

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVOLUCIÓN DE LA
VEGETACIÓN NIVAL DE LAS MONTAÑAS MEDITERRÁNEAS.
SIERRA DE GUADARRAMA, ESPAÑA

*Arturo García-Romero*¹
*Julio Muñoz*²
*Nuria Andrés*³
*David Palacios*⁴

RESUMEN

Se estudia la variación reciente del clima y sus consecuencias sobre la distribución de la vegetación nival en dos cuencas de la Sierra de Guadarrama, España. El cambio climático se documentó a partir de dieciocho variables referentes a temperatura, precipitación pluvial y nival, y duración de la nieve, durante el período 1951-2000. Para evaluar la respuesta de la vegetación a la variación del clima se partió de determinar la correlación nival de las distintas clases de vegetación, para lo cual, se consideró su relación espacial y/o temporal con distintas variables del clima, la duración de la nieve y las geoformas nivales. Se generaron mapas de la vegetación nival en cinco fechas (1956 a 1998) y para cuantificar y explicar las tendencias se calcularon superficies y porcentajes de cambio, índices de transformación media anual (ITMA) y matrices de transición. Los resultados muestran que el área de estudio incluye catorce clases de vegetación pertenecientes a cuatro grupos de alta, media, baja y negativa correlación nival. La evolución de los últimos cincuenta años se resume en una notable reducción espacial de la vegetación con correlación nival alta, moderada reducción de la vegetación con correlación nival media y significativa expansión de la vegetación con correlación nival negativa. Los procesos de cambio dejan ver una línea principal de sucesión que consiste en la sustitución de las formaciones herbáceas altamente correlacionadas con alta duración de la nieve y abundancia

¹ Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. Correo electrónico: <agromero@igiris.igeograf.unam.mx>.

² Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense. Madrid. Correo electrónico: <julio_muji@ole.com>.

³ Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense. Madrid. Correo electrónico: <julio_muji@ole.com>.

⁴ Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense. Madrid. Correo electrónico: <julio_muji@ole.com>.

de las aguas de fusión, por matorrales de leguminosas alejados de la influencia nival, que se densifican paulatinamente.

Palabras clave: cambio climático, Sierra de Guadarrama, vegetación.

ABSTRACT

It studies recent climate variation and its consequences on the nival vegetation distribution in two basins of the Sierra de Guadarrama, Spain. The climate change was documented from eighteen different variables related to temperature, pluvial and snow precipitation, snow duration within the period 1951-2000. To evaluate vegetation response to climate variation we determined the nival correlation of the distinct vegetation classes. To do this, we considered their spatial and / or temporal relation with distinct variables of climate, snow variation, and nival geofoms. Nival vegetation maps were made of five dates (1956 to 1998) and to quantify and explain tendencies it was necessary to calculate surfaces and percentages of change, annual mean transformation index (ITMA's) and transition matrixes. The results show that in the area studied there are 14 vegetation classes belonging to four groups of high, medium, low and negative nival correlation. Evolution of the last fifty years is summarized in a notable spatial reduction of vegetation with high nival correlation, moderate vegetation reduction with medium nival correlation and significant vegetation expansion with negative nival correlation. Change processes leave a main succession that consists on the herbal formation substitution highly correlated with snow duration and the abundance of fusion water, by leguminous shrubs apart from the nival influence, which slowly densify.

Key words: climatic change, Sierra de Guadarrama, vegetation.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el cambio climático ha sido relacionado con importantes alteraciones ecológicas y ambientales (Beniston 2003, Fagre *et al.* 2003, Pauli *et al.* 2003). Una de las manifestaciones del daño que ha llamado la atención internacional se refiere a la alteración de los patrones de distribución y duración de las manchas de nieve en ecosistemas alpinos y nivales (Walker *et al.* 1993, Keller *et al.* 2000). El proceso ha sido asociado a la migración de especies y procesos de invasión y competencia que ocasionan la pérdida de especies criófilas y endémicas, así como cambios en los patrones de distribución de organismos, comunidades y ecosistemas (Peñuelas *et al.* 2002, Beniston 2003, Sanz-Elorza *et al.* 2003, Del Río y Penas 2006).

Las cuencas de La Condesa y Valdemartín (550 ha) forman el sector más alto de la cuenca del río Manzanares (1.795 a 2.374 msnm), sierra de Guadarrama, España. La temperatura media anual es inferior a 7,0° y la precipitación anual promedio de 1365 mm, distribuidos en 148 días, de los cuales la mitad corresponde a precipitaciones en forma de nieve. La temperatura media anual de las mínimas no sobrepasa los 3,0° y las mínimas medias mensuales son negativas en al menos la mitad del año, por lo que la nieve puede mantenerse sobre el suelo durante más de 70 días/año (Instituto Nacional de Meteorología 2002).

En las áreas más favorables para la acumulación de la nieve la vegetación consiste en formaciones herbáceas y abiertas de especies quionófilas —como *Sedum candollei*, *Digitalis thapsi*, *Paronychia polygonifolia*, *Criptogama crisper* y *Linaria saxatilis*— y plantas tolerantes a una larga duración de la nieve —como *Agrostis truncatula*, *Leucanemopsis pallida*, *Sedum brevifolium* y *Senecio pyrenaicus*— (Fernández-González 1991, Palacios y García 1997). Fuera de los neveros la vegetación consiste en matorrales de piorno (*Cytisus carpetanus*) y/o enebro (*Juniperus alpina*) (Sanz, 1979; Gavilán, *et al.* 1998; Rivas-Martínez *et al.* 1999) ocupando la mayor parte de las laderas, pastizales secos (*Festuca curvifolia*) en las cumbres, pastizales húmedos (*Nardus stricta* y *Festuca iberica*) en los llanos del fondo de las cuencas, y herbazales dispersos en roquedales y pedreras (Rivas-Martínez *et al.* 1989) (Figura 1).

