

Ambientes terrestres de España, una propuesta de clasificación territorial dirigida a facilitar el análisis y la gestión de la biodiversidad

D. Galicia ¹, J. Hervás ¹, R. Martínez ², J. Seoane ³, R. Hidalgo ⁴

(1) Gerencia de Gestión Ambiental y Biodiversidad, Tragsatec. Julián Camarillo 6B. 28037 Madrid. España

(2) Gerencia de Control Ambiental y Alimentario, Tragsatec. Julián Camarillo 6A. 28037 Madrid. España

(3) Departamento Interuniversitario de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid. España

(4) Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino

➤ Recibido el 5 de marzo de 2010, aceptado el 4 de septiembre de 2010.

Galicia, D., Hervás, J., Martínez, R., Seoane, J., Hidalgo, R. (2010). Ambientes terrestres de España, una propuesta de clasificación territorial dirigida a facilitar el análisis y la gestión de la biodiversidad. *Ecosistemas* 19(3):52-65.

Se presenta una clasificación territorial que utiliza una aproximación estadística para la identificación de áreas con similares condiciones ecológicas a diferentes escalas, independientemente de su posición geográfica dentro de España. Asimismo, se estiman las relaciones entre los ambientes reconocidos según la disimilitud existente entre ellos. Dicha clasificación se sustenta en un conjunto reducido de factores determinantes de la distribución geográfica de los ecosistemas naturales. La resolución adoptada es de 1 km². Los 90 estratos resultantes (68 en la España peninsular y Baleares, 22 en Canarias) pueden ser agregados jerárquicamente dependiendo del nivel de generalización que se precise.

Aunque construida en primera instancia como un marco espacial de referencia para el desarrollo de la red Natura 2000, en su concepción y desarrollo se tuvo en cuenta que pudiera ser útil para un rango amplio de aplicaciones, incluyendo la estratificación de muestreos biológicos y la gestión del territorio a un nivel nacional o peninsular.

Palabras clave: Clasificación ecológica del territorio, Clasificación jerárquica, Cluster, Estratificación ambiental, Gradiente ambiental

Galicia, D., Hervás, J., Martínez, R., Seoane, J., Hidalgo, R. (2010). Land environments of Spain, a proposal of land classification aimed at facilitating the analysis and management of biodiversity. *Ecosistemas* 19(3):52-65.

The complex pattern and relationships of Spanish natural environments are revealed by a land classification that is constructed using a statistical procedure for identifying similar environmental areas, regardless of their geographic location across the country. Rather than treating all environments as equally different, the dissimilarity between them is also quantified. This classification is based on a comprehensive set of variables that strongly influence geographic variation in biotic patterns. The resolution is 1 km². The resulting 90 strata (68 in Iberian-Balearic Spain, 22 in the Canary Islands) can be aggregated hierarchically depending on the level of generalization that is required.

Although it was primarily constructed as a spatial reference framework for the development of the Natura 2000 network, this classification was conceived as a nationally consistent tool for monitoring, reporting and management of a range of issues, including biodiversity and land uses.

Keywords: Clustering, Ecological land classification, Environmental gradient, Environmental stratification, Hierarchical classification

Introducción

La gestión del medio ambiente se aborda cada vez con mayor unanimidad desde una perspectiva integradora (CDB, 2008). Desde esta perspectiva, la identificación y clasificación de unidades geográficas dotadas de significado ecológico —aquellas capaces de reflejar la concurrencia e interacción de varios componentes del ambiente— constituye una tarea esencial, pues proporciona el necesario marco espacial donde apoyar dicha gestión (González Bernáldez, 1982).

Actualmente, se cuenta con numerosas experiencias de clasificación territorial de base ecológica (o que pueden entenderse como tales) en distintas partes del mundo y a diferentes escalas (p.e., Holdridge, 1947; Walter y Box, 1976; Ecoregions Working Group, 1989; Klijn et al., 1995; Elena-Rosselló, 1997; Montes et al., 1998; Fairbanks y Benn, 2000; Olson et al., 2001; Leathwick et al., 2003; Metzger et al., 2005). En España, a partir de la publicación de la obra de Willkomm sobre las estepas ibéricas (Willkomm, 1852), de orientación académica, y la aparición de las “Reseñas” publicadas por la Junta General de Estadística (Coello et al., 1859), de orientación aplicada, se han sucedido propuestas de regionalización nacional o peninsular de base esencialmente natural (Casals, 1998). Constituyen ejemplos en esta sucesión las clásicas síntesis paisajísticas de Dantín Cereceda (1922) y Hernández-Pacheco (1955-1956), la sectorización biogeográfica de Rivas-Martínez et al. (2002a), la tipología bioclimática de Allué (1990), el Mapa de series de vegetación de España (Rivas-Martínez, 1987), el Mapa de paisajes vegetales potenciales (Sainz et al., 2009), la clasificación biogeoclimática del grupo de Elena-Rosselló (1997) y la clasificación de ecosistemas basada en atributos funcionales de Alcaraz et al. (2006).

La mayor parte de las experiencias mencionadas están basadas en la interpretación y el juicio personal de sus autores, lo que supone un inconveniente para su actualización, reproducibilidad y uso en el diseño de muestreos objetivos. Además, su resolución real es muchas veces escasa para el análisis y la gestión de la biodiversidad a escala nacional.

La clasificación territorial que se describe aquí utiliza una aproximación estadística para la definición de clases, se basa en un conjunto reducido de factores directamente responsables de las pautas ambientales con las que se estructura el territorio, e identifica áreas que poseen condiciones ecológicas similares a diferentes escalas, independientemente de su posición geográfica dentro de España. Las unidades básicas de la clasificación son celdas de 1 km². Por otro lado, intenta aprovechar la creciente capacidad de análisis de los ordenadores, la disponibilidad de nuevas bases de datos y el continuo avance en los campos de la modelización matemática y de los Sistemas de Información Geográfica.

Este modelo territorial fue construido en primera instancia como un marco espacial de referencia actualizado, objetivo y homogéneo para el desarrollo de la red Natura 2000; pero por su carácter explícito, flexibilidad y resolución pretende ser adecuado para la estratificación objetiva de muestreos biológicos y como base científica para la gestión del territorio a un nivel nacional o peninsular.

Metodología

Los pasos metodológicos seguidos en esta aproximación fueron los siguientes:

- Selección de variables
- Análisis de correlación y transformación de las variables seleccionadas
- Clasificación no jerárquica (de las celdas de 1 km²): identificación de ambientes
- Clasificación jerárquica (de los ambientes): relaciones entre ambientes

Esta metodología se aplicó independientemente a España peninsular-Baleares y a Canarias.

Las celdas con una proporción de mar o de territorio extranjero y Ceuta y Melilla, que habían sido excluidas para la modelización de las variables climáticas, no se incluyeron en los análisis.

Selección de variables

La selección de las variables se apoyó en las siguientes consideraciones fundamentales:

- Es posible identificar ciertos factores que son directamente responsables de las pautas ambientales en las que se estructura el territorio a una escala determinada. A escalas pequeñas o groseras se imponen los factores abióticos, mientras que a escalas grandes o finas son también significativos los factores bióticos (Bailey, 1987; Klijn y Udo de Haes, 1994).
- La elección de variables que mantengan la mayor independencia posible entre ellas facilita la interpretación de los resultados y evita posibles problemas de colinearidad (Griffith y Amerhein, 1997).

