

ESTIMACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE LOS BOSQUES A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE: EL PROBLEMA DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL

S. García Gigorro y S. Saura Martínez de Toda

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universitat de Lleida. Av. Alcalde Rovira Roure, 191. 25198-LLEIDA (España). Correo electrónico: ssaura@eagrof.udl.es

Resumen

Las imágenes de satélite se están utilizando cada vez más como la fuente de información para la caracterización de la fragmentación de los bosques. Sin embargo, existe incertidumbre sobre hasta qué punto son comparables las estimaciones de fragmentación obtenidas de imágenes con distinta resolución espacial, y se requieren procedimientos que permitan mejorar esa comparabilidad. En este estudio analizamos siete índices de fragmentación en un área de estudio en el centro de España. La información sobre la distribución y configuración de los bosques fue obtenida a partir de dos imágenes de satélite captadas simultáneamente por sensores con distinta resolución espacial: Landsat-TM (30 m) e IRS-WiFS (188 m). Los datos de bosques a la resolución TM fueron transferidos a la resolución WiFS mediante distintos filtros y comparados con los datos reales captados directamente por el sensor WiFS. Concluimos que los filtros estándar (media, mayoría) utilizados habitualmente para estos fines tienden a producir patrones más fragmentados que los obtenidos directamente de la información captada por los sensores remotos. En su lugar, se recomienda el uso de la función de respuesta puntual del sensor ("point spread function"), que replica el modo en que los sensores remotos captan realmente la radiación del terreno, y que permite reducir considerablemente los errores de comparación entre escalas, especialmente para los índices de fragmentación más extendidos y sensibles a la resolución espacial.

Palabras clave: *Paisaje forestal, Índices de fragmentación, Escala, Sensores remotos*

INTRODUCCIÓN

La fragmentación del bosque es un proceso por el cual grandes extensiones continuas de bosque se convierten en un conjunto de teselas pequeñas y aisladas (HAILA, 1999). Se considera una de las mayores amenazas para la conservación de la biodiversidad y de las funciones ecológicas de los bosques (FORMAN, 1995, ROCHELLE *et al.*, 1999; SANTOS Y TELLERÍA, 1999).

Por ello existe un creciente interés en analizar la fragmentación de los bosques (SKOLE &

TUCKER, 1993; RIITERS *et al.*, 2003), y en los últimos años se han desarrollado o adaptado multitud de índices para cuantificarla (HAINES-YOUNG & CHOPPING, 1996; SCHUMAKER, 1996; TRANI & GILES, 1999; BOGAERT *et al.*, 2004). La información espacial requerida para el análisis de la fragmentación forestal está hoy en día fácilmente disponible gracias al rápido desarrollo en las últimas décadas de los sistemas de teledetección y observación de la tierra, de manera que las imágenes de satélite se usan profusamente para estos fines (SKOLE & TUCKER,

1993; PERALTA & MATHER, 2000; IMBERNON & BRANTHOMME, 2001).

Sin embargo, la robustez y fiabilidad de estos análisis de la fragmentación de los bosques se ve amenazada por la gran sensibilidad que estos índices presentan frente a variaciones en la escala o nivel de detalle de los datos espaciales. En el caso de las imágenes de satélite la escala viene caracterizada por su resolución espacial (o tamaño del píxel), que determina el tamaño del objeto (unidad de bosque) más pequeño que puede discriminarse sobre el terreno.

Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de la resolución espacial en diferentes índices del paisaje (TURNER *et al.*, 1989; BENSON & MACKENZIE 1995; WICKHAM & RIITERS, 1995; FROHN, 1998; SAURA, 2001; WU *et al.*, 2002; SAURA, 2004; WU, 2004), y es conocida la gran sensibilidad de los índices de fragmentación a la resolución espacial (SAURA, 2004). Sin embargo, todavía no se cuenta con los métodos que permitan comparar adecuadamente las estimaciones de fragmentación obtenidas a distintas escalas (SAURA, 2004).

En concreto, BENSON & MACKENZIE (1995) concluyeron que la agregación espacial mediante filtros de mayoría (aplicados a imágenes de satélite ya clasificadas) permitía generar patrones espaciales con el mismo grado de fragmentación que los directamente captados por los sensores remotos a otras resoluciones espaciales, lo que se ha dado por supuesto en muchos de los estudios realizados en este ámbito (TURNER *et al.*, 1989; FROHN, 1998; SAURA, 2001; WU *et al.*, 2002; WU, 2004), que se han basado en fil-

tros estándar (mayoría, media). Sin embargo, SAURA (2004) encontró considerables diferencias entre los valores de los índices de fragmentación obtenidos mediante filtros de mayoría y los obtenidos a partir de los patrones captados directamente por los sensores remotos. SAURA (2004) sugirió la necesidad de incorporar el modo en que realmente los sensores remotos captan la radiación sobre el terreno para mejorar la comparabilidad de las estimaciones de fragmentación a distintas escalas, aunque no proporcionó resultados específicos ni cuantitativos a este respecto, siendo este precisamente el objetivo de la presente investigación.

