

Tipos funcionales de ecosistemas de la Península Ibérica. Implicaciones para el cambio global y la conservación de la biodiversidad

D. Alcaraz Segura¹, J.M. Paruelo², C. Oyonarte Gutiérrez³, M. Piquer, J. Cabello Piñar⁴

(1) Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería. Carretera de Sacramento s/n. La Cañada de S. Urbano, Almería. E-04120 España.

(2) Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEVA, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín, 4453. Buenos Aires, AR-1417 Argentina

(3) Departamento de Edafología y Química Agrícola, Universidad de Almería. La Cañada, Almería. E-04120 España

(4) Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería. Carretera de Sacramento s/n. La Cañada de S. Urbano, Almería. E-04120 España.

El cambio global, a través de las modificaciones en el clima y en el uso del suelo, afectará de forma importante a la biodiversidad. El ecosistema se revela como una escala adecuada para el estudio de estas transformaciones. En este artículo presentamos los trabajos que actualmente estamos llevando a cabo para documentar los patrones espaciales y temporales en el funcionamiento de los ecosistemas de la Península Ibérica mediante el empleo del Índice Verde Normalizado (NDVI) obtenido a partir de imágenes del satélite NOAA/AVHRR. Utilizamos tres atributos de las curvas estacionales de este índice: la integral anual (NDVI-I), el rango relativo (RREL) y la época en que se alcanza el máximo (MMAX). Encontramos que el NDVI-I decreció gradualmente del NW al SE. Se identificaron dos grandes zonas: una con máximos de verano, baja estacionalidad y alta productividad correspondiente a la Región Eurosiberiana y las principales cadenas montañosas mediterráneas; y el resto del territorio con mayor estacionalidad y productividad y máximos en las otras estaciones del año. Ningún ecosistema fue poco productivo y estable (es decir, muy bajo NDVI-I y muy bajo RREL), y sólo se presentaron situaciones de alta productividad y alta estacionalidad (alto NDVI-I y alto RREL) en Pirineos y Picos de Europa

Cambio global y funcionamiento de ecosistemas

Son ya diversos los trabajos que documentan los efectos del cambio global en la Península Ibérica (Peñuelas, 2001). Estas transformaciones son especialmente notables a nivel de ecosistema (Vitousek, 1994). Por ello, el análisis regional de los efectos del cambio global sobre su estructura y funcionamiento resulta especialmente relevante para evaluar estas afecciones, conectando las ciencias ecológica y atmosférica (Wessman, 1992; IPCC, 2001), así como para identificar aspectos clave para las políticas de conservación y manejo de los recursos naturales (Stork y Samways, 1995). La documentación de los patrones temporales y espaciales del funcionamiento ecosistémico, suministra un contexto adecuado para el entendimiento y la predicción de estas respuestas (Shaver *et al.*, 2000).

En relación con el cambio global, el estudio de los ecosistemas basado en atributos funcionales presenta una serie de ventajas frente a las clásicas aproximaciones estructurales: 1) el intercambio de materia y energía tiene una respuesta a más corto plazo que la estructura de la vegetación, lo que provoca que la inercia en el mantenimiento de ésta frente a las perturbaciones pueda retrasar la percepción de la respuesta de los ecosistemas ante los cambios (Milchunas y Lauenroth, 1995; Myneni *et al.*, 1997; Wiegand *et al.*, en prensa); 2) los atributos funcionales se prestan al seguimiento a través de imágenes de satélite con mayor facilidad que los estructurales (Malingreau, 1986); y 3) permiten estudiar cualitativa y cuantitativamente los servicios que suministran los ecosistemas a los sistemas socioeconómicos de un territorio (Costanza *et al.*, 1997). Tradicionalmente, la definición de unidades estructurales de vegetación potencial ha estado basada en la relación clima-vegetación. Esta correspondencia ha sido poco comprobada empíricamente (Bailey, 1989; Nielson *et al.*, 1992; Prentice, 1992), y ha excluido los ecosistemas antropogénicos, cuya consideración es muy importante para evaluar los

efectos de los cambios ambientales. Así, la clasificación funcional de ecosistemas proporciona una base útil para evaluar cambios ambientales a gran escala en relación con la función del ecosistema (Gitay y Noble, 1997).

Biodiversidad y funcionamiento de ecosistemas

El concepto de biodiversidad con frecuencia se emplea en relación con la preservación de especies y recursos genéticos. Bajo este punto de vista, los argumentos conservacionistas siempre hacen referencia a valores éticos, estéticos, económicos e incluso evolutivos. Sin embargo, también sabemos que la biodiversidad puede ser valorada por los servicios ecosistémicos mencionados. Por ello, el mantenimiento del funcionamiento de los ecosistemas proporciona una razón adicional para conservar la biodiversidad y viceversa.