- Las variables más estables en el tiempo son preferibles frente a las menos estables. Esta preferencia se justifica por la perdurabilidad del resultado y porque permite identificar ecosistemas con independencia del grado de perturbación que afecta a sus componentes menos estables, por ejemplo, la vegetación (Bailey, 2005).
- Comprendiendo las razones por las que se distribuye la vegetación se tiene la clave para predecir y entender un amplio rango de respuestas ecológicas a grandes escalas (Ostendorf et al., 2000).

Teniendo en cuenta el fundamento teórico anterior y una aplicación de ámbito nacional o peninsular, se consideró que la clasificación del territorio debía plantearse sobre factores abióticos, esencialmente climáticos y geológicos, eligiendo dentro de ellos los que se sabe que mantienen una estrecha relación con los procesos fisiológicos principales y la distribución de las especies y comunidades vegetales.

Clima: Las variables climáticas seleccionadas (**Tabla 1**) fueron modelizadas con resolución de 1 km² por el Instituto Nacional de Meteorología, según el método propuesto por Ninyerola et al. (2000). Los datos de partida son los registrados entre los años 1971 y 2000 por las estaciones meteorológicas repartidas por el territorio español.

Las temperaturas medias del mes más frío y del mes más cálido sustituyen a las medias de las mínimas del mes más frío y de las máximas del mes más cálido, seleccionadas originalmente, al no haber sido modelizadas para la totalidad del territorio.

Las variables climáticas seleccionadas para España peninsular-Baleares y Canarias fueron las mismas (**Tabla 1**).

Temperatura media anual (TMA)
Temperatura media del mes más frío (TMF)
Temperatura media del mes más cálido (TMC)
Precipitación total anual (= Precipitación anual media) (PTA)
Precipitación total de verano (junio, julio, agosto) (PTV)
Precipitación total de primavera (marzo, abril, mayo) (PTP)
Precipitación total de invierno (diciembre, enero, febrero) (PTI)
Aridez (medida como el cociente entre la Precipitación total anual y la Evapotranspiración potencial) (P/ETP)
Radiación solar media anual (R)
Continentalidad (Índice de Gorczynski ¹) (C)
Litología (L) (sólo España peninsular e islas Baleares)
Pendiente (p) (sólo Islas Canarias)

¹ $C = (1,7A / \text{sen } L) - 20,4$; donde A es la amplitud térmica anual (diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la del mes más frío) y L es la latitud (Gorczynski 1920)

Tabla 1. Variables seleccionadas para el análisis.

Suelo y geología: Ante la imposibilidad de obtener datos adecuados de variables edáficas relevantes (capacidad de retención de agua, pH, contenido de determinados nutrientes), se buscaron estimadores indirectos en la geología. Finalmente, se reclasificó el mapa litológico 1:500.000 de Oriol Riba y colaboradores (Riba et al., 1969) en cinco clases litológicas como valores posibles de la variable Litología (L): rocas calcáreas (RC), rocas silíceas ácidas (RSA), rocas silíceas básicas (RSB), sedimentos calcáreos y evaporíticos (SC) y sedimentos silíceos (SS). Cuando en una misma celda coincidían varias litologías, se eligió la que ocupaba mayor superficie. Estas clases no se tuvieron en cuenta en las Islas Canarias, por considerarse que la naturaleza silícea, calcárea, ácida o básica del sustrato tiene escasa repercusión biológica en dicho territorio.

Topografía: Entre las variables que describen la topografía, la pendiente (p) es de los estimadores más simples, descriptivos y significativos (Dikau, 1990; Abbate, et al., 2006). Se consideró de cierta importancia en los territorios con mayores desniveles (Canarias), principalmente por su influencia en la capacidad de retención de agua del suelo. Fue estimada a partir de la altitud en un modelo digital del terreno de 100 m de resolución (Instituto Geográfico Nacional), tomando el valor medio para cada celda de 1 km².

Análisis de correlación y transformación de las variables seleccionadas

Para eliminar el efecto negativo de la redundancia debida a correlaciones elevadas entre variables, se desechó una de cada par cuya correlación de Pearson (r) superaba el valor de 0,9. En la decisión sobre qué variable desechar, se tuvieron en cuenta las correlaciones del par de variables con el resto. Por otra parte, para evitar que las variables con un rango de variabilidad mayor pudieran definir disimilitudes más grandes entre las celdas que se comparan (véase el siguiente apartado), dichas variables se estandarizaron a media 0 y desviación típica 1.

Las cinco clases litológicas consideradas sirvieron para extraer dos variables ordinales informativas del grado de consistencia de la roca y del pH (acidez), según se especifica en la **Tabla 2**. Estas dos variables ordinales se sintetizaron después mediante un escalado multidimensional métrico. Las coordenadas de las clases litológicas en el plano del escalado definen un gradiente que sitúa, en un extremo, a los sustratos de consistencia baja y pH alto (Sedimentos calcáreos y evaporíticos) y, en el extremo opuesto, a los sustratos de pH bajo y consistencia alta (Rocas silíceas ácidas). Estas coordenadas se tomaron como una nueva variable continua que fue estandarizada como el resto de las variables.

	Consistencia	pH	Valor std
Rocas silíceas ácidas (RSA)	Alta (3)	Bajo (3)	-1.2649
Rocas silíceas básicas (RSB)	Alta (3)	Medio (2)	-0.6325
Sedimentos silíceos (SS)	Baja (1)	Bajo (3)	0.0000
Rocas calcáreas (RC)	Media (2)	Alto (1)	0.6325
Sedimentos calcáreos y evaporíticos (SC)	Baja (1)	Alto (1)	1.2649

Tabla 2. Valores ordinales de consistencia y pH asignados a las clases litológicas. Se indica también el valor de la variable sintética que resume ambos y que resulta de su escalado multidimensional métrico y posterior estandarización (Valor std).

Clasificación no jerárquica (de las celdas de 1 km²): identificación de ambientes

Las celdas de 1 km² se agruparon según su disimilitud, calculada como la distancia euclídea entre los valores de las variables analizadas (Legendre y Legendre, 1998). El algoritmo de clasificación que se utilizó es el de medioides, ejecutado en el entorno R (función *pam* de la librería *cluster*, R Development Core Team, 2005; Maechler et al., 2005). Este algoritmo divide las muestras en k grupos en torno a un número de muestras representativas denominadas medioides (situadas en el centro geométrico del hipervolumen que comprende todas las muestras del grupo). Frente a las clasificaciones basadas en medias (método conocido como *k-medias*), las basadas en medioides son menos sensibles a la existencia de unidades con valores muy extremos de sus variables (Kaufman y Rousseeuw, 1990).

Las clasificaciones no jerárquicas dividen los datos en un número de grupos (k) que debe ser dado a priori por el usuario. Existen distintas aproximaciones empíricas para determinar el número óptimo de grupos. La estrategia empleada en este trabajo estuvo determinada principalmente por las limitaciones computacionales derivadas de tratar con un gran volumen de datos. En primer lugar, se hizo un remuestreo sistemático de la matriz de entrada (formada por los valores que en cada celda toman las variables descriptoras), seleccionando una cuadrícula de cada 49 en secuencia regular para conseguir así cubrir el área de estudio. Esta matriz reducida se sometió a distintas particiones no jerárquicas, probando en cada una un conjunto de entre 20 y 100 grupos. El número óptimo de grupos se determinó comparando los valores del coeficiente de silueta, el cual mide el grado de coherencia general de cada agrupamiento (Kaufman y Rousseeuw, 1990). Seguidamente, se llevó a cabo un segundo proceso de remuestreo, esta vez aleatorio, tras el que se realizó un agrupamiento no jerárquico en el número óptimo de grupos definido en el paso anterior. Para reducir la incertidumbre debida a este proceso de remuestreo y selección aleatoria de datos, se repitió dicho procedimiento veinte veces.