La interpretación preliminar de las fotografías aéreas del período 1957-2000 revela cambios en los patrones de distribución de la vegetación, de los cuales se asume que pudieron haber resultado de recientes variaciones del clima y de la distribución y duración de la nieve sobre el terreno. El objetivo del estudio fue realizar un análisis retrospectivo de las variaciones del clima y relacionarlo con cambios en las superficies de las distintas clases de vegetación, en los últimos cincuenta años. Para evaluar los resultados fue importante determinar el nivel de correlación —o dependencia— nival de las distintas clases de vegetación, mediante su correlación espacial y/o temporal con distintas variables del clima, la duración de la nieve y las geoformas nivales.

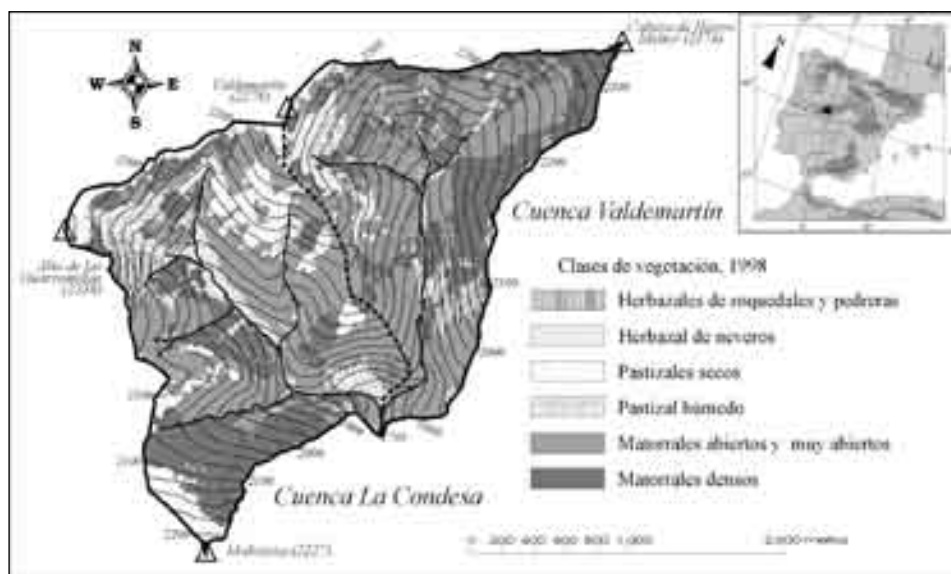


Figura 1. Localización y coberturas de vegetación en el área de las cuencas de La Condesa y Valdemartín, sierra de Guadarrama, España

METODOLOGÍA

Análisis de las tendencias de cambio climático (1951-2003)

La evolución del clima en el período 1951 a 2003, se obtuvo a partir de los registros de la estación «Puerto de Navacerrada» (1.860 msnm) (Instituto Nacional de Meteorología 1995 y 2002). Se analizaron dieciocho variables significativas para la vegetación de alta montaña: tres termométricas anuales, cuatro termométricas estacionales, dos referentes a los volúmenes pluviométricos (anual y estacional), tres referentes a la frecuencia anual de las precipitaciones y a la duración anual de la nieve; y seis nivométricas estacionales.

Determinación del significado nival de la vegetación

Para determinar el nivel de correlación nival de las distintas clases de vegetación se establecieron relaciones temporales y de distribución con distintas variables del clima, la duración de la nieve y las geoformas nivales.

– Relación clima-vegetación. El período de estudio se dividió en cinco intervalos delimitados por las fechas con información fotográfica de coberturas (1951-1956, 1957-1971, 1972-1983, 1984-1990 y 1991-2000) y se obtuvieron para cada uno de ellos los valores promedio de las dieciocho variables climáticas. Para relacionar las tendencias temporales del clima con las superficies de las distintas clases de vegetación, se utilizó el Índice de Correlación de Pearson y se generaron líneas de tendencia polinómica para interpretar los resultados.

– Relación vegetación-duración de la nieve. Se generaron mapas de las cubiertas de nieve durante los períodos de deshielo, entre 1996 y 2004 (Palacios y García 1997, Palacios *et al.* 2003, Andrés y Palacios 2004), los cuales fueron procesados en un sistema de información geográfica (SIG) para generar un mapa del promedio de la duración de la cubierta nival. Se aplicó un índice de la duración media de la nieve en días, el cual se basa en los porcentajes de la superficie de cada clase de vegetación en los que esta coincide con el área correspondiente a los distintos rangos de número de días con nieve/año y su valor es el resultado de la media ponderada de todos los porcentajes registrados.

– Relación vegetación-geoformas nivales. Se elaboró un mapa con trece clases de geoformas, las cuales fueron ordenadas (escala de 1 a 13) según la intensidad de la movilidad. Para ello, se siguió una adaptación a la técnica de bloques pintados (Rapp 1960, Nyberg 1991, Palacios y García 1997, Palacios *et al.* 2003, Andrés y Palacios 2004), la cual consistió en establecer una retícula con cuadros de 10 x 10 m para monitorear el movimiento de por lo menos un bloque dentro de cada cuadro, tomándose registros anuales durante el período 1996-2004. Finalmente, se midieron los porcentajes de la superficie de cada clase de vegetación en los que esta coincide con las diversas clases de geoformas.