MÉTODOS

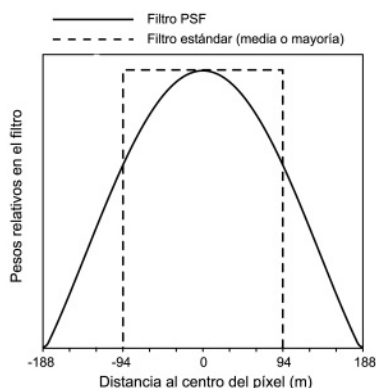
Se seleccionó una zona de estudio en el centro de España (Figura 1) cubierta por dos imágenes de satélite coetáneas captadas por los sensores IRS-WiFS (188 m de resolución espacial) y Landsat-TM (30 m) el 29 de septiembre a las 11:33 y 10:32 respectivamente. Los dos sensores presentan bandas en las longitudes de onda correspondientes al rojo (R) y al infrarrojo cercano (IRC): 620-680 nm (R) y 770-860 nm (IRC) para el sensor WiFS y 630-690 nm (R) y 760-900 nm (IRC) para el sensor TM. Las dos imágenes fueron corregidas geoméricamente al Mapa Forestal de España (escala 1:50.000) con un error cuadrático medio ligeramente inferior a un píxel. Los bosques presentes en la zona de estudio se clasificaron mediante el método de máxima verosimilitud usando las bandas R y



Figura 1. Zona de estudio

IRC y un conjunto de áreas de entrenamiento delimitadas sobre el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (las mismas para las dos imágenes y correspondientes a píxeles puros), resultando una fiabilidad de la clasificación del 96 % para las dos imágenes.

La imagen TM fue agregada (antes de clasificarla) a la resolución WiFS mediante dos filtros diferentes: un filtro de media (filtro estándar) y un filtro basado en la función de respuesta (PSF, "point spread function") del sensor WiFS para replicar con mayor exactitud la manera real en la que los sensores remotos captan la radiación sobre el terreno. Los pesos de este filtro PSF se obtuvieron de la PSF estimada para el sensor WIFS antes del lanzamiento (ELECTRO OPTICAL SYSTEMS GROUP 2002), con un mismo filtro simétrico aplicado a las dos bandas espectrales (R y IRC) (Figura 2). La PSF cuantifica la contribución real de diferentes objetos (tipos de cubierta) a la señal captada por el sensor para un píxel determinado dependiendo de la posición de los mismos sobre el terreno (Figura 2). Las imágenes agregadas resultantes fueron clasificadas con el mismo método y áreas de entrenamiento descritos anteriormente. La comparación de la imagen real captada directamente por el sensor WiFS con las dos obtenidas a esa resolución a partir de la agregación de la imagen TM (filtro de media y filtro PSF) nos permite analizar cuál de los dos filtros es más adecuado para el escalamiento (transferencia a otras escalas) de los patrones de fragmentación de los bosques, y cuáles son los errores correspondientes a cada uno de esos dos tipos de agregación.



Para ello, sobre todos estos datos (bosques clasificados en las imágenes originales y agregadas) se calcularon una serie de índices de fragmentación seleccionados por su importancia o amplio uso dentro del ámbito de la ecología del paisaje (FORMAN, 1995; HAINES-YOUNG Y CHOPPING, 1996; TRANI Y GILES, 1999; SAURA Y MARTÍNEZ-MILLÁN, 2001; SAURA, 2002; SAURA, 2004); varios de ellos están siendo utilizados dentro del Tercer Inventario Forestal Nacional (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2004). Los índices seleccionados son el número de teselas, el tamaño medio de tesela, el tamaño de la tesela más grande (expresado en porcentaje respecto al área total de la zona de estudio), la longitud de bordes, la distancia media a la tesela de bosque más próxima, el índice de división y el índice de cohesión. Una mayor fragmentación viene indicada por valores más altos del número de teselas, la longitud de bordes, la distancia media a la tesela más próxima y el índice de división, y por valores menores del tamaño medio de tesela, el tamaño de la tesela más grande y el índice de cohesión.