Con este protocolo se consiguen agrupar las celdas seleccionadas (1 de cada 49) en tantos grupos como casos ejemplares (medioides) se hayan exigido. El resto de las cuadrículas originales se asignaron a aquel caso del que distaba menos.

Clasificación jerárquica (de los ambientes): relaciones entre ambientes

El grado de similitud entre los grupos definidos mediante el procedimiento anterior, se estimó realizando una clasificación jerárquica de los medioides o casos ejemplares con la técnica de vecino más lejano o vínculo completo (Legendre y Legendre, 1998). Esta técnica incrementa el contraste entre los distintos grupos al imponer una estructura en los datos de entrada, circunstancia que se adecuaba a nuestros propósitos. El resultado se representó en forma de dendrograma.

Resultados

Análisis de correlación de las variables seleccionadas

La matriz de correlación para las variables seleccionadas en la Península Ibérica-Baleares y en Canarias se muestra en la **Tabla 3**. Para evitar el efecto negativo de correlaciones demasiado elevadas ($|r| \geq 0,9$), en los sucesivos análisis de clasificación se excluyeron las variables TMA, PTA, PTP (España peninsular-Baleares y Canarias) y PTI (Canarias).

	C	P/ETP	PTA	PTI	PTP	PTV	R	TMA	TMF	TMC	p
C	1.00	-0,43	-0,47	-0,51	-0,43	-0,10	-0,11	0,83	0,89	0,58	-0,36
P/ETP	0,75	1.00	0,99	0,98	0,98	0,80	-0,39	-0,68	-0,65	-0,72	0,53
PTA	0,69	0,98	1.00	0,99	0,99	0,80	-0,31	-0,72	-0,69	-0,76	0,53
PTI	0,60	0,86	0,93	1.00	0,97	0,74	-0,33	-0,74	-0,71	-0,75	0,55
PTP	0,67	0,98	0,98	0,87	1.00	0,83	-0,30	-0,70	-0,66	-0,74	0,52
PTV	0,56	0,76	0,70	0,40	0,76	1.00	-0,21	-0,43	-0,38	-0,57	0,34
R	-0,70	-0,77	-0,67	-0,47	-0,71	-0,76	1.00	-0,14	-0,14	-0,15	-0,27
TMA	-0,32	-0,54	-0,46	-0,24	-0,53	-0,72	0,64	1.00	0,99	0,93	-0,40
TMF	0,03	-0,28	-0,21	0,00	-0,29	-0,57	0,45	0,93	1.00	0,89	-0,39
TMC	-0,70	-0,74	-0,66	-0,45	-0,70	-0,79	0,79	0,90	0,69	1.00	-0,35
p	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00

Tabla 3. Matriz de correlación entre las variables cuantitativas analizadas para España peninsular-Baleares (abajo-izquierda) y Canarias (arriba-derecha). En negrita, valores de $r \geq 0,9$. Véase la Tabla 1 para el significado de los acrónimos.

Clasificación no jerárquica: identificación de ambientes

En la **Figura 1** se muestra el resultado de la clasificación no jerárquica de las celdas de 1 km^2 , con $k = 68$ como número óptimo de grupos para la península Ibérica-Baleares y $k=22$ como número óptimo de grupos para Canarias. El número óptimo de grupos resultó ser muy estable entre los distintos remuestreos que se practicaron.

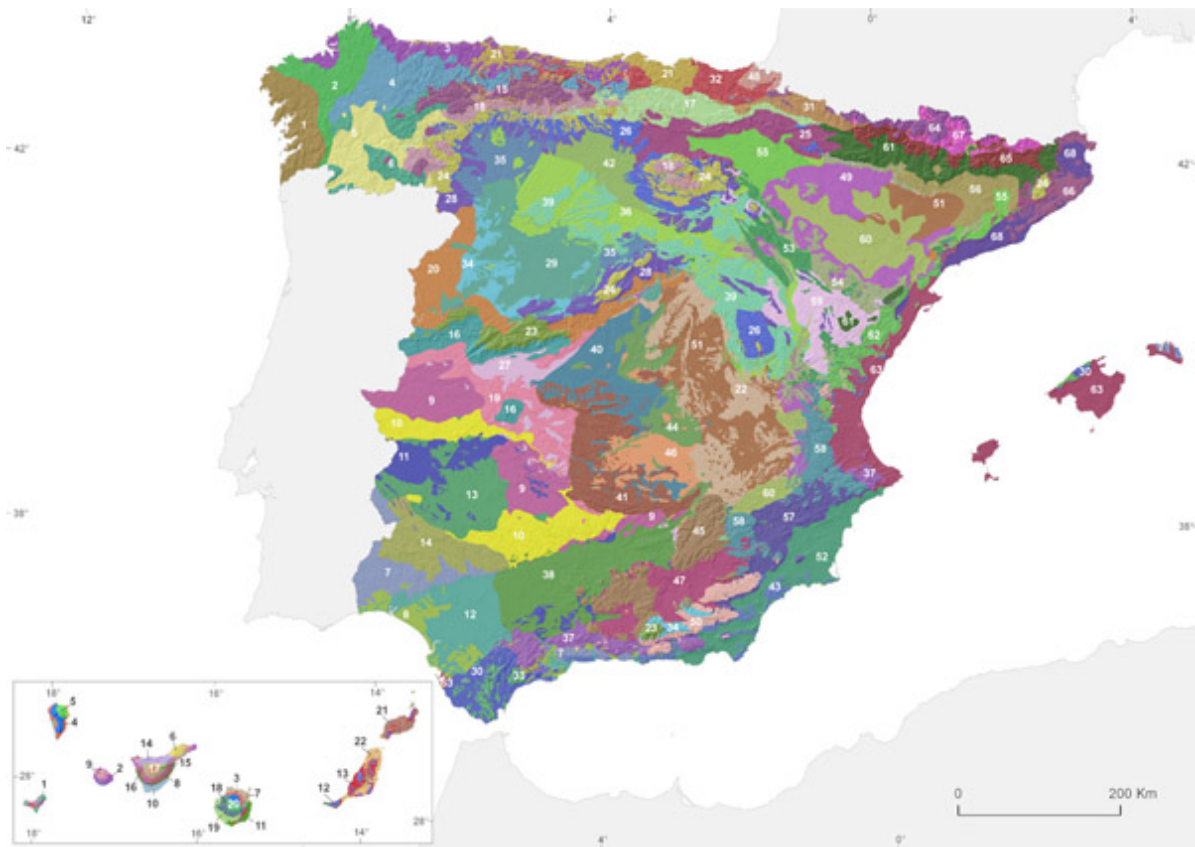


Figura 1. Ambientes terrestres de España obtenidos a partir de la clasificación no jerárquica de las celdas de 1x1 km.