Para avanzar en la consecución de este objetivo, debemos progresar en: 1) determinar cómo interaccionan la dinámica de la biodiversidad, los procesos ecosistémicos y los factores abióticos (Loreau *et al.*, 2001), y 2) extrapolar a escalas espaciales y temporales mayores los resultados obtenidos sobre la relación biodiversidad-funcionamiento ecosistémico bajo condiciones controladas (Symstad *et al.*, 2003). El concepto de diversidad funcional representa una aproximación válida (Tilman, 2001), basada frecuentemente en la definición de unidades funcionales.

Las unidades funcionales más comúnmente empleadas han sido los tipos funcionales de plantas (PFTs). Este término fue acuñado por Smith *et al.* (1993) y definido como conjuntos de especies que muestran respuestas similares al ambiente que las rodea y efectos similares sobre el funcionamiento del ecosistema (Gitay y Noble, 1997). Los PFTs reducen la complejidad de la diversidad de especies en la función ecológica a unos tipos de plantas clave, agrupando especies con funcionamiento similar independientemente de su filogenia (Díaz, 2001). No obstante, otros trabajos también definen tipos funcionales a niveles inferiores de la biodiversidad (genes, moléculas, etc.) y para otros grupos de organismos (Meyer, 1994; Steneck, 2001).

Son ya varios los autores que han señalado la necesidad de una clasificación funcional a nivel de ecosistema (Körner, 1994; Solbrig, 1991; Valentini *et al.*, 1999; Paruelo *et al.*, 2001). Además, la definición y delimitación de un ecosistema, visto como una unidad funcional, viene ganando importancia práctica para propósitos de manejo e investigación en conservación (Stork y Samways, 1995; Virginia y Wall, 2001). Al igual que los PFTs pueden ser definidos de acuerdo con diferentes dimensiones funcionales (tasas de crecimiento relativo y fijación de nitrógeno, entre otros), los ecosistemas funcionales también pueden ser definidos de acuerdo con los intercambios de energía (por ejemplo, estacionalidad y variabilidad interanual de la fracción de radiación fotosintéticamente activa), agua (por ejemplo, evapotranspiración potencial), nutrientes (por ejemplo, pérdidas de nitrógeno) y carbono (por ejemplo, estacionalidad y variabilidad interanual de la productividad primaria) (Allen y Hoekstra, 1992).

Identificación de tipos funcionales de ecosistemas en la Península Ibérica

Las características de la Península Ibérica la sitúan como un área de interés para llevar a cabo clasificaciones funcionales de los ecosistemas que permitan caracterizar su heterogeneidad funcional a escala regional y evaluar los efectos del cambio global. Tiene una gran diversidad de paisajes gracias a su localización biogeográfica, relieve y características climáticas y geológicas. La Península Ibérica soporta en la actualidad una baja densidad de población y su superficie agrícola ha disminuido considerablemente en las últimas décadas. Existe un gran conocimiento acumulado de la estructura de su vegetación y se han documentado reemplazamientos de biomas bajo el cambio climático actual (Peñuelas y Boada, 2003). Además, es un área de investigación activa en relación con el cambio global y el funcionamiento de ecosistemas (Lloyd, 1989; Lobo *et al.*, 1997; Azzali y Menenti, 1999; Shoshany, 2000; Peñuelas, 2001; Peñuelas y Filella, 2001; Peñuelas *et al.*, 2002; Arribas *et al.*, 2003; Stefanescu *et al.*, 2003; Xoplaki *et al.*, 2003; Paruelo *et al.*, enviado).

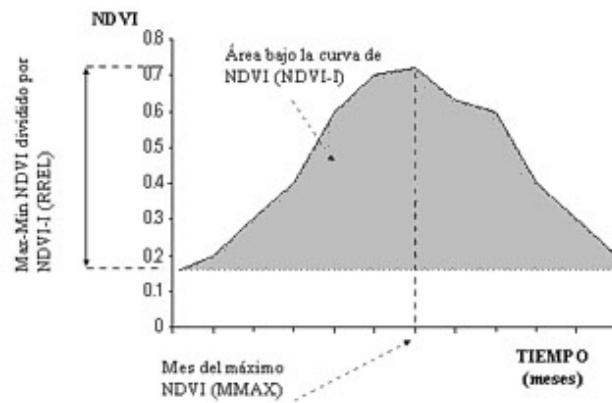


Figura 1- Los tres atributos del NDVI empleados en la clasificación funcional.

