management* 209, 273-291.

- VÁZQUEZ A., GARCÍA J. M., ORTEGA M., SÁNCHEZ-PALOMARES O., 2006. Recent fire regime in peninsular Spain in relation to forest potential productivity and population density. *International Journal of Wildland Fire* 15, 397-405.
- WANG J., RICH P. M., PRICE K.P., KETTLE W. D., 2004. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing* 25, 3127-3138.
- WARING R.H., MILNER K.S., JOLLY W.M., PHILLIPS L., McWETHY D., 2006. Assessment of site index and forest growth capacity across the Pacific and Inland Northwest U.S.A. with a MODIS satellite-derived vegetation index. *Forest Ecology and Management* 228, 285-291.