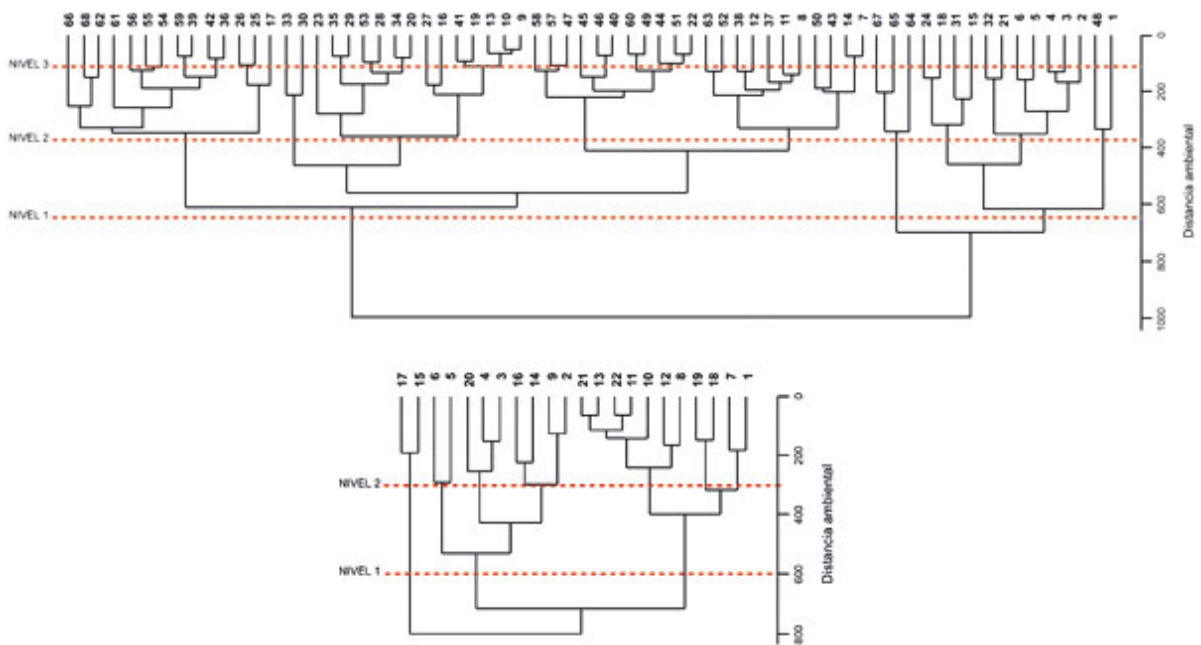


Figura 2. Relaciones entre los 68 ambientes identificados en España peninsular y Baleares (arriba), y los 22 identificados en Canarias (abajo). En rojo se indican los niveles de clasificación representados en las figuras 3 a 6.

Clasificación jerárquica: relaciones entre ambientes

Los dendrogramas de la **Figura 2** representan las relaciones estimadas entre los ambientes identificados anteriormente. La jerarquía de estas relaciones permite explorar distintos niveles de división del territorio desde el punto de vista ambiental, en función de la utilidad que se le quiera dar a la clasificación. En las **Figuras 3 a 6** se exhiben tres de estos niveles para la España peninsular-Baleares y dos para las islas Canarias.

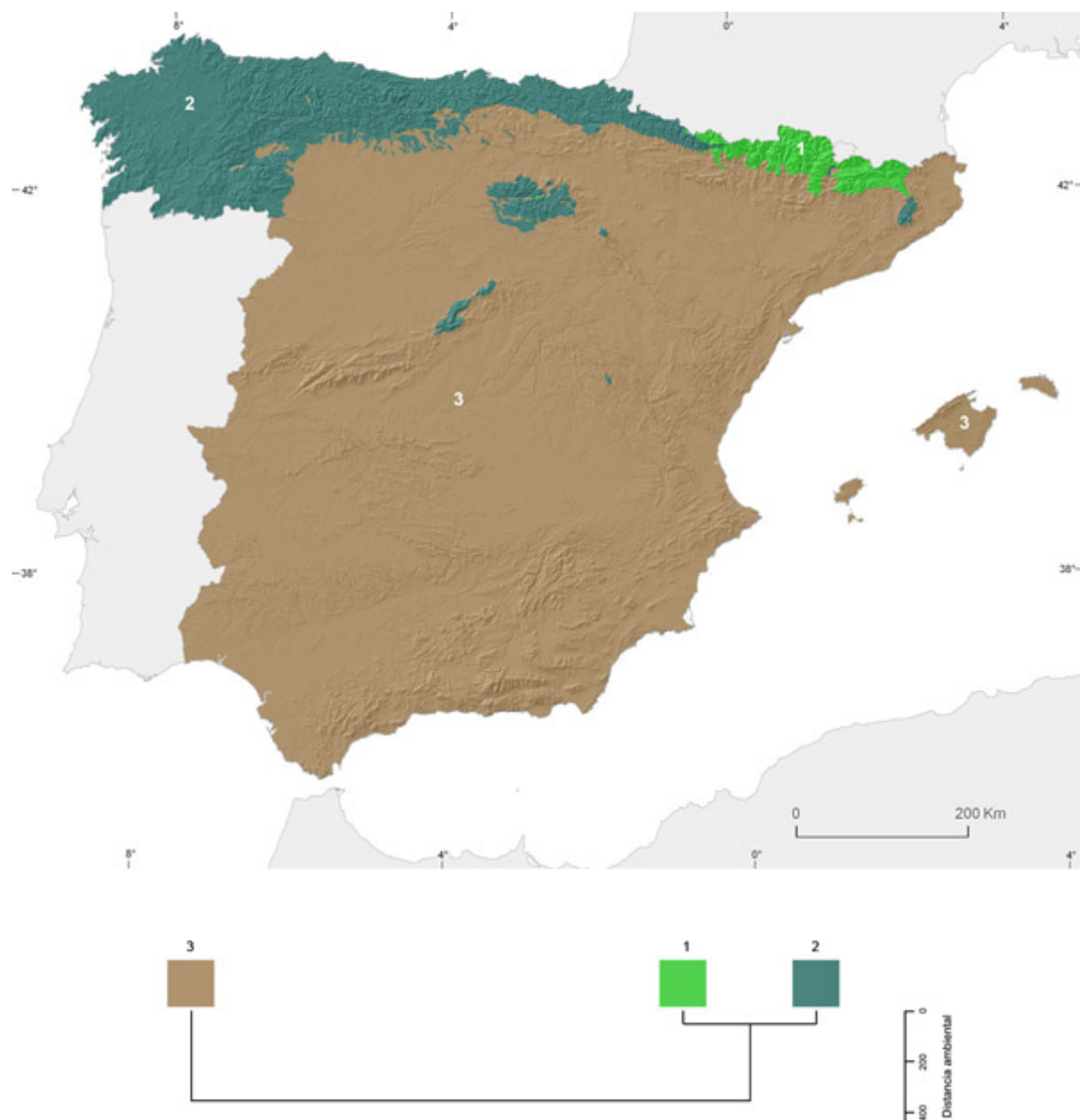


Figura 3. Ambientes terrestres de España peninsular y Baleares en el nivel 1 de la clasificación.