RESULTADOS

La mayor parte de los índices de fragmentación son muy sensibles a los cambios en la resolución espacial (Tabla 1), como ya se ha puesto de manifiesto en estudios previos en este ámbito (SAURA, 2004). Por otro lado, las imágenes TM agregadas mediante filtros de media produjeron patrones de los bosques claramente más frag-

Figura 2. Pesos relativos de los filtros (media y PSF) aplicados para agregar la imagen TM a la resolución espacial del sensor IRS-WiFS (188 m)

mentados que los obtenidos directamente de la imagen WiFS, como indican los valores del número de teselas, la longitud de bordes o el tamaño medio de tesela (Tabla 1). La incorporación de la PSF del sensor supuso una gran mejora en la comparabilidad de diversos índices de fragmentación. Los errores relativos de agregación (valor absoluto de la diferencia entre el valor del índice en la imagen WiFS y en la TM agregada a la resolución WiFS, dividido por el valor del índice en la imagen WiFS) se redujeron de media del 13% al 2% (para toda la zona de estudio y para todos los índices considerados) al considerar la agregación PSF en lugar de la agregación estándar (filtro de media). Esta mejora fue mucho mayor para algunos de los índices de fragmentación más utilizados y más sensibles a la resolución especial: los errores de agregación se redujeron del 40% al 5% para el número de teselas, del 24% al 1% para el tamaño medio de tesela, y del 20% al 3% para la longitud de bordes (Tabla 1). Otros índices como el tamaño de la tesela más grande, el índice de cohesión o el índice de división no mostraron mejoras sustanciales en su comparabilidad por la incorporación de la PSF en el proceso de agregación. Estos índices son precisamente los menos sensibles a la resolución especial de todos los considerados (Tabla 1) (SAURA, 2004), y por tanto no requieren de técnicas especialmente sofisticadas para mejorar su comparación entre escalas. Los resultados y conclusiones correspondientes a los filtros de mayoría (agregación después de la clasi-

ficación) no se muestran aquí pero fueron cualitativamente similares a los descritos para los filtros de media, tratándose en los dos casos de filtros estándar que no incorporan las particularidades del proceso de captación de la radiación por parte de los sensores remotos.

CONCLUSIONES

Nuestros resultados sugieren que los filtros estándar (filtros de media o mayoría), que son los que habitualmente están implementados en los sistemas de información geográfica o en los programas de tratamiento de imágenes de satélite, no son plenamente adecuados para transferir entre escalas las estimaciones de fragmentación de los bosques derivadas de imágenes de satélite, al contrario de lo sugerido en estudios anteriores (BENSON & MACKENZIE, 1995).

La limitación de estos filtros estándar a este respecto consiste en que no replican convenientemente el modo en el que los sensores remotos captan realmente la radiación del terreno. La porción del terreno de la que el sensor capta la radiación para un píxel determinado no es un cuadrado perfectamente delimitado; por el contrario, la señal captada por el sensor para un píxel es el resultado de contribuciones que no proceden únicamente del área estrictamente correspondiente en el terreno a ese píxel, sino también de objetos (bosques) situados en los píxeles cercanos (CRACKNELL, 1998; HUANG *et*

Índice	Datos espaciales			
	TM real	WiFS real	TM agregada a WiFS con filtro de media	TM agregada a WiFS con filtro PSF
Número de teselas	129.809	4.341	6.073	4.579
Tamaño medio de tesela (ha)	132,23	355,53	271,61	359,07
Tamaño de la tesela más grande (%)	23,03	25,18	25,56	26,08
Longitud de bordes (km)	141.738	26.194	31.377	26.847
Distancia media a la tesela más próxima (m)	95,97	583,01	543,21	584,23
Índice de división	0,921	0,905	0,904	0,900
Índice de cohesión	99,78	98,92	98,86	98,93

Tabla 1. Valores de los índices de fragmentación para el conjunto de los bosques en la zona de estudio para las imágenes de satélite originales (TM real, WiFS real) y las imágenes TM agregadas a la resolución espacial del sensor WiFS mediante filtros de media y filtros que incorporan la PSF del sensor WiFS (filtro PSF)

al., 2002; SAURA, 2004), como se muestra en la figura 2. Esto introduce un grado adicional de autocorrelación espacial en los patrones de los bosques captados por los sensores remotos que no se genera con dichos filtros estándar. Además, los objetos situados cerca del centro del píxel contribuyen en mayor medida a la respuesta del sensor que los situados en la periferia del mismo (CRACKNELL, 1998; HUANG et al., 2002; SAURA, 2004) (Figura 2). Estas particularidades de la captación de la radiación por el sensor remoto sí que son consideradas en el proceso de agregación al incorporar en el mismo la PSF del sensor, lo que hizo posible la considerable mejora en la comparabilidad entre escalas de los índices de fragmentación de bosques obtenida en este estudio.