Evaluación de la dinámica de la vegetación nival, en el período 1957-1998

Los mapas de coberturas de la vegetación nival se elaboraron en el SIG ILWIS 3.1, en cinco fechas (1957, 1972, 1984, 1991 y 1998). La interpretación del año 1998 se hizo sobre ortofotos digitales con resolución de 1m por píxel y área mínima cartografiada de 100 m². Los mapas de fechas anteriores se interpretaron en fotografías aéreas (Sanz-Elorza *et al.* 2003) convertidas a formato digital y exportadas al SIG. Las imágenes se corrigieron geoméricamente y se georeferenciaron a partir del mapa de 1998, y para determinar la precisión se utilizó el índice SIGMA= <10 (Unit Geo Software Development 2001). Las coberturas de vegetación de las distintas fechas fueron reclasificadas según el nivel de su correlación nival, y las bases de datos fueron exportadas a un programa estadístico para obtener superficies, porcentajes de cambio e índices de transformación media anual. Para conocer los procesos de cambio que explican las tendencias se elaboraron matrices de transición entre los cinco intervalos de tiempo (Ramírez 2001).

RESULTADOS

Evolución del clima en el período 1951-2000

El análisis de 18 variables del clima (1951-2000) revela que la temperatura media anual de la cuenca fue de 6,2 °C, la temperatura máxima media de 9,8 °C y la temperatura mínima media de 2,7 °C. La distribución estacional mostró el promedio más alto en el verano (14,6 °C), seguido del otoño (7,08 °C), la primavera (3,5 °C) y el invierno (-0,44 °C). La precipitación anual fue de 1364 mm que se distribuyeron en 148 días, siendo el invierno la estación más húmeda del año con 443 mm. Anualmente se registraron 75,2 días de nieve, que se distribuyeron principalmente en el invierno (36,6), la primavera (27,0) y el otoño (11,2). La duración de la nieve en el suelo fue de 135 días, concentrados en el invierno (73), la primavera (49) y el otoño (13).

La Figura 2 muestra la evolución anual del clima en el período 1951 a 2000. Destaca el incremento de las temperaturas media anual (5,8 a 6,9 °C, +19%), media anual de las máximas (9,5 a 10,8 °C, +13%) y media anual de las mínimas (2,0 a 3,1, +53%). Asimismo, las temperaturas medias de todas las estaciones del año se incrementaron, principalmente las del invierno y la primavera que pasaron de -1,4 a 0,4 (+128%) y de 3,5 a 4,7 (+32%), respectivamente.

En cambio, las precipitaciones mostraron una tendencia decreciente, por ejemplo, la pluviosidad anual retrocedió de 1377 a 1210 mm (-12%) entre el primero y el último períodos y la pluviosidad invernal pasó de 460 a 381 mm (-17%). No obstante que el número de días con precipitación y con nevada se incrementaron de 132 a 146 (11%) y de 65 a 68 (5%), respectivamente, la duración anual de la nieve sobre el terreno se redujo de 141 a 111 días (-21%), principalmente en la primavera (55 a 32 días y -41%) y el invierno (74 a 65 días y -12%).

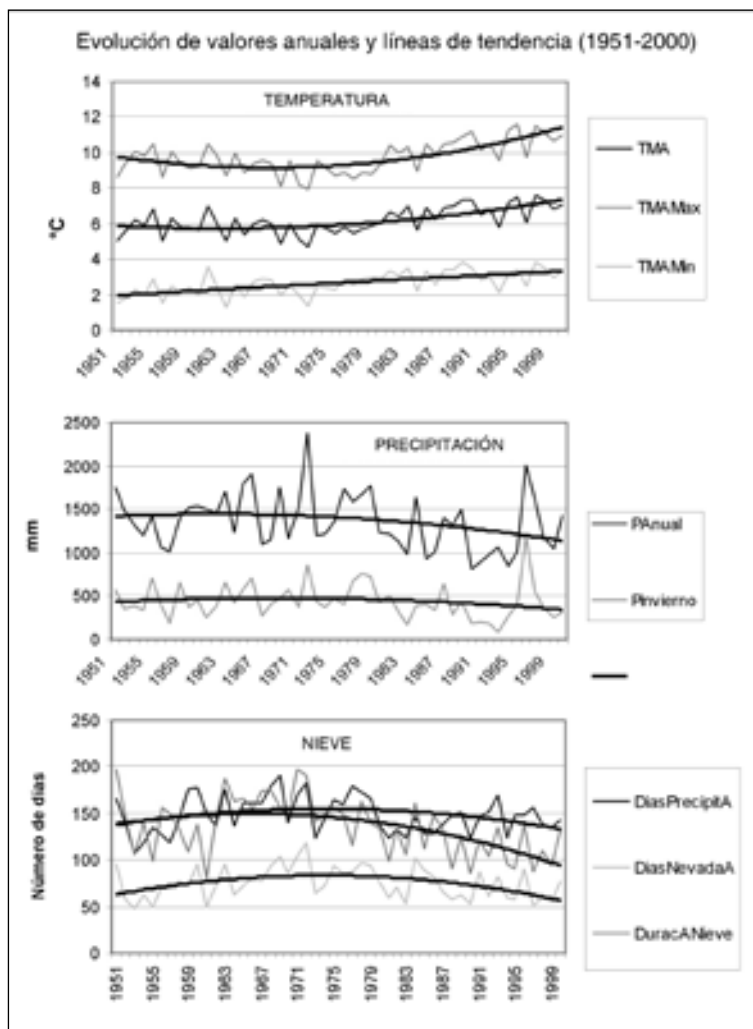


Figura 2. Evolución anual del clima durante el período 1951-2000.

Distribución actual de las áreas de nivación y formas del relieve nival

La distribución actual de las áreas con distinta duración de la nieve muestra un fuerte carácter nival, con 98,9% de la superficie total cubierta de nieve en ≥ 60 días al año, 88,5% en ≥ 80 días/año, 51,1% en ≥ 120 días/año, 31,7% en ≥ 160 días/año y solo 9,4% en ≥ 200 días/año. El rango 80-99 días/año con cubierta nival fue el más representativo a abarcar 26,0% del total de la cuenca, seguido del rango 180-199 días/año con 15,1% y 100-119 días/año con 11,4%.