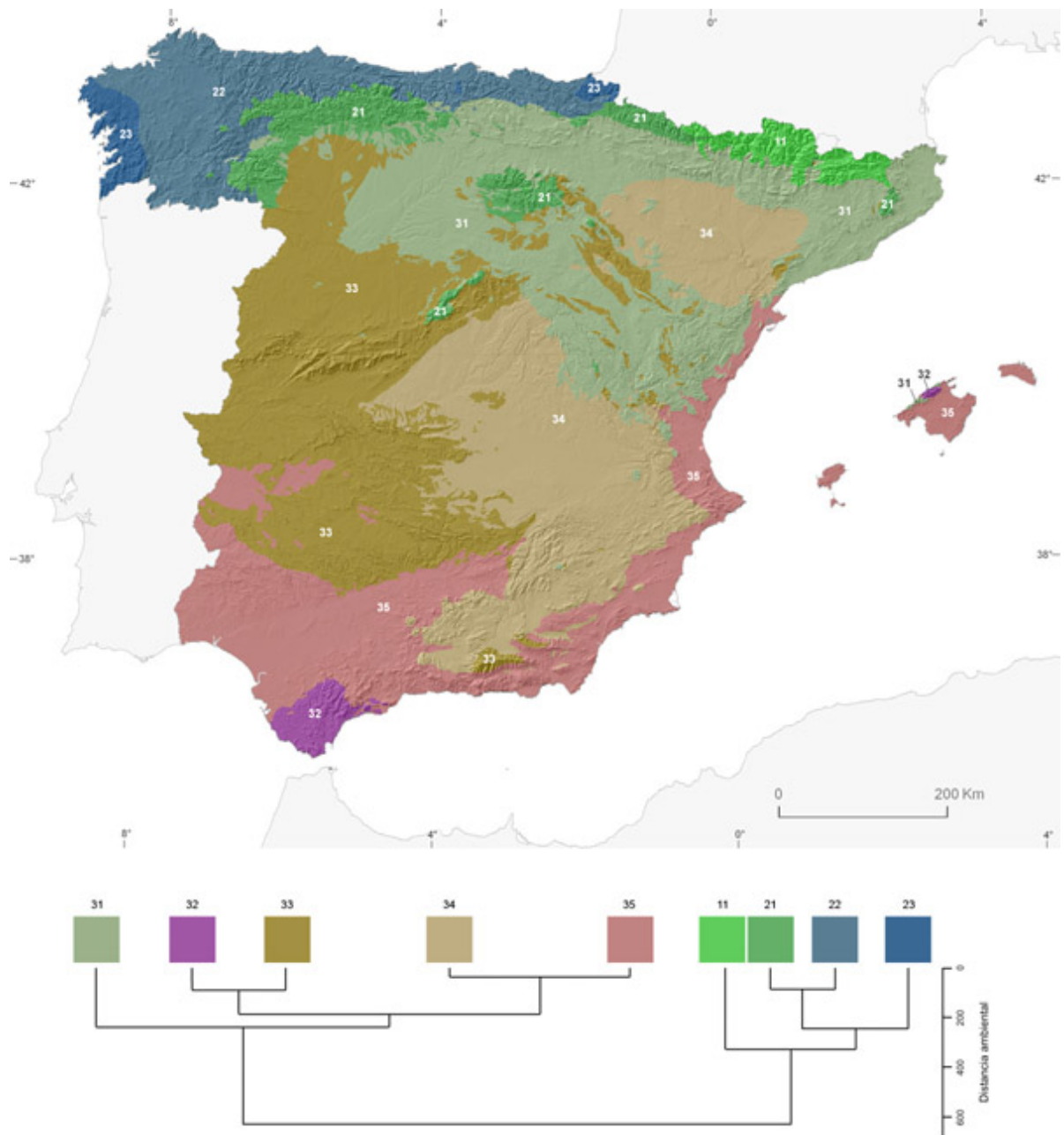


Figura 4. Ambientes terrestres de España peninsular y Baleares en el nivel 2 de la clasificación.

La representación cartográfica de los ambientes en el nivel 3 (**Fig. 5**), se ha llevado a cabo mediante un sistema automático de asignación de color que, al contrario que una paleta de color aleatoria como la de la **Figura 1**, permite destacar la similitud entre los ambientes y la naturaleza más o menos gradual del cambio ambiental dentro del territorio (Hargrove y Hoffman, 1999). Este sistema parte de la condensación de las variables ambientales mediante un análisis de componentes principales (ACP) ejecutado con los valores medios de dichas variables para cada ambiente. Seguidamente, a cada uno de los tres ejes principales y ortogonales de variación resultantes del ACP, se le asigna un color del esquema RGB (rojo, verde, azul). De este modo, cada ambiente posee una combinación específica de rojo, verde y azul y, por tanto, un color característico que indica la mezcla relativa de cada componente ambiental.

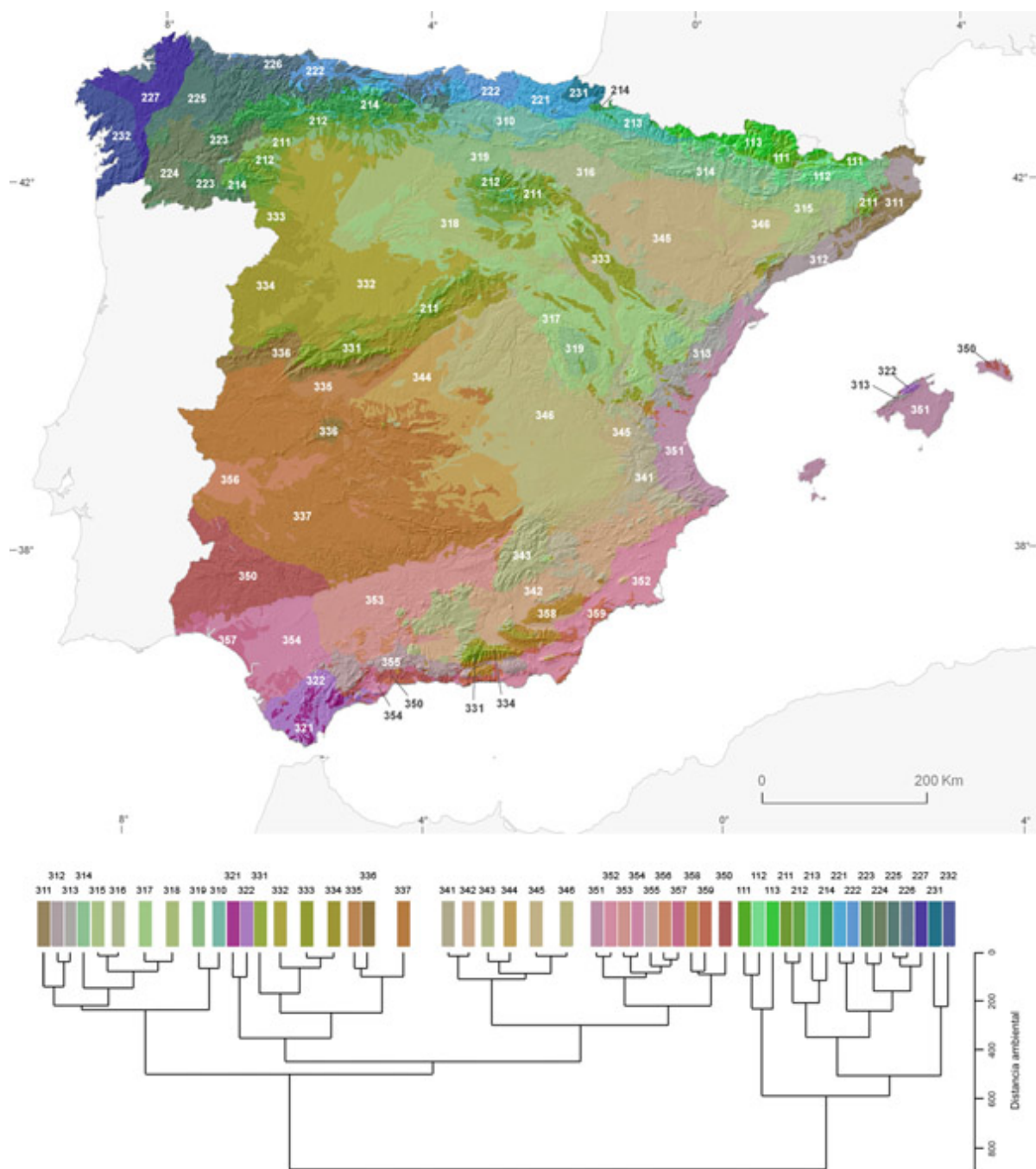


Figura 5. Ambientes terrestres de España peninsular y Baleares en el nivel 3 de la clasificación. En este mapa se ha empleado un procedimiento automático de asignación de color que permite visualizar el carácter particular de cada ambiente, la similitud existente entre ellos y la naturaleza más o menos gradual del cambio ambiental dentro del territorio (véase el texto).