En este artículo comentamos los resultados obtenidos en la caracterización de la heterogeneidad funcional de la Península Ibérica mediante la identificación de sus Tipos Funcionales de Ecosistemas (EFTs) (Alcaraz *et al.*, en redacción). Para ello, partimos de los trabajos desarrollados en el Cono Sur (Paruelo *et al.*, 1998; Paruelo *et al.*, 2001) que identifican y clasifican EFTs a partir de imágenes NOAA, de acuerdo con tres atributos de las curvas estacionales del Índice Verde Normalizado (NDVI): la integral anual (NDVI-I), el rango relativo (RREL) y la época en que se alcanza el máximo (MMAX) (**Fig. 1**). Estos atributos representan aspectos fundamentales de la dinámica ecosistémica ya que, mientras que el NDVI-I es un estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (Sellers *et al.*, 1992) y, por tanto, de la producción primaria (Tucker *et al.*, 1985), el RREL y el MMAX recogen las principales características de la dinámica estacional del carbono (Paruelo y Lauenroth, 1998).

La identificación de EFTs se realizó a partir de estos tres atributos obtenidos para 18 años de imágenes, desarrollando un método fijo de clasificación. Los rangos de variación de los tres atributos fueron divididos en 4 intervalos cuyas fronteras se situaron en aquellos píxeles con máxima tasa de cambio espacial. De esta forma, se recogen los patrones observados en los tres atributos, se maximiza la interpretabilidad biológica de la clasificación y se permite su repetición en el tiempo. Ello posibilita el seguimiento de posibles efectos del cambio global sobre el funcionamiento.

Encontramos que el NDVI-I decreció gradualmente del NW al SE. Los valores más altos se alcanzaron en la Región Eurosiberiana y en las partes más altas de las montañas mediterráneas. La Mancha y las depresiones de los ríos Ebro, Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir presentaron valores bajos, si bien los mínimos se alcanzaron en el SE. En general, el RREL, un indicador de la estacionalidad, fue bajo para la Región Eurosiberiana y las montañas mediterráneas y alto en las cimas de Pirineos y Picos de Europa, alcanzando su máximo en las depresiones de los ríos, llanuras interiores, humedales y en el SE. El máximo de actividad (MMAX) se alcanzó en verano en los ecosistemas eurosiberianos y las partes altas de las montañas mediterráneas, los humedales y las áreas con aportes externos de agua (riberas y regadíos). Las montañas mediterráneas tuvieron picos de otoño-invierno, mientras que las zonas semiáridas, las depresiones y las llanuras y hoyas continentales tuvieron picos de primavera.

Respecto a la clasificación, no todas las clases posibles (4x4x4) (**Fig. 2**) estuvieron representadas. No aparecieron ecosistemas con extremos bajos o altos de NDVI-I y RREL a la vez. Se identificaron dos grandes zonas: una con máximos de verano, baja estacionalidad y alta productividad correspondiente a la Región Eurosiberiana y las principales cadenas montañosas mediterráneas; y otra con mayor estacionalidad y productividad y máximos en las otras estaciones del año, para el resto del territorio. No hubo ningún ecosistema poco productivo que fuera estable (es decir, muy bajo NDVI-I y muy bajo RREL), mostrando la productividad y la estabilidad una relación inversa, y sólo se presentaron situaciones de alta productividad y alta estacionalidad (alto NDVI-I y alto RREL) en Pirineos y Picos de Europa.