Sin embargo, las geoformas asociadas a procesos nivales activos abarcaron solo el 11,2% de la superficie total, incluyendo dos grupos: geoformas nivales y geoformas

pronivales. Las primeras corresponden a terrazas, oquedades y canales, donde la larga duración de la nieve (>200 días/año) permite el modelado de nichos nivales activos y muy activos (movilidad = 12 y 10, respectivamente). Por su parte, las geoformas pronivales incluyen a los fondos de valles periglaciares y flujos de soliflucción activos y asociados a una moderada/larga duración de la nieve (160 a 219 días/año) y moderada/alta movilidad (6 y 9).

Las geoformas no nivales (120 a 219 días de nieve/año) abarcaron una extensa superficie (88,9% del total), incluyendo geoformas escasamente nivales y geoformas antiguas. Las primeras corresponden a geoformas activas (movilidad = 7 a 11), pero que no están directamente relacionadas con la nivación —por ejemplo, *debris flows* y barrancos—, así como geoformas nivales inactivas (movilidad = 4 y 5) —por ejemplo, flujos de soliflucción inactivos y nichos nivales inactivos—. Las geoformas antiguas (75,4% del total) corresponden a un extenso manto de alteración de edad pleistocénica (Palacios *et al.* 2003) y básicamente estable (movilidad = 2), así como diversos afloramientos rocosos y antiguos campos de bloques, también muy estables (movilidad = 1 y 3, respectivamente).

Significado nival de la vegetación

El área de la cuenca está ocupada por catorce clases de vegetación, pertenecientes a seis grupos principales (Figura 1): a) herbazales de roquedales y pedreras (*Saxifraga willkommiana*, *Hieracium valí* y *Agrostis truncatula*, entre otros) (18,6 ha y 3,4% del total); b) herbazal de neveros (*Sedum candollei*, *Digitalis thapsi* y *Paronychia polygonifolia*) (29,1 ha y 5,3%); c) pastizales secos (*Festuca curvifolia*) con o sin arbustos dispersos de piorno (*Cytisus carpetanus*) y enebro (*Juniperus alpina*) (62,6 ha y 11,4%); d) pastizal húmedo (*Nardus stricta* y *Festuca iberica*) (48,3 ha y 8,8%); e) cinco clases de matorrales abiertos y muy abiertos de piorno y/o enebro (286,9 ha y 52,2% del total) y; f) tres clases de matorrales densos de piorno y/o enebro (104,3 ha y 18,9%).

Los índices de correlación (IC) entre la dinámica temporal de las catorce clases de vegetación y las dieciocho variables del clima, así como la correlación espacial entre dichas clases de vegetación, las áreas de distinta duración de la nieve y las geoformas nivales, permitieron determinar cuatro grupos de formaciones vegetales con distinta correlación nival (Tabla 1).

Alta correlación nival. El herbazal de nevero y el pastizal húmedo (14,1% del área total) obtuvieron una correlación positiva con la mayoría de las variables del clima que son favorables a la nivación, así como larga duración de la nieve sobre el terreno (178,4 a 201,2 días/año). Como se esperaba, el herbazal de nevero colocó una extensa superficie (61,3%) sobre geoformas nivales —principalmente nichos de nivación activos y muy activos—, en tanto que el pastizal húmedo lo hizo (52,8%) sobre geoformas pronivales —principalmente valles periglaciares y flujos de soliflucción activos—.

Correlación nival media. El herbazal de roquedales, el pastizal seco y los matorrales abiertos y muy abiertos de piorno (41,2% del área total) obtuvieron una correlación positiva con la evolución de las variables del clima favorables a la nivación (117,6 a

Tabla 1. Correlación nival de la vegetación, a partir de sus relaciones espaciales y/o temporales con clima, duración de la nieve y geoformas. (HP) herbazal de pedreras, (HR) herbazal de roquedales, (HN) herbazal de nevotos, (PS) pastizal seco, (PSPE) pastizal seco con piorno y enebro, (PH) pastizal húmedo, (MAE) matorral abierto de enebro, (MAEP) matorral abierto de enebro con piorno, (MMAEP) matorral muy abierto de piorno, (MMAEP) matorral muy abierto de enebro con piorno, (MAP) matorral abierto de piorno, (MDP) matorral denso de piorno, (MDE) matorral denso de enebro y (MDEP) matorral denso de enebro y piorno.