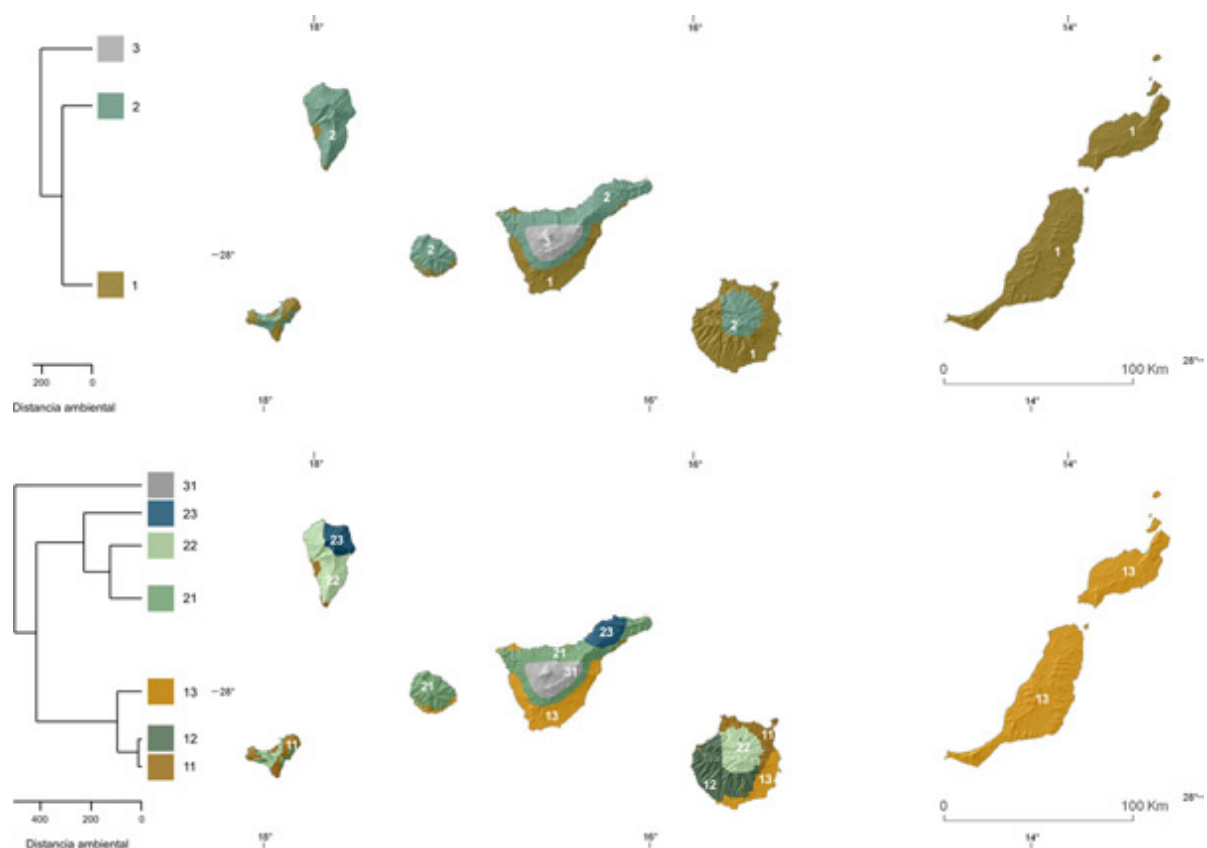


Figura 6. Ambientes terrestres de las islas Canarias en los niveles 1 (arriba) y 2 (abajo) de la clasificación.

Los tres ejes principales explican el 78% de la varianza de los datos. El primer eje (varianza explicada 50,74 %), al que se asignó el color rojo, está fuerte y positivamente correlacionado con la radiación y la temperatura, y negativamente con la aridez (P/ETP) y la precipitación (total y estacional). Así, zonas representadas con alto contenido en rojo, como el sureste peninsular y el valle del Guadalquivir, indican ambientes con una gran cantidad de energía disponible, escasa precipitación y un déficit hídrico importante. Por el contrario, zonas con alto contenido en cian (color complementario del rojo), como la cornisa cantábrica, revelan ambientes con mínima disponibilidad energética, precipitaciones elevadas y déficit hídrico inexistente.

El segundo eje (varianza explicada 15,95 %), al que se asignó el color verde, está correlacionado negativamente con la temperatura (media del mes más frío y media anual) y con la acidez del sustrato y, en menor medida y positivamente, con la precipitación estival. Valores elevados de color verde, como se advierte en el Pirineo central, están asociados a temperaturas mínima y media anual bajas, al predominio de sustratos calcáreos (básicos) y a una máxima precipitación estival. Valores elevados de magenta (color complementario del verde), como se observa en las sierras de Cádiz, indican temperaturas mínima y media anual elevadas, predominio de sustratos silíceos ácidos y una baja precipitación estival.

El tercer eje (varianza explicada 11,16 %), al que se asignó el color azul, se encuentra ligado a la naturaleza del sustrato, a la temperatura media del mes más frío y al inverso de la continentalidad. Un valor alto de color azul, como el que se atribuye a la cornisa cantábrica, denota abundancia de sustratos calcáreos, temperaturas mínimas elevadas y una continentalidad poco o nada marcada. Un valor elevado de amarillo (color complementario del azul), como el que poseen el Sistema Central, gran parte de la Meseta norte y Sierra Nevada, revela ambientes con sustratos silíceos ácidos, mínimos de temperatura acentuados y continentalidad marcada.

En los niveles 1 y 2 de la clasificación para la España peninsular-Baleares, el color de cada ambiente se ha obtenido a partir de la media de color (rojo, verde, azul) entre los ambientes del nivel 3 que se agrupan en dicho ambiente.

Discusión

La elección de las variables en las que se basa Ambientes terrestres de España se realizó considerando, en primer lugar, que fuera coherente con el marco conceptual establecido. Según dicho marco, los factores climáticos debían jugar un papel

primordial en la clasificación, de ahí su elevada proporción en el conjunto de las variables. No obstante, con esta premisa existía el riesgo de que tal dominio anulara el papel del tipo de variables menos numerosas, en este caso la litología y la topografía. Por otro lado, la distinta "textura" de los tipos de variables utilizados podía tener asimismo un efecto negativo sobre los resultados de su análisis conjunto. En un intento de reconocer posibles artefactos provocados por estos supuestos, se analizaron distintas combinaciones de variables: climáticas solamente, climáticas y litológicas, climáticas y topográficas, y climáticas, litológicas y topográficas. Los resultados obtenidos permitieron, por una parte, apreciar el efecto descompensado de la pendiente al combinarse con la litología, actuando como un potente disgregador o multiplicador de unidades debido, posiblemente, a lo fino de su "textura" respecto a la de la litología; por otra parte, a comprobar que la influencia de las variables en la clasificación tal como fueron combinadas, se ajustaba aparentemente bien a lo esperado según el marco teórico de partida. Así, resulta perfectamente coherente con dicho marco que en los niveles 1 y 2 (**Figuras 3 y 4**) los ambientes vengan definidos en exclusiva o predominantemente por el clima, que entre los niveles 2 y 3 (**Figuras 3 y 4**) se revelen ya todos los límites entre los sustratos más dispares (por consistencia y pH), RSA y SC, y que en el nivel 3 (**Fig. 5**) entren en juego diferencias litológicas basadas, por ejemplo, en la consistencia (RC, SC; RSA, SS), pero no en el pH, y diferencias climáticas menores, por ejemplo las que se dan entre los ambientes 353 y 354. Todos estos resultados son generalmente verosímiles y no parece que revelen artefactos importantes, lo que indica que la interacción de los tipos de variables utilizados y el peso relativo que tienen en la definición de unidades parecen adecuados, o que la técnica de clasificación empleada es suficientemente robusta como para impedir sesgos espurios hacia alguna de las variables analizadas.