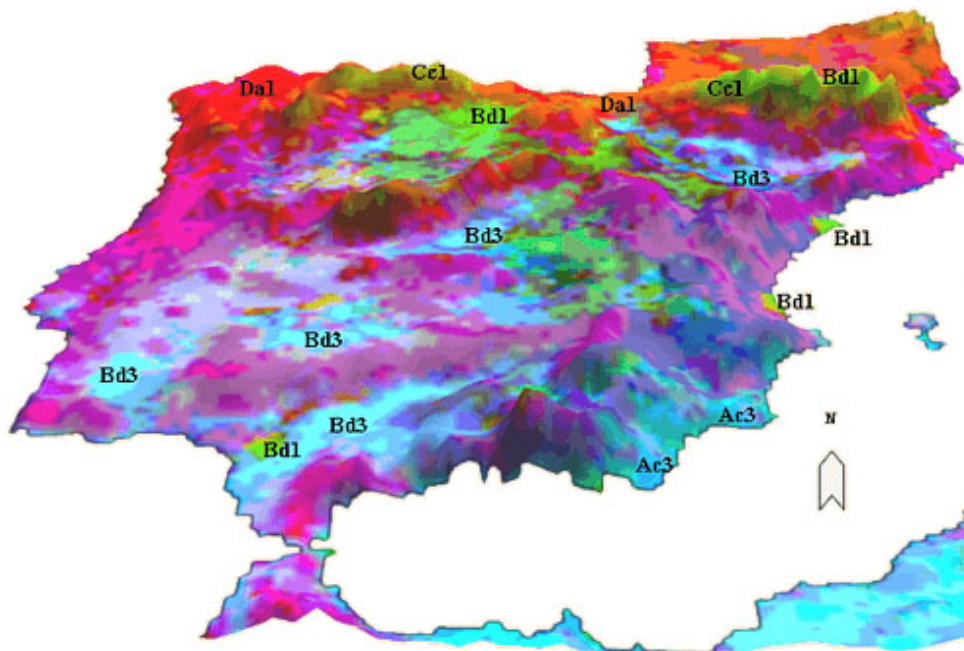


Figura 2.- Tipos Funcionales de Ecosistemas de la Península Ibérica (EFT). Cada color refleja un EFT, habiendo 53 en total. Se han denominado con un código de dos letras y un número. La primera letra corresponde al NDVI-I y su valor aumenta desde 'A' hasta 'D'. La segunda representa al RREL, y su valor aumenta desde 'a' hasta 'd'. El número hace referencia a la estación con máximo NDVI (1-Verano; 2-Otoño e Invierno temprano; 3-Invierno tardío y Primavera temprana; 4-Primavera tardía). Se señalan sólo algunos ejemplos.

Referencias

- Alcaraz, D., Paruelo, J.M., y Cabello, J. (En redacción). Current distribution of Ecosystem Functional Types in the Iberian Peninsula.
- Allen, T.F.H. y Hoekstra, T.W. 1992. *Toward a Unified Ecology*. Columbia University Press, New York, USA.
- Arribas, A., Gallardo, C., Gaertner, M.A., y Castro, M. 2003. Sensitivity of the Iberian Peninsula climate to a land degradation. *Climate Dynamics* 20: 477-489.
- Azzali, S. y Menenti, M. 1999. Mapping isogrowth zones on continental scale using temporal Fourier analysis of AVHRR-NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 1: 9-20.
- Bailey, R.G. 1989. Explanatory supplement to ecoregions map of the continents. *Environmental Conservation* 16: 307-309.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., y Paruelo, J. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Díaz, S. 2001. Ecosystem function measurement, terrestrial communities. En *Encyclopedia of Biodiversity* (ed. Levin, S.A.), pp. 321-344, Academic Press, San Diego, USA.
- Gitay, H. y Noble, I.R. 1997. What are functional types and how should we seek them? En *Plant Functional Types. Their relevance to ecosystem properties and global change* (eds. Smith, T.M., Shugart, H.H., y Woodward, F.I.), pp. 3-19, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of Working Group I*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Körner, Ch. 1994. Scaling from species to vegetation: the usefulness of functional groups. En *Biodiversity and Ecosystem Function* (eds. Schulze, E.-D. y Mooney, H.A.), pp. 117-139, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

