

# IMÁGENES ESPACIALES DE ALTA RESOLUCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA VEGETACIÓN FORESTAL

A. Vázquez de la Cueva, I. Cañellas Rey de Viñas, F. Montes Pita y O. Sánchez Palomares

Centro de Investigación Forestal. CIFOR-INIA. Ctra de A Coruña km 7,5. 28028-MADRID (España).  
Correo electrónico: vazquez@inia.es

## Resumen

La última generación de imágenes espaciales de alta resolución, como las derivadas del satélite QuickBird (QB) con resoluciones del orden de 0,7 m en modo pancromático y 2,8 m en multiespectral, ofrecen nuevas posibilidades para la cartografía y el análisis de la cubierta vegetal, enfocadas tanto a la composición específica como al análisis de los patrones espectrales y espaciales asociados a distintas estructuras de la cubierta forestal. El segundo aspecto es el abordado en esta comunicación. En este trabajo se han empleado dos índices representativos de la actividad vegetativa derivados de la imagen QB para explorar los patrones espectrales y espaciales observados en un monte de castaños. Los patrones espectrales se han analizado a partir de valores medios y su variabilidad en las parcelas muestreadas. La valoración del patrón espacial se ha abordado por medio de técnicas geoestadísticas. El procedimiento seguido ha consistido en relacionar los parámetros obtenidos de los modelos ajustados a semiovariogramas experimentales con variables relativas a la estructura del monte como la altura, densidad, área basimétrica y espesura de copas. Los resultados obtenidos muestran algunas relaciones muy interesantes en las que es necesario profundizar para mejorar la información que se puede derivar de la imagen espacial.

Palabras clave: *Ecología forestal, Modelos geoestadísticos, Patrones espaciales, Castanea sativa, Hervás*

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo muestra una aproximación en la que se relacionan algunos parámetros derivados del análisis de una imagen multiespectral Quick-Bird (QB) con datos obtenidos del muestreo de campo en parcelas seleccionadas en un monte de castaños. La información derivada de las imágenes han sido dos índices representativos de la actividad de la vegetación: el primero es el índice de vegetación normalizado (NDVI) y el segundo una imagen que representa el grado de similitud de cada píxel con el tipo de cubierta definido (EM4) y que se ha derivado de un análisis de mezclas espectrales.

El análisis del patrón espacial se ha realizado por medio de semiovariogramas, lo que se justifica por el interés en explotar la información espacial presente en la imagen, es decir la relación entre los valores de píxeles próximos. El empleo de técnicas geoestadísticas, como el "kriging", recibe cada vez más importancia en la estimación espacial de atributos de la vegetación (NANOS, 2001). COHEN *et al.* (1990) pusieron de manifiesto la relación entre parámetros derivados de semiovariogramas y atributos de la vegetación.

Además, las imágenes espaciales tienen cada vez más un papel relevante como ayuda, por ejemplo por medio de técnicas de co-kriging, para la expansión territorial de datos obtenidos

puntualmente, como es el caso de la mayor parte de los inventarios forestales y el modelado de variables biofísicas. En este sentido, se puede citar el trabajo de BLODGETT et al. (2000) en el que medidas de campo de la estructura de la vegetación se extrapolan por medio de co-kriging con datos obtenidos de imágenes espaciales.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis exploratorio de las relaciones entre los patrones espectrales y espaciales deducidos de una imagen de alta resolución con el estado y la estructura del arbolado en un monte ordenado dominado por castaños. Nuestra hipótesis es que la estructura aparente de la imagen está relacionada con la estructura del arbolado.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Los trabajos de campo se han llevado a cabo en el Monte de Utilidad Pública “Castañar Gallego” situado en el término municipal de Hervás (norte de Cáceres) y propiedad de este ayuntamiento desde 1263. Este castañar histórico tiene una superficie próxima a las 290 ha de extensión y se localiza en la vertiente noroeste

de la Sierra de “Tras la Sierra” dentro del Sistema Central (FRESNEDA Y GONZÁLEZ, 2002). La vegetación arbórea está dominada por castaños (*Castanea sativa*) en estado de fustal. El rebollo (*Quercus pyrenaica*) alcanza cierta importancia en algunos rodales perimetrales aunque los tratamientos selvícolas tienden a favorecer la expansión del castaño.