Agradecimientos

La Dirección General para la Biodiversidad del Ministerio de Medio Ambiente proporcionó el Mapa Forestal de España. Las imágenes de satélite fueron cedidas por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea. El estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y la Unión Europea (fondos FEDER) a través del proyecto CONEFOR del Plan Nacional de I+D+I (REN2003-01628). Parte del estudio fue desarrollado a través de una beca de colaboración concedida por el Ministerio de Educación a Soledad García Gigorro.

BIBLIOGRAFÍA

- BENSON, B.J. & MACKENZIE, M.D.; 1995. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecol.* 10: 13-120.
- BOGAERT, J.; CEULEMANS, R. & SALVADOR-VAN EYSENRODE, D.; 2004. A decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Env. Manage.* 33: 62-73.
- CRACKNELL, A.P.; 1998. Synergy in remote sensing - what's in a pixel? *Int. J. Rem. Sens.* 19: 2025-2047.
- ELECTRO OPTICAL SYSTEMS GROUP; 2002. *IRS-1D-WIFS estimation of image spread and modulation transfer function of band 3 and 4 camera*. Space Applications Centre (ISRO). Ahmedabad.
- FORMAN, R.T.T.; 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. Cambridge.
- FROHN, R.C.; 1998. *Remote sensing for landscape ecology: new metric indicators for monitoring, modeling and assessment of ecosystems*. CRC-Lewis Publishers. Boca Raton. Florida.
- HAILA, Y.; 1999. Islands and fragments. In: M.L. Hunter (ed.), *Maintaining biodiversity in forest ecosystems: 234-264*. Cambridge University Press. Cambridge.
- HAINES-YOUNG, R. & CHOPPING, M.; 1996. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. *Prog. Phys. Geog.* 20: 418-445.
- HUANG, C.; TOWNSHEND, J.R.G.; LIANG S.; KALLURI, S.N.V. & DEFRIES, R.S.; 2002. Impact of sensor's point spread function on land cover characterization: assessment and deconvolution. *Rem. Sens. Env.* 2002: 203-212.
- IMBERNON, J. & BRANTHOMME, A.; 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *Int. J. Rem. Sens.* 22: 1753-1765.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE; 2004. *Tercer Inventario Forestal Nacional*, Madrid. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid.
- PERALTA, P. & MATHER, P.; 2000. An analysis of deforestation patterns in the extractive reserves of Acre, Amazonia from satellite imagery: a landscape ecological approach. *Int. J. Rem. Sens.* 21: 2555-2570.
- RIITERS, K.H.; COULSTON, J.W. & WICKHAM, J.D.; 2003. Localizing national fragmentation statistics with forest type maps. *J. For.* 101: 18-22.
- ROCHELLE, J.A.; LEHMANN, L.A.; & WISNIEWSKI, J.; 1999. *Forest fragmentation: wildlife and management implications*. Brill Academic Publishers. Leiden.

- SANTOS, T. Y TELLERÍA, J.L.; 1999. *Efectos de la fragmentación de los bosques sobre los vertebrados de las mesetas ibéricas*. Serie Técnica, Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Madrid.
- SAURA, S.; 2001. *Influencia de la escala en la configuración del paisaje: estudio mediante un nuevo método de simulación espacial, imágenes de satélite y cartografías temáticas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- SAURA, S. Y MARTÍNEZ-MILLÁN, J.; 2001. Sensitivity of landscape pattern metrics to map spatial extent. *Photogrammetric. Eng. Rem. Sens.* 67: 1027-1036.
- SAURA, S.; 2002. Effects of minimum mapping unit on land cover data spatial configuration and composition. *Int. J. Rem. Sens.* 23: 4853-4880.
- SAURA, S.; 2004. Effects of remote sensor spatial resolution and data aggregation on selected fragmentation indices. *Landsc. Ecol.* 19(2): 197-209
- SCHUMAKER, N.H.; 1996. Using landscape indices to predict habitat connectivity. *Ecology* 77: 1210-1225.
- SKOLE, D.L., & TUCKER, C.J.; 1993. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazonian: satellite data from 1978 to 1988. *Science* 260: 1905-1910.
- TRANI, M.K., & GILES, R.H.; 1999. An analysis of deforestation: metrics used to describe pattern change. *For. Ecol. Manage.* 114: 459-470.
- TURNER, M.G.; O'NEILL, R.V.; GARDNER, R.H. & MILNE, B.T.; 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landsc. Ecol.* 3: 153-162.
- WICKHAM, J.D. & RIITERS, K.H.; 1995. Sensitivity of landscape metrics to pixel size. *Int. J. Rem. Sens.* 16: 3585-3594.
- WU, J.; SHEN, W.; SUN, W. & TUELLER, P.T.; 2002. Empirical patterns of the effects of changing scale on landscape metrics. *Landsc. Ecol.* 17: 761-782.
- WU, J.; 2004. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landsc. Ecol.* 19: 125-138.