La disponibilidad de datos es un factor que influye secundaria pero determinadamente en la elección de las variables. En nuestro caso, la imposibilidad de obtener datos útiles sobre nieblas o precipitación horizontal limita localmente la efectividad de la clasificación, principalmente en las islas occidentales del archipiélago canario (Tenerife, La Palma, La Gomera y El Hierro), donde el denominado mar de nubes tiene una gran trascendencia ecológica, pero también en algunas sierras del norte peninsular (p.e., sierras de Cantabria y Urbasa).

La ausencia de una variable sobre precipitación horizontal es responsable de que en las Islas Canarias se observe una correspondencia menos directa de lo que podría esperarse de sus unidades con las regiones ecológicas tradicionalmente reconocidas, a lo que también contribuye posiblemente la necesidad de mayor resolución en aquellas islas con mayores desniveles. No obstante, los ambientes identificados sí parecen reflejar, aunque sea de manera simple, la realidad ecológica subyacente. Por ejemplo, el primer nivel de corte mostrado (**Fig. 6**) consta de tres ambientes bien caracterizados climática y topográficamente. El dominio ambiental 1 reúne los territorios que están sometidos a un déficit hídrico acusado y que son menos abruptos. Se corresponde con el desarrollo de las formaciones vegetales más xéricas: matorrales espinosos dominados por *Launaea arborescens* (Batt.) Murb., matorrales suculentos dominados por *Euphorbia* L. spp. y *Kleinia* Mill. sp., formaciones dunares dominadas por *Traganum moquini* Webb ex Moq., formaciones litorales bajo síndrome salino, las variantes más secas del bosque termófilo y el denominado pinar seco de *Pinus canariensis* C. Sm. ex DC. El dominio ambiental 2 recoge aquellos territorios sometidos a un déficit hídrico moderado, el cual se ve a veces atenuado, y hasta anulado, gracias a la condensación de la humedad atmosférica. Incluye aquellas áreas directamente influidas por el mar de nubes, donde los aportes de agua procedentes de esta fuente pueden superar a los recibidos a través de la precipitación. Las temperaturas se mantienen suaves todo el año y posee una topografía extremadamente abrupta. Este dominio se corresponde con el desarrollo del monteverde (fayal-breza y laurisilva) y de las variantes más húmedas del pinar de pino canario y del bosque termófilo. El dominio ambiental 3 alberga los territorios sometidos a estrés térmico (presenta un periodo con heladas más o menos largo y una oscilación térmica diaria muy acentuada). La radiación es siempre muy intensa y las precipitaciones escasas. Se corresponde con los matorrales de cumbre: retamoides, sobre los sustratos más consolidados, y abiertos y dominados por pequeñas matas y plantas herbáceas, sobre los sustratos menos firmes.

La clasificación también revela en España peninsular-Baleares interesantes similitudes ambientales, muchas de ellas ya puestas de manifiesto por otras clasificaciones, sobre todo biogeográficas. Por ejemplo, el mapa mostrado como primer nivel de corte (**Fig. 3**) muestra tres dominios ambientales que coinciden llamativamente con los territorios biogeográficos Atlántico, Alpino y Mediterráneo (Rivas-Martínez et al., 2002a; EEA, 2008). Pero además, en este nivel y en el mostrado en la **Figura 4**, se advierte como singularidad destacable la afinidad ambiental identificada entre los sistemas montañosos que bordean la Meseta por el Norte (incluyendo las rañas del norte de Castilla y León), el Pirineo occidental y las cadenas y enclaves que, aunque más alejados de la influencia de los frentes ciclónicos y vientos cargados de humedad que llegan a la Península provenientes del Noroeste, se mantienen prácticamente libres de déficit hídrico estival. Ello se debe a la influencia de otros frentes (Macizo del Montseny) o a la abundancia de tormentas estivales (sierras de Guadarrama, Ayllón y Valdemeca, y Moncayo), y a unos valores mínimos regionales de radiación solar y un termoclima fresco que modera la evapotranspiración. Llamativamente también, todos estos lugares albergan hayedos o restos fósiles que testifican la presencia reciente de haya en ellos. Otros ejemplos destacables podrían ser la relación entre la depresión del Ebro y los territorios calcáreos castellano-manchegos (**Figuras 4 y 5**), también revelada por análisis biogeográficos (Sainz y Hernández-Bermejo, 1985), la afinidad ambiental entre las áreas silíceas ácidas del Sistema Ibérico y el occidente hercínico de la Península (**Fig. 4**), paralela a su afinidad florística; la identificación de los territorios mediterráneos más térmicos y secos, que además de las áreas ya reconocidas como piso termomediterráneo (Rivas-Martínez et al., 2002b), incluye el occidente de Sierra Morena (Sierra de Aracena), el Guadiana medio y el valle del Guadalquivir (**Fig. 4**), frente a los territorios mediterráneos más térmicos y

húmedos, que agrupan las sierras de Cádiz y parte de la sierra de Tramuntana, en Mallorca (**Figuras 4 y 5**); y la afinidad ambiental entre las partes más altas de Sierra Nevada y de la Sierra de Gredos (**Fig. 5**).

La clasificación Ambientes terrestres de España, basada en un modelo conceptual explícito y en una metodología consistente y suficientemente probada, se ha visto que ofrece la posibilidad de estratificar el territorio a distintos niveles de agregación/desagregación, según unas clases definidas sin ambigüedad por determinadas variables y unos estratos que poseen máxima homogeneidad interna. Versatilidad, objetividad y homogeneidad pretenden ser aspectos destacados de esta clasificación, principalmente por la ayuda que prestan a la comprensión de patrones ambientales complejos y por la efectividad que aportan a su aplicación (Hargrove y Hoffman, 2005; Lugo et al., 1999). En definitiva, Ambientes terrestres de España se espera que contribuya a mejorar el conocimiento del territorio al que se circunscribe y a resolver con éxito problemas de análisis y gestión ambiental.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto *Establecimiento de las bases ecológicas para la gestión de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*, promovido y financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. El Instituto Nacional de Meteorología proporcionó los datos climáticos, El Instituto Geográfico Nacional el modelo digital del terreno, el Instituto Geológico y Minero de España una copia digital del mapa litológico y el Centro de Computación Científica de la Universidad Autónoma de Madrid los medios técnicos necesarios para gran parte del análisis de datos. Agradecemos los comentarios críticos de dos revisores anónimos a esta versión y de Gabriel del Barrio, José María Fernández Palacios, Ramón Elena, Carlos Tomás López, Xavier Pons, Rubén Retuerto, Helios Sainz y Jordi Vayreda a una versión anterior del contenido aquí expuesto.