	HP	HR	HN	PS	PSPE	PH	MAE	MAEP	MMAEP	MAP	MDP	MDE	MDEP
RELACION VEGETACION-CLIMA (1)													
Relación Temperatura-Vegetación (relac. inversa)													
T media anual	-0.763	-0.996	-0.768	-0.738	0.829	-0.800	0.257	-0.770	-0.152	0.728	-0.774	0.850	-0.007
T media anual de las máximas	-0.580	-0.951	-0.574	-0.512	0.665	-0.636	0.340	-0.674	0.041	0.809	-0.862	0.699	-0.254
T media anual de las mínimas	-0.917	-0.890	-0.939	-0.964	0.942	-0.917	0.083	-0.783	-0.426	0.470	-0.497	0.282	0.384
T media de primavera	-0.362	-0.733	-0.326	-0.160	0.416	-0.319	0.667	-0.355	0.498	0.852	-0.847	0.282	-0.576
T media de verano	-0.665	-0.975	-0.668	-0.635	0.751	-0.717	0.235	-0.731	-0.141	0.726	-0.791	0.809	-0.116
T media de otoño	-0.435	-0.567	-0.493	-0.692	0.512	-0.695	-0.580	-0.739	-0.777	0.119	-0.238	0.883	0.540
T media de invierno	-0.926	-0.896	-0.934	-0.904	0.925	-0.892	0.318	-0.731	-0.139	0.619	-0.599	0.811	0.274
Relación Precipitación-Vegetación (relac. directa)													
Precipitación anual	0.483	0.840	0.486	0.466	-0.582	0.625	-0.202	0.713	0.003	-0.798	0.871	-0.718	0.226
Precipitación invernal	0.504	0.195	0.489	0.392	-0.614	0.432	-0.320	0.479	0.126	-0.587	0.676	-0.608	0.405
Relación Días de nevada-Vegetación (relac. directa)													
Días de precipitación al año	-0.471	0.195	-0.434	-0.246	0.374	0.117	0.484	0.452	-0.161	-0.468	0.564	-0.202	0.092
Días de nevada al año	-0.366	0.306	-0.372	-0.360	0.281	-0.004	-0.082	0.276	-0.570	-0.703	0.749	-0.011	0.531
Días de nevada en otoño	-0.446	0.114	-0.388	-0.117	0.390	0.260	0.662	0.558	-0.124	-0.418	0.481	-0.251	-0.262
Días de nevada en invierno	0.102	0.705	0.113	0.159	-0.172	0.507	-0.110	0.694	-0.427	-0.951	0.980	-0.456	0.204
Días de nevada en primavera	-0.410	0.140	-0.446	-0.555	0.328	-0.314	-0.337	-0.084	-0.615	-0.502	0.540	0.255	0.830
Relación Duración de la nieve-Vegetación (relac. directa)													
Duración anual de la nieve	0.595	0.965	0.605	0.609	-0.652	0.798	-0.239	0.832	-0.115	-0.909	0.933	-0.766	0.019
Duración de la nieve en otoño	0.108	0.461	-0.388	0.440	-0.121	0.747	0.515	0.881	-0.003	-0.594	0.610	-0.630	-0.613
Duración de la nieve en invierno	0.456	0.830	0.481	0.558	-0.478	0.830	-0.098	0.882	-0.260	-0.938	0.927	-0.690	-0.188
Duración de la nieve en primavera	0.656	0.935	0.637	0.518	-0.724	0.593	-0.507	0.575	-0.099	-0.784	0.813	-0.629	0.318
Síntesis													
POSIT	POSIT	POSIT	POSIT	POSIT	NEGAT	POSIT	POSIT	POSIT	POSIT	POSIT	POSIT	NEGAT	POSIT
NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	NEGAT	POSIT
RELACION VEGETACION-DURACION DE LA NIEVE													
Índice de Duración Media de la Nieve	82.4	135.3	201.2	125.9	116.4	178.4	137.0	102.0	117.6	117.9	127.2	143.3	83.9
RELACION VEGETACION-GEOFORMA													
Geoformas nivales (2)	0.0	1.3	61.3	1.2	2.5	3.5	0.0	0.2	1.4	0.8	1.4	1.0	0.0
Geoformas pronivales (2)	0.0	23.2	8.5	0.5	0.1	52.8	0.1	0.5	2.1	0.5	2.2	1.8	0.0
Geoformas escasamente nivales (2)	0.0	0.0	5.0	1.8	2.5	24.1	0.2	1.2	15.5	28.3	19.3	17.2	0.0
Geoformas antiguas (3)	100.0	75.5	25.3	96.5	94.9	19.6	99.7	98.1	80.9	70.4	77.1	80.1	100.0
Capacidad de fitoestabilización (3)	9	8	14	12	11	13	6	7	10	5	4	3	2
CORREL. NIVAL DE LA VEGETACION													
BAJA	MEDIA	ALTA	MEDIA	MEDIA	NEGAT.	ALTA	BAJA	BAJA	MEDIA	NEGAT.	MEDIA	NEGAT.	BAJA
BAJA	MEDIA	ALTA	MEDIA	MEDIA	NEGAT.	ALTA	BAJA	BAJA	MEDIA	NEGAT.	MEDIA	NEGAT.	BAJA

(1) Índices de Correlación Pearson entre 18 variables del clima y 14 clases de vegetación

(2) Porcentaje de la superficie de la clase de vegetación que coincide con la geoforma.

(3) En orden invertido del 1 al 13

135,3 días/año). Aunque todos ellos colocaron la mayor parte de su superficie (>70%) sobre geoformas antiguas, también tuvieron una significativa correlación con geoformas nivales y pronivales.

Baja correlación nival. Esta situación caracteriza al herbazal de pedreras, los matorrales abiertos de enebro y de enebro con piorno, y los matorrales densos de enebro y de enebro con piorno (15,0% del área total). Su relación con las tendencias del clima y con la duración de la nieve se movió en un amplio margen (82,4 a 137,0 días/año). Como era de esperar, todas las clases coincidieron con geoformas antiguas y estables (98 y 100% de su superficie), principalmente mantos de alteración y campos de bloques estabilizados.

Correlación nival negativa. Corresponde al pastizal seco con piorno y enebro, matorral muy abierto de piorno con enebro, y matorral denso de piorno (29,7% del área total). No obstante obtener una larga duración de la nieve sobre el terreno (matorral denso de piorno= 143,3 días/año), la tendencia dinámica del grupo fue contraria a la evolución de las variables del clima que son favorables a la nivación. Asimismo, todas ellas colocaron la mayor parte de su superficie (>97%) sobre geoformas antiguas y escasamente nivales, principalmente mantos de alteración y afloramientos rocosos.

Tendencias evolutivas de la vegetación nival

La dinámica de la vegetación en el período 1957-1998 muestra una tendencia a la disminución de la vegetación con alta correlación nival (22,6 a 14,1% del total de la cuenca). El retroceso se debió a una fuerte caída del herbazal de neveros (ITMA = -0,025, -0,007, -0,021 y -0,012 en los distintos intervalos), que pasó de 58,6 a 29,1 ha en todo el período, en tanto que el pastizal húmedo mostró incrementos y pérdidas (ITMA = 0,001, -0,023, -0,011 y 0,005), pero que también resultaron en la reducción de su superficie, al pasar de 65,7 a 48,3 ha (Tabla 2).