Durante el invierno de 2004 se muestrearon 19 parcelas en, o próximas, al monte en rodales que no se hubiesen visto afectadas por cortas o tratamientos selvícolas después de la fecha de adquisición de la imagen. La ubicación preliminar de las parcelas se realizó en áreas de cobertura homogénea con la ayuda de la imagen pancromática realizada con información multiespectral. En cada una de las parcelas se midieron los diámetros (DBH) de los pies mayores ( $\geq 20$  cm) en un radio de 15 m y los pies menores (2-20 cm) en un radio de 7,5 m anotando también su procedencia (pie aislado o cepa). De las 19 parcelas muestreadas, 15 presentan pies mayores de castaño y son las empleadas en los análisis posteriores.

La imagen empleada fue captada el 2 de agosto de 2002. En la corrección geométrica de

Parcela	Código de AB	Pies mayores por ha	Pies menores por ha	AB por ha	AB de pies mayores por ha	Altura dom. (m)	DN (DBH) máx. (cm)	Cobertura de copas	Proporción de arboles en cepas
P203	A	226,4	622,5	20,8	14,6	15,3	50	0,71	0,52
P301	A	297,1	1018,6	23,3	17,9	20,2	42	0,80	0,23
P701	A	183,9	1075,2	18,5	9,5	17,2	36	0,90	0,56
P1403	A	254,6	509,3	23,1	17,8	23,3	44	0,75	0,52
P1502	A	226,4	905,4	21,4	14,2	18,5	50	0,61	0,31
P1701	A	141,5	1584,5	22,1	10,3	15,2	37	0,73	0,63
P403	B	297,1	1414,7	24,3	19,9	24,4	57	0,54	0,48
P1103	B	367,8	396,1	25,2	19,1	17,0	35	0,65	0,45
P1401	B	339,5	452,7	24,6	21,1	15,9	46	0,66	0,00
P1803	B	226,4	622,5	24,3	21,7	17,2	54	0,72	0,33
P401	C	325,4	1188,4	29,6	22,3	19,2	47	0,77	0,23
P402	C	382,0	622,5	31,5	27,6	21,1	42	0,89	0,21
P1501	C	396,1	226,4	28,5	27,0	24,3	56	0,89	0,13
P1601	C	410,3	282,9	37,1	33,4	16,9	42	0,70	0,71
P1802	C	297,1	735,6	31,0	21,6	23,0	47	0,83	0,38

**Tabla 1.** Alguna de las variables relativas a la estructura del arbolado medidas en las 15 parcelas con pies mayores de castaño. Se muestran agrupadas en función del área basimétrica de éstos: (A) menos de 24 m<sup>2</sup>/ha, (B) entre 24 y 28 m<sup>2</sup>/ha y (C) más de 28 m<sup>2</sup>/ha y (D) sin pies mayores de castaño. AB: área basimétrica; DN: diámetro normal

la imagen se han empleado como base mapas topográficos a escala 1:25.000. Las correcciones geométricas han tenido en cuenta también el Modelo Digital del Terreno (25 m). Se ha seguido el procedimiento propuesto por PALÁ & PONS (1995) e implementado en el SIG MIRAMON. A partir de la imagen multispectral ortorectificada se han derivado dos índices con la finalidad de explorar tanto los patrones espectrales como espaciales de la imagen en relación a la estructura del arbolado. Estos dos índices han sido: (1) el índice de vegetación normalizado (NDVI) calculado a partir de las bandas del infrarrojo cercano y del rojo y (2) una imagen (EM4) derivada de una clasificación basada en técnicas de análisis de mezclas espectrales. El procedimiento para la obtención de esta última imagen implica diversas etapas: (1) reducción de la dimensionalidad, (2) selección de píxeles y (3) clasificación de la imagen por medio del procedimiento del Matched Filtering, el cual nos proporcionaría, en los EndMembers que se obtienen, un indicativo del grado de ajuste de cada píxel a la cubierta de referencia, en este caso la cubierta de castaños, que denominaremos EM4.

Los patrones espectrales se han basado en las medias y la variabilidad de los dos índices en las parcelas muestreadas. Para la evaluación de los patrones espaciales, se han realizado semiovariogramas experimentales a partir de puntos situados en círculos de 60 metros de diámetro centrados en las parcelas de campo. Los valores modelados han sido el NDVI y el EM4 disponibles con una resolución de 2,8 metros. En todos los casos se han empleado modelos esféricos basados en técnicas de kriging ordinario y omnidireccionales. En este modelo la semivarianza aumenta con la distancia hasta que alcanza un máximo ("sill" o meseta). La distancia a la que se alcanza esta meseta se denomina rango (o alcance). La meseta y el rango son los dos parámetros del semiovariograma empleados en esta aproximación para describir el patrón espacial.