Referencias

- Abbate, G., Cavalli, R.M., Pascucci, S., Pignatti, S., Poscolieri, M. 2006. Relations between morphological settings and vegetation covers in a medium relief landscape of Central Italy. *Annals of Geophysics* 49:153-165.
- Alcaraz, D., Paruelo, J.M., Cabello, J. 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography* 15:200-212.
- Allué, J.L. 1990. *Atlas fitoclimático de España*. Monografías I.N.I.A. 69. Ministerio de Agricultura, Madrid, España. http://www.mma.es/secciones/biodiversidad/banco_datos/info_disponible/mapa_subregiones_fitoclim.htm
- Bailey, R.G. 1987. Suggested hierarchy of criteria for multiscale ecosystem mapping. *Landscape and Urban Planning* 14:313-319.
- Bailey, R.G. 2005. Identifying ecoregion boundaries. *Environmental Management* 34:14-26.
- Casals, V. 1998. Gestión ambiental y regionalización: una aproximación histórica al caso español. *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales* 16. <http://www.ub.es/geocrit/sn-16.htm>
- CDB 2008. *Enfoque por ecosistemas*. UNEP/CBD/COP/Decisión IX/7. Bonn, Alemania, 19-30 mayo 2008. <http://www.cbd.int/doc/decisions/cop-09/cop-09-dec-07-es.pdf>
- Coello, F., Luxan, F., Pascual, A. 1859. *Reseñas geográfica, geológica y agrícola de España*. Imprenta Nacional, Madrid, España.
- Dantín Cereceda, J. 1922. *Ensayo acerca de las regiones naturales de España*. Tomo I. Museo Pedagógico Nacional, Madrid, España.
- Dikau, R. 1990. Geomorphic landform modelling based on hierarchy theory: *Proceedings 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, Zürich, Switzerland, July 23-27, 1:230-239.
- Ecoregions Working Group 1989. *Ecoclimatic Regions of Canada, First Approximation*. Ecological Land Classification Series, No. 23, Environment Canada, Ottawa, Canada. http://sis.agr.gc.ca/cansis/references/1989ec_a.html
- EEA, 2008. *Biogeographical regions, Europe 2008*. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/biogeographical-regions-europe-2008>

- Elena-Rosselló, R. (ed.) 1997. *Clasificación biogeoclimática de España peninsular y balear*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Fairbanks, D.H.K., Benn, G.A. 2000. Identifying regional landscapes for conservation planning: a case study from KwaZulu-Natal, South Africa. *Landscape and Urban Planning* 50:237-257.
- González Bernáldez, F. 1982. *Análisis ecosistémico de los recursos naturales*. Publicaciones del Centro Internacional de Formación en Ciencias Ambientales (CIFCA), Serie Medio Ambiente, 2. Madrid, España.
- Gorczyński, W. 1920. Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. *Geografiska Annaler* 2:324-331.
- Griffith, D.A., Amerhein, C.G. 1997. *Multivariate statistical analysis for geographers*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hargrove, W.W., Hoffman, F.M., 1999. Using multivariate clustering to characterize ecoregion borders. *Computing in Science and Engineering* 1(4):18-25.
- Hargrove, W.W., Hoffman, F.M., 2005. Potential of multivariate quantitative methods for delineation and visualization of ecoregions. *Environmental Management* 34, Suppl. 1:39-60.
- Hernández-Pacheco, E. 1955-1956. Fisiografía del solar hispano. *Memorias de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, Serie Ciencias Naturales* 16(1-2).
- Holdridge, L.R. 1947. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105:367-368.
- Kaufman, L., Rousseeuw, P.J. (eds.) 1990. *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. Wiley-Interscience. New York, USA.
- Klijn, F., Udo de Haes, H.A. 1994. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology* 9:89-104.
- Klijn, F., Dewaal, R.W., Voshaar, J.H.O. 1995. Ecoregions and ecodistricts. Ecological regionalizations for The Netherlands environmental policy. *Environmental Management* 19:797-813.
- Leathwick, J.R., McOverton, J., McLeod, M. 2003. An environmental domain classification of New Zealand and its use as a tool for biodiversity management. *Conservation Biology* 17:1612-1623.
- Legendre, P., Legendre, L. 1998. *Numerical Ecology*. Elsevier, New York. USA.
- Lugo, A.E., Brown, S.L., Dodson, R., Smith, T.S., Shugart, H.H., 1999. The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography* 26:1025-1038.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M. 2005. *Cluster Analysis Basics and Extensions*. Unpublished. R package version 1.10.2.
- Metzger, M.J., Bunce, R.G.H., Jongman, R.H.G., Múcher, C.A., Watkins, J.W. 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography* 14:549-563.
- Montes, C., Borja, F., Bravo, M.A., Moreira, J.M. (cord.) 1998. *Reconocimiento biofísico de espacios naturales protegidos. Doñana: una aproximación ecosistémica*. Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente. Sevilla, España.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M. 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology* 20:1823-1841.
- Olson, D.M. et al. 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. *BioScience* 51:933-938.
<http://www.worldwildlife.org/science/ecoregions/item1267.html>

Ostendorf, B., Hilbert, D.W., Köstner, B., Tappeiner, U., Tasser, E. 2000. Toward a predictive understanding of ecosystem processes at the scale of landscapes. En: Oxley, L., Scrimgeour, F., McAleer, M. (eds), *International Congress on Modelling and Simulation Proceedings 3*, pp. 685-690. The Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, Australia.

R Development Core Team 2005. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <http://www.R-project.org>.

Riba, O. et col. 1969. *Mapa litológico de España 1:500.000*. IGME, Madrid, España.

Rivas-Martínez, S. 1987. *Mapa de series de vegetación de España y Memoria*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-ICONA, Madrid, España.

http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/banco_datos/info_disponible/memoria_mapa_series_veg.htm

Rivas-Martínez, S., Penas, A., Díaz, T.E. 2002a. Biogeographic map of Portugal and Spain to sector level. En: Rivas-Martínez, S., Díaz, T.E., Fernández-González, F., Izco, J., Loidi, J., Lousa, M., Penas, A. (eds.). Vascular plant communities of Spain and Portugal. Addenda to the syntaxonomical checklist of 2001. *Itinera Geobotanica* 15(1):5-432.

Rivas-Martínez, S., Penas, A., Díaz, T.E. 2002b. Bioclimatic map of Portugal and Spain – thermoclimatic belts. En: Rivas-Martínez, S., Díaz, T.E., Fernández-González, F., Izco, J., Loidi, J., Lousa, M., Penas, A. (eds.). Vascular plant communities of Spain and Portugal. Addenda to the syntaxonomical checklist of 2001. *Itinera Geobotanica* 15(1):5-432.

Sainz, H., Hernández-Bermejo, E. 1985. Sectorización fitogeográfica de la Península Ibérica e Islas Baleares: la contribución de su endemoflora como criterio de semejanza. *Candollea* 40:485-508.

Sainz, H., Sánchez, R., García-Cervigón, A.I., 2009. Mapa de paisajes vegetales potenciales. En: Hernández, L., Romero, F. (eds.). *Bosques españoles. Los bosques que nos quedan y propuestas de WWF para su restauración*. WWF/Adena, Madrid. http://assets.wwfspain.panda.org/downloads/mapa_wwf_bosques_que_nos_quedan_1.pdf

Walter, H., Box, E. 1976. Global classification of natural terrestrial ecosystems. *Vegetatio* 32:75-81.

Willkomm, M. 1952. *Strand- und Steppengebiete der Iberischen Halbinsel und deren Vegetation. Ein Beitrag zur physikalischen Geographie, Geognosie und Botanik*. Fleischer. Leipzig, Germany.