La vegetación con correlación nival media también registró pérdidas, al pasar de 46,0 a 41,2%, debido a la reducción del matorral abierto de piorno (ITMA = 0,016, -0,011, -0,020 y -0,030), que pasó de 118,4 a 92,2 ha, en tanto que el herbazal de roquedales y el pastizal seco también se redujeron, aunque afectando a pequeñas superficies. Por su parte, el extenso matorral muy abierto de piorno mostró una tendencia irregular (ITMA = -0,015, 0,004, -0,039 y 0,069) que resultó en una ligera ganancia de su superficie (de 106,2 a 107,9 ha).

La vegetación con baja correlación nival tuvo un ligero decrecimiento —de 16,4 a 15,0%— que afectó principalmente al matorral abierto de enebro con piorno (ITMA = -0,003 en todo el período), que pasó de 39,2 a 34,0 ha en todo el período, seguido del matorral denso de enebro y piorno (ITMA = -0,003) que pasó de 24,0 a 21,7 ha. Los matorrales abierto y denso de enebro mostraron altibajos (ITMA = 0,001 y 0,000, respectivamente) que resultaron en una poco sensible expansión de su superficie.

La vegetación con correlación nival negativa obtuvo un claro incremento de su superficie —al pasar de 15,1 a 29,7%—, debido al crecimiento del extenso matorral

Tabla 2. Dinámica de la vegetación nival (1957-1998). Se indican superficies, porcentajes de cambio e índices de transformación media anual, por clases de vegetación y grupos de distinta correlación nival.

Tipo de vegetación	1957		1972		1984		1991		1998		Mean Annual Transformation Rate					
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	57-72	72-84	84-91	91-98	57-98	
<i>Alta correlación nival</i>																
Herbazal de nevoro	HV	58.62	10.6	40.13	7.3	36.69	6.7	31.58	5.7	29.10	5.3	-0.025	-0.007	-0.021	-0.012	-0.017
Pastizal húmedo	C	65.66	11.9	67.02	12.2	50.47	9.2	46.74	8.5	48.34	8.8	0.001	-0.023	-0.011	0.005	-0.007
Total		124.27	22.6	107.15	19.5	87.16	15.9	78.32	14.2	77.44	14.1					
<i>Correlación nival media</i>																
Herbazal de roquedales	RS	9.79	1.8	9.79	1.8	9.72	1.8	9.47	1.7	9.41	1.7	0.000	-0.001	-0.004	-0.001	-0.001
Pastizal seco	PF	18.60	3.4	17.69	3.2	16.80	3.1	16.43	3.0	16.78	3.1	-0.003	-0.004	-0.003	0.003	-0.003
Matarral muy abierto de piorno	PMA	106.24	19.3	84.83	15.4	89.34	16.2	67.73	12.3	107.86	19.6	-0.015	0.004	-0.039	0.069	0.000
Matarral abierto de piorno	PA	118.39	21.5	149.51	27.2	131.63	23.9	114.03	20.7	92.23	16.8	0.016	-0.011	-0.020	-0.030	-0.006
Total		253.02	46.0	261.83	47.6	247.48	45.0	207.67	37.7	226.29	41.2					
<i>Baja correlación nival</i>																
Herbazal de pedreras	PP	10.16	1.8	9.51	1.7	9.46	1.7	9.29	1.7	9.15	1.7	-0.004	0.000	-0.003	-0.002	-0.003
Matarral abierto de enebro	JA	15.12	2.7	15.64	2.8	15.05	2.7	14.91	2.7	15.94	2.9	0.002	-0.003	-0.001	0.010	0.001
Mar abierto de enebro con piorno	JAP	39.19	7.1	44.02	8.0	35.50	6.5	31.91	5.8	34.02	6.2	0.008	-0.018	-0.015	0.009	-0.003
Matarral denso de enebro	JD	1.75	0.3	1.75	0.3	1.82	0.3	1.79	0.3	1.75	0.3	0.000	0.004	-0.003	-0.004	0.000
Matarral denso de enebro y piorno	JP	24.04	4.4	22.98	4.2	24.22	4.4	23.40	4.2	21.68	3.9	-0.003	0.004	-0.005	-0.011	-0.003
Total		90.25	16.4	93.90	17.1	86.06	15.7	81.30	14.8	82.54	15.0					
<i>Correlación nival negativa</i>																
Pastizal seco con piorno y enebro	PPPJ	25.22	4.6	37.98	6.9	37.67	6.9	44.41	8.1	45.80	8.3	0.028	-0.001	0.024	0.004	0.015
M muy abierto de piorno con enebro	JMAP	26.47	4.8	16.19	2.9	23.50	4.3	26.42	4.8	36.85	6.7	-0.032	0.032	0.017	0.049	0.008
Matarral denso de piorno	PD	31.34	5.7	33.38	6.1	67.93	12.4	112.46	20.4	80.91	14.7	0.004	0.061	0.075	-0.046	0.023
Total general		83.03	15.1	87.55	15.9	129.09	23.5	183.29	33.3	163.56	29.7					
		550.58		550.43		549.79		550.58		549.83						

denso de piorno (ITMA = 0,004, 0,061, 0,075 y -0,046), que pasó de 31,3 a 80,9 ha. Asimismo, el pastizal seco con piorno y/o enebro creció (ITMA = 0,028, -0,001, 0,024 y 0,004) de 25,2 a 45,8 ha, en tanto que el matorral muy abierto de piorno con enebro obtuvo altos índices de crecimiento (ITMA = 0,008), pero que afectaron a una pequeña superficie.