## RESULTADOS

La mayor parte de las parcelas se sitúan a unos 800 metros de elevación con una pendiente media de 18 grados, con máximos próximos a

24 y mínimos cercanos a 9. La orientación dominante es Oeste-Noroeste aunque algunas presentan orientaciones distintas.

Los valores medios del NDVI son bastante similares en las 15 parcelas analizadas como ilustra el histograma de la figura 1A. Los valores del EM4 tienen una distribución más amplia (Figura 1B). Los rangos modelados a partir de los semiovariogramas experimentales se muestran en los histogramas de la figura 1C para el NDVI y la figura 1D para el EM4. En ambos casos se aprecia una clara distribución bimodal. Para el NDVI la mayor parte de las parcelas tiene valores de alrededor de 5 metros y en torno a 15 metros para el EM4. Los valores de semivarianza explicada por el modelo, es decir la meseta, tienen valores muy dispares entre las dos variables, al depender mucho de la variabilidad de los datos de partida (Figura 1E y F).

Para las 15 parcelas con pies mayores de castaño y con únicamente esta especie, que son las analizadas, el área basimétrica oscila entre valores próximos a 20 m<sup>2</sup>/ha y valores superiores a 36 m<sup>2</sup>/ha. La tabla 1 muestra los valores medidos en las parcelas muestreadas para distintas variables relativas a la estructura de la masa como la altura dominante, el diámetro máximo y otras variables relativas a las cepas presentes en las parcelas.

A pesar del escaso número de puntos disponibles y de la variabilidad observada en los datos, se han realizado algunas correlaciones de rangos, no paramétricas, (rho de Spearman) entre las distintas variables implicadas como análisis exploratorio en las 15 parcelas con pies mayores de castaño. Se describen a continuación algunas de las relaciones estadísticamente significativas (p  $\leq$  0,05) detectadas (Tabla 2). Las más destacables se muestran como gráficos en la figura 2.

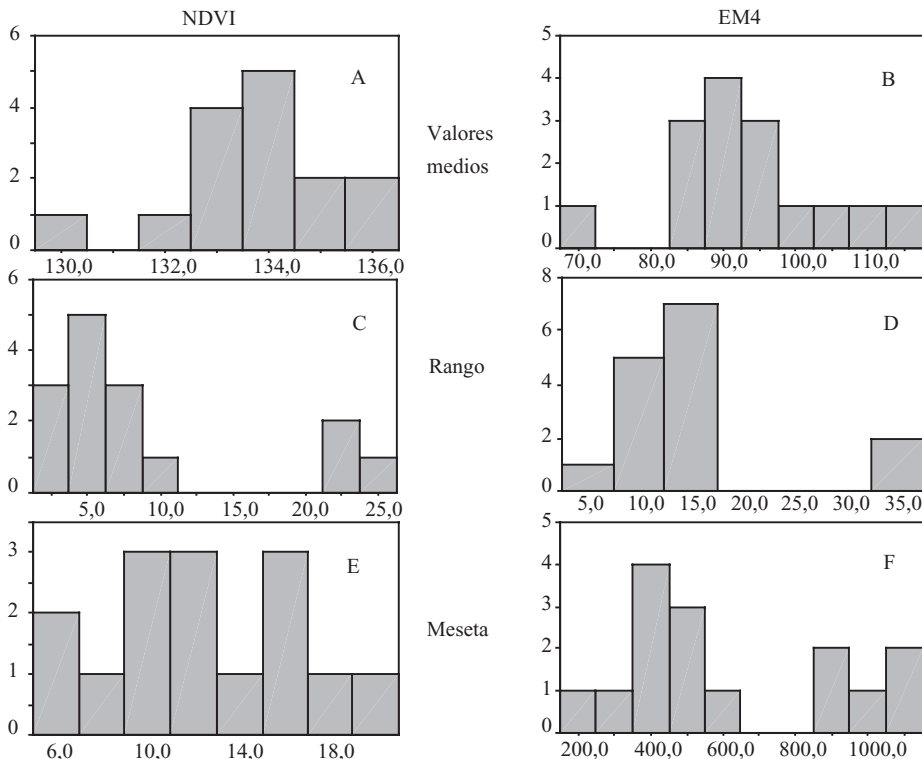
Los valores medios del NDVI y del EM4 han estado relacionados positivamente entre sí. El NDVI ha estado relacionado con la FCC (Figura 2A) y con la cobertura de copas estimada mediante transecto, lo que no ha sucedido con el EM4. Los rangos de NDVI, derivados del modelo esférico, se han relacionado positivamente con la meseta obtenida para el EM4 y, entre las variables medias en el campo, con el diámetro mayor medido en cada parcela (Figura

2B). La meseta obtenida para el NDVI ha estado relacionada de manera significativa con la cobertura de copas (Figura 2C). El rango derivado del EM4 no se ha relacionado con ninguna de las variables medidas en campo. En cambio, la meseta (del EM4) ha estado relacionada de manera significativa con el rango calculado a partir del NDVI y, al igual que sucedía con el rango obtenido para el NDVI, con el diámetro mayor medido en cada parcela (Figura 2D).