- Lloyd, D. 1989. A Phenological description of Iberian vegetation using short wave vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing* 10: 827-833.
- Lobo, A., Ibáñez, J.J., y Carrera, C. 1997. Regional scale hierarchical classification of temporal series of AVHRR vegetation index. *International Journal of Remote Sensing* 18: 3167-3193.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J.P., Hector, A., Hooper, D.U., Huston, M.A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D., y Wardle, D.A. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science* 294: 804-808.
- Malingreau, J.P. 1986. Global vegetation dynamics, satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1121-1146.
- Meyer, O. 1994. Functional groups of microorganisms. En *Biodiversity and ecosystem function* (eds. Schulze, E.-D. y Mooney, H.A.), pp. 67-96, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Milchunas, D.G. y Lauenroth, W.K. 1995. Inertia in plant community structure: State changes after cessation of nutrient enrichment stress. *Ecological Applications* 5: 1195-2005.
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., y Nemani, R.R. 1997. Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- Nielson, R.P., King, G.A., y Koerper, G. 1992. Toward a rule-based biome model. *Landscape Ecology* 7: 27-43.
- Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., y Sala, O.E. 1998. Biozones of Patagonia (Argentina). *Ecología Austral* 8: 145-153.
- Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G., y Sala, O.E. 2001. Current distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate S America. *Ecosystems* 4: 683-698.
- Paruelo, J.M. y Lauenroth, W.K. 1998. Interannual variability of NDVI and their relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25: 721-733.
- Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz, D., Cabello, J., y Escribano, P. (Enviado). Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas of South-eastern Spain. *Applied Vegetation Science*.
- Peñuelas, J. 2001. Cambios atmosféricos y climáticos y sus consecuencias sobre el funcionamiento y la estructura de los ecosistemas terrestres mediterráneos. En *Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional*. (eds. Zamora, R. y Pugnaire, F.I.), pp. 423-455, CSIC-AEET, Granada.
- Peñuelas, J. y Boada, M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9: 131-140.
- Peñuelas, J. y Filella, I. 2001. Responses to a warming world. *Science* 294: 793-794.
- Peñuelas, J., Filella, I., y Comas, P. 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in Mediterranean region. *Global Change Biology* 8: 531-544.
- Prentice, I.C. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* 19: 117-134.
- Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B., y Hall, F.G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment* 42: 187-216.
- Shaver, G.R., Canadell, J., Chapin III, F.S., Gurevitch, J., Harte, J., Henry, G., Ineson, P., Jonasson, S., Melillo, J.M., Pitelka, L., y Rustad, L. 2000. Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. *BioScience* 50: 871-882.

- Shoshany, M. 2000. Satellite remote sensing of natural Mediterranean vegetation: a review within an ecological context. *Progress in Physical Geography* 24: 153-178.
- Shugart, H.H. 1997. Plant and Ecosystem Functional Types. En *Plant Functional Types. Their relevance to ecosystem properties and global change* (eds. Smith, T.M., Shugart, H.H., y Woodward, F.I.), pp. 20-45, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Smith, T.M., Shugart, H.H., Woodward, F.I., y Burton, P.J. 1993. Plant functional types. En *Vegetation Dynamics and Global Change* (eds. Solomon, A.M. y Shugart, H.H.), pp. 272-292, Chapman & Hall, New York, USA.
- Solbrig, O.T. 1991. *From genes to ecosystems: a research agenda for biodiversity*. IUBS-SCOPE-UNESCO, Paris, France.
- Stefanescu, C., Peñuelas, J., y Filella, I. 2003. Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology* 9: 1494-1506.
- Steneck, R.S. 2001. Functional groups. En *Encyclopedia of Biodiversity* (ed. Levin, S.A.), pp. 121-139, Academic Press, San Diego, USA.
- Stork, N.E. y Samways, M.J. 1995. Inventorying and Monitoring. En *Global Biodiversity Assessment* (ed. Heywood, V.H.), pp. 453-544, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Symstad, A.J., Chapin III, F.S., Wall, D.H., Gross, K.L., Huenneke, L.F., Mittelbach, G.G., Peters, D.P.C., y Tilman, D. 2003. Long-Term and Large-Scale Perspectives on the Relationship between Biodiversity and Ecosystem Functioning. *BioScience* 53: 89-98.
- Tilman, D. 2001. Functional diversity. En *Encyclopedia of Biodiversity* (ed. Levin, S.A.), pp. 109-120, Academic Press, San Diego, USA.
- Tucker, C.J., Townshend, J.R., y Goff, T.E. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science* 227: 369-375.
- Valentini, R., Baldocchi, D.D., y Tenhunen, J.D. 1999. Ecological controls on land-surface atmospheric interactions. En *Integrating hydrology, ecosystem dynamics and biogeochemistry in complex landscapes* (eds. Tenhunen, J.D. y Kabat, P.), pp. 105-116, John Wiley & Sons, Berlin, Germany.
- Virginia, R.A. y Wall, D.H. 2001. Ecosystem function, principles of. En *Encyclopedia of Biodiversity* (ed. Levin, S.A.), pp. 345-352, Academic Press, San Diego, USA.
- Vitousek, P.M. 1994. Beyond Global Warming: Ecology and Global Change. *Ecology* 75: 1861-1876.
- Wessman, C.A. 1992. Spatial scales and global change: bridging the gap from plots to GCM grid cells. *Annual Review of Ecology & Systematics* 23: 175-200.
- Wiegand, T., Snyman, H.A., Kellner, K., y Paruelo, J.M. (En prensa). Do grasslands have a memory: modelling phytomass production of a semiarid South African grassland. *Ecosystems*.
- Xoplaki, E., González-Rouco, J.F., Luterbacher, J., y Wanner, H. 2003. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Climate Dynamics* 20: 723-739.