Procesos de cambio

a) Datos por grupos de vegetación (1957-1998)

Tabla 3a

CNV	Alta	Media	Baja	Negativa	Total
Alta	53,9	28,9	2,7	14,5	100,0
Media	1,2	65,5	1,3	32,0	100,0
Baja	0,0	10,3	78,1	11,7	100,0
Negativa	1,1	24,8	6,3	67,8	100,0

b) Datos por clases de vegetación (1957-1998)

La Tabla 3a muestra la matriz de transición (1957-1998) entre los grupos de vegetación de alta, media, baja y negativa correlación nival. Aunque la mayor parte de la cuenca permaneció sin cambios, ocurrió una importante reducción de la vegetación con alta correlación Nival, que cedió el 28,9% de su superficie a la vegetación con correlación nival media y el 14,5% a la vegetación con correlación nival negativa. Asimismo, la vegetación con correlación nival media y baja cedieron el 32,0 y 11,7% a la vegetación con correlación nival negativa. En contraste, los procesos que suponen la expansión de la cubierta de nieve fueron muy bajos; por ejemplo, la vegetación con Correlación nival media cedió solo el 1,2% a la vegetación con alta correlación nival, en tanto que la vegetación con correlación nival negativa cedió solo el 1,1%.

La reducción de la vegetación con alta correlación nival se debió principalmente a la sustitución del herbazal de nevero y del pastizal húmedo por matorrales de piorno muy abiertos (24,6 y 14,0% de su superficie, respectivamente), abiertos (8,1 y 8,7%) y densos (9,1 y 8,1%) (Tabla 3b). Asimismo, la conversión de la vegetación con correlación nival media a correlación nival negativa, se debió principalmente a la sustitución del matorral abierto por matorral denso de piorno (41,7% de su superficie) y del matorral muy abierto de piorno por pastizal seco con piorno y enebro (15,3%). Por su parte, la reducción de la vegetación con baja correlación nival (16,4 a 15,0%) que pasó a correlación nival negativa, se debió a la sustitución del matorral abierto por matorral muy abierto de enebro y piorno (10,7% de su superficie). Otros procesos de cambio que fueron positivos, abarcaron superficies poco significativas.

No obstante la notable expansión de la vegetación con correlación nival negativa (15,1 a 29,7% del total en todo el período), este grupo también cedió superficie a la vegetación con correlación nival media o baja, debido principalmente a la conversión

Tabla 3b. Procesos de cambio entre catorce clases de vegetación (1957-1998). Datos en porcentaje respecto de las superficies de cada clase de vegetación al inicio del período de estudio. (HP) herbazal de pedreras, (HR) herbazal de roquedales, (HN) herbazal de neveros, (PS) pastizal seco, (PSPE) pastizal seco con piorno y enebros, (PH) pastizal húmedo, (MAE) matorral abierto de enebros, (MAEP) matorral abierto de enebros con piorno, (MMAEP) matorral muy abierto de piorno, (MMAEP) matorral muy abierto de enebros con piorno, (MAP) matorral abierto de enebros con piorno, (MDP) matorral denso de piorno, (MDE) matorral denso de enebros y (MDEP) matorral denso de enebros y piorno.

CNV	ALTA			MEDIA			BAJA			NEGATIVA				
	HN	PH	HR	PS	MMAP	MAP	HP	MAE	MAEP	MDE	MDEP	PSPE	MMAPE	MDP
HN	38,6	4,8		1,7	24,6	8,1		2,2	2,5			2,6	5,8	9,1
PH	1,4	63,9		0,1	14,0	8,7		0,0	0,4			1,9	1,3	8,1
HR		0,4	95,8			3,8								
PS	2,1			79,4	0,1	5,8		0,5				0,6		11,3
MMAEP	0,1	1,2		0,0	49,1	22,8		0,5	2,3		0,0	15,3	5,0	3,8
MAP	0,1	0,9	0,0	0,3	17,4	36,7		0,0	0,3		0,1	1,8	0,7	41,7
HP					6,4		89,9		3,7					
MAE	0,0	0,0		1,7	1,1	1,1		84,9	6,6				0,0	4,5
MAEP				0,0	15,9	4,6	0,0	0,1	58,6		0,6	7,5	10,7	2,0
MDE										100,0			0,0	
MDEP	0,0					0,0	0,0		3,7		88,3		8,0	0,0
PSPE					5,5	3,0						89,4		2,1
MMAPE	0,2	1,1		0,0		7,1		3,4	15,2		0,3	0,0	71,1	1,6
MDP	0,2	1,7		0,1	20,4	32,2		0,0	0,8			2,5	4,4	37,7

del matorral denso de piorno a matorral abierto (32,2% de su superficie) y muy abierto (20,4%), y del matorral muy abierto de enebro y piorno a matorral abierto de enebro y piorno (15,2%). Sin embargo, estos cambios fueron comparativamente muy inferiores a las ganancias y no están asociados a la nivación.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En los últimos cincuenta años las cuencas de La Condesa y Valdemartín mostraron una tendencia a la disminución de los dos grupos de vegetación más correlacionados con ambientes nivales. Así, mientras que la vegetación con alta correlación nival cedió el 43,4% de su superficie a la vegetación con correlación nival media y negativa; la vegetación con correlación nival media cedió 32,0% de su superficie a la vegetación con correlación nival negativa.