**DISCUSIÓN**

Trabajos previos habían puesto de manifiesto que el rango deducido de los semiovariogramas podría ser empleado como una medida de la dependencia espacial mientras que la meseta representaría la variabilidad en los datos (COHEN

et al., 1990). De los resultados obtenidos, aunque aún preliminares, se deduce que los valores del rango dependen de la variable analizada, y que si bien en la mayor parte de las parcelas tienen magnitudes comparables a las dimensiones de las copas, en otras ocasiones no es así. La meseta presenta valores muy distintos en las dos variables y también presenta anomalías en algunas parcelas. Los valores obtenidos se han relacionado con la variabilidad en los datos (no mostrado). La disposición y grado de cubierta de las copas, que en principio sería la variable relacionada con el patrón espacial aparente de la imagen, se ha relacionado con el valor medio del NDVI y con la meseta obtenida en los modelos resultantes del NDVI. Hay que tener en cuenta que con la resolución espacial de la imagen las copas no se muestran como zonas homogéneas sino que se aprecian zonas iluminadas y zonas



**Figura 1.** Histogramas de los valores medios del NDVI (A) y del EM4 (B) y de parámetros derivados del ajuste de los semiovariogramas experimentales a modelos esféricos para estas dos variables, NDVI y EM4, en las 15 parcelas analizadas. Rango (C) y (D), Meseta (E) y (F)

en sombras lo que complica el problema. Esta dificultad se acentúa en el monte estudiado dada la presencia, en el mismo rodal, de árboles de distintas edades y con patrones de agregación distintos: pies aislados junto a pies agregados procedentes de cepas muy antiguas.

Aparte de la espesura, definida por la cobertura de las copas, la única variable medida en el campo que se ha relacionado con alguna de las variables deducidas de la imagen ha sido el diámetro máximo medido en cada parcela. Esta relación, que se ha dado con el rango obtenido del NDVI y con la meseta obtenida del EM4, podría sugerir que la presencia de árboles grandes es lo que condiciona el patrón obtenido a través de las diferencias de alturas entre las copas (rugosidad) y su importancia en la distribución de sombras (SEED & KING, 2003). Por último, una variable

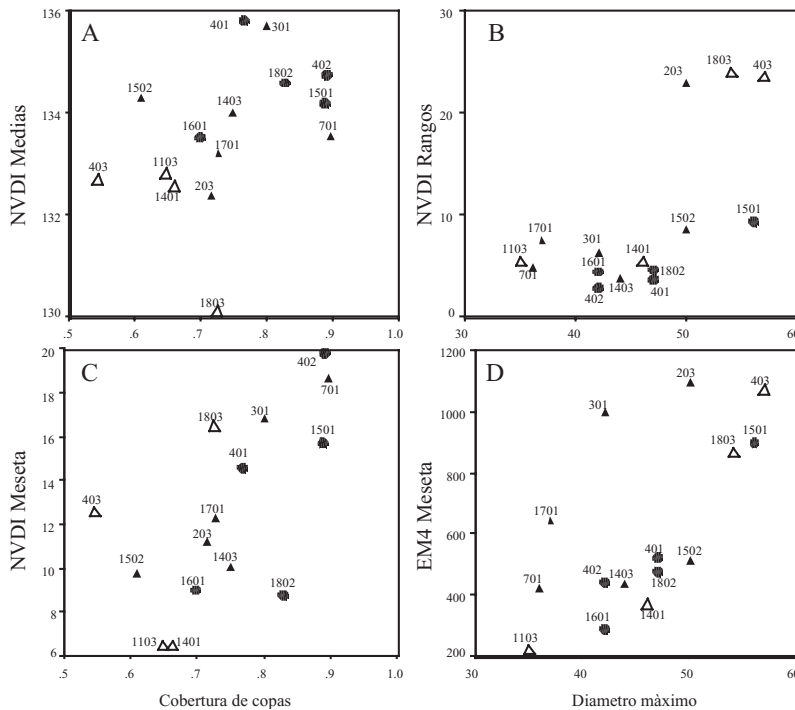
síntesis de la biomasa presente en cada parcela, como es el área basimétrica, no se ha relacionado, a esta resolución, ni con los valores medios de las dos variables ni con la evaluación del patrón espacial realizada a partir de ellas.

### Agradecimientos

Se agradece la colaboración prestada por la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura al facilitar los datos espaciales empleados, y en especial C. Velasco. Se agradece también el apoyo de J. Fresneda y M.A. González de la D.G. de Medio Ambiente también de la Junta de Extremadura. Este trabajo ha sido posible gracias a un contrato Ramón y Cajal concedido al primer autor.

	Valores medios		NDVI		EM4	
	NDVI	EM4	Rango	Meseta	Rango	Meseta
Media NDVI		0,85 **	-0,61 *	0,30	0,15	-0,04
Media EM4	0,85 **		-0,57 *	0,16	-0,05	0,08
Rango NDVI	-0,61 *	-0,57 *		0,04	0,05	0,65 *
Meseta NDVI	0,30	0,16	0,04	0,60 *	0,45	
Rango EM4	0,15	-0,05	0,05	0,60 *		0,01
Meseta EM4	-0,04	0,08	0,65 *	0,45	0,01	
FCC	0,60 *	0,39	-0,35	0,34	0,27	-0,16
Altura dominante	0,49	0,44	-0,10	0,31	0,15	0,24
Diámetro máximo	-0,16	-0,03	0,56 *	0,05	-0,26	0,65 *
Cobertura de copas	0,56 *	0,41	-0,44	0,63 *	0,33	0,01
Mancha de copas	-0,23	-0,32	-0,03	0,11	0,35	-0,25
Cob, del sotobosque	-0,26	-0,07	0,14	-0,43	-0,39	-0,16
Proporción arb, en cepas	-0,34	-0,31	0,03	-0,15	-0,17	-0,11
Número de cepas	-0,04	-0,10	-0,35	-0,27	-0,05	-0,38
Copa cepa tipo	-0,23	-0,09	0,37	0,13	0,17	0,39
Pies por ha	0,24	0,06	0,09	0,36	0,01	0,41
Pies mayores por ha	0,25	0,28	-0,38	-0,17	0,15	-0,33
Pies menores por ha	0,20	0,04	0,10	0,36	-0,02	0,42
Area basimétrica por ha	0,31	0,28	-0,47	-0,15	0,10	-0,31

**Tabla 2.** Coeficientes de correlación de Spearman ( $\rho$ ) entre variables derivadas de la imagen de satélite y variables muestreadas en el campo. El número de parcelas es 15 en todos los casos. La significación estadística de las correlaciones se ha señalado con un asterisco para  $p \leq 0,05$  y dos asteriscos para  $p \leq 0,01$



**Figura 2.** Representación de algunas de las relaciones estadísticamente significativas detectadas (Tabla 2). Los símbolos representan el código de área basimétrica. Clase A: triángulos negros; Clase B: triángulos abiertos y Clase C: círculos (ver la Tabla 1). Se incluye el código empleado en las 15 parcelas analizadas. (A) Cobertura de copas vs. Valor medio del NDVI; (B) Diámetro máximo vs. Rango obtenido del NDVI; (C) Cobertura de copas vs. Meseta obtenida del NDVI y (D) Diámetro máximo vs. Meseta del EM4

## BIBLIOGRAFÍA

- BLODGETT, C.F.; JAKUBAUSKAS, M.E.; PRICE, K.E. & MARTIKO, E.A.; 2000. Remote sensing-based geostatistical modeling of forest canopy structure. *In: ASPRS 2000 Annual Conference*. Washington.
- COHEN, W.B.; SPIES, T.A. & BRADSHAW, G.A.; 1990. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. *Rem. Sens. Env.* 34: 167-178.
- FRESNEDA, J. Y GONZÁLEZ, M.A.; 2002. *Aprovechamiento del monte "Castañar Gallego" de Hervás. Su ordenación: pasado, presente y futuro*. Informe interno.

- NANOS, N.; 2001. *Variabilidad y modelización geoestadística de la producción de resina y madera de Pinus pinaster (Ait.) en los montes de Segovia*. Tesis doctoral ETSIM Madrid. Madrid.
- SEED, E.D. & KING, D.J.; 2003. Shadow brightness and shadow fraction relations with effective leaf area index: importance of canopy closure and view angle in mixedwood boreal forest. *Can J Rem. Sens.* 29(3): 324-335
- PALÁ, V. & PONS, X.; 1995. Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials. *Photogrammetric Eng. Rem. Sens.* 61(7): 935-944.