El proceso más significativo fue la disminución del herbazal de neveros activos (ITMA = -0,017) que perdió el 24,6% de su superficie, así como del pastizal húmedo de las áreas pronivales activas y valles periglaciares (ITMA = -0,007) que perdió el 14,0%. El análisis de los procesos de cambio permitió establecer una principal serie sucesional de cambios que llevan a la sustitución de la vegetación de alta correlación nival por comunidades cada vez más desarrolladas y alejadas de la influencia de la nieve, iniciando por un matorral muy abierto de piorno (*Cytisus carpetanus*), el cual se densifica paulatinamente hasta ser sustituido (22,8%) por un matorral abierto, y este (41,7%) por un matorral denso (ITMA = 0,023).

La explicación es compleja y se relaciona con la disminución del período nival. Los herbazales de neveros y los pastizales húmedos se caracterizan por su escasa distribución y alta especialización, siendo altamente dependientes de la protección que brindan las cubiertas de nieve (Keller *et al.* 2000, Beniston 2003) y/o de la alteración de la dinámica fluvial y de los suelos orgánicos (un metro de espesor) y pobremente drenados donde se distribuyen (Sanz 1979, Rivas-Martínez *et al.* 1999, Walker *et al.* 1993, Palacios *et al.* 2003, Andrés y Palacios 2004).

Además, la disminución del período nival limita la efectividad de la nieve y del agua del deshielo como agentes erosivos, permitiendo mayor estabilidad geomorfológica y desarrollo de suelos. Cabe destacar que, como el período de crecimiento de las plantas inicia antes y es más extenso que hace cincuenta años, se permite el incremento de la temperatura del suelo y del microclima (Walker *et al.* 1993, Keller *et al.* 2000). Bajo estas condiciones, los matorrales de piorno, caracterizados por su capacidad para tolerar situaciones de *stress*, como incendios o fuertes vientos (Palacios y García 1997, Peñuelas *et al.* 2002, Beniston 2003, Sanz-Elorza *et al.* 2003), son altamente competitivos y logran colonizar en sitios con orientaciones poco favorables a la acumulación de nieve (143,3 días/año), incluyendo los bordes de los neveros y pequeñas cabeceras y laderas de barrancos (Andrés y Palacios 2004).

En las laderas altas y cumbres de la cuenca (2000-2200 msnm), una parte de los matorrales muy abiertos de piorno fue sustituida (15,3% de su superficie) por pastizales secos de *Festuca curvifolia* con arbustos dispersos de piorno y enebro (ITMA= 0,015). La explicación reside, no solo en la disminución de las cubiertas nivales espesas y duraderas —a las cuales el pastizal es altamente sensible (Sanz 1979, Rivas-Martínez *et al.* 1999)—, sino en la tolerancia del pastizal a la exposición a los fuertes vientos y a las bajas temperaturas del suelo en invierno, así como a los incrementos térmicos y decrementos de los volúmenes de lluvia, que suponen situaciones de estrés durante el verano (Walker *et al.* 1993, Keller *et al.* 2000, Peñuelas *et al.* 2002, Palacios *et al.* 2003, Pauli *et al.* 2003).

Nosotros creemos que el reajuste dimensional de las clases de vegetación ha estado regido por la evolución del clima y sus consecuencias sobre la duración de la nieve, destacando las temperaturas medias anuales, de la primavera y el invierno (Peñuelas *et al.* 2002, Palacios *et al.* 2003, Pauli *et al.* 2003, Sanz-Elorza *et al.* 2003, Del Río y Penas 2006), así como la disminución de la precipitación pluvial y nival, como los principales factores. Otros factores ambientales, como el uso del suelo, los incendios, la contaminación y las prácticas de irrigación y fertilización, se consideran como poco significativos, por lo menos en el caso de las montañas mediterráneas (Rivas-Martínez *et al.* 1989, Fernández-González 1991), donde el comercio de la nieve dejó de ser importante desde principios del siglo XX, y las prácticas ganaderas y los incendios son de baja intensidad y no han mostrado cambios significativos desde hace varias décadas (Valenzuela 1977, Peñuelas *et al.* 2002, Sanz-Elorza *et al.* 2003).

BIBLIOGRAFÍA

ANDRÉS, N. y D. PALACIOS

2004 «Interrelación nieve/geomorfología en la sierra de Guadarrama: altas cuencas del ventisquero de La Condesa y Valdemartín». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 30: 85-116.

BENISTON, M.

2003 «Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59/31: 5-31.

DEL RÍO, S. y A. PENAS

2006 «Potential distribution of semi-deciduous forests in Castile and Leon (Spain) in relation to climatic variations». *Plant Ecology*, 185: 269-282.

FAGRE, D.B., D.L. PETERSON y A.E. HESSL

2003 «Taking the pulse of mountains: ecosystems responses to climatic variability». *Climatic Change*, 59: 263-282.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F.

1991 «La vegetación del valle del Paular (Sierra de Guadarrama, Madrid)». *Lazaroa*, 12: 153-272.

- GAVILÁN, R., F. FERNÁNDEZ GONZÁLEZ y C. BLASIC
1998 «Climatic classification and ordination of the Spanish Sistema Central: relationships with potential vegetation». *Plant Ecology*, 139: 1-11.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (INM)
1995 Valores normales y estadísticos de estaciones principales (1961-1990). *Observatorio de Madrid «Puerto de Navacerrada»*. Madrid: INM.
2002 «Observatorio Meteorológico de Madrid ‘Puerto de Navacerrada’». En *Valores normales y estadísticos de los observatorios meteorológicos principales (1971-2000)*. Volumen 4. Madrid, Castilla La Mancha y Extremadura. Madrid: INM, pp. 67-86.
- KELLER, F., F. KIENAST, M. BENISTON
2000 «Evidence of response of vegetation to environment change on high-elevation sites in the Swiss Alps». *Regional Environmental Change*, 1/ 2: 70-77.
- NYBERG, R.
1991 «Geomorphic processes at snowpatch sites in the Abisko Mountains, Northern Sweden». *Z. Geomorph.* N.F. 35/3: 321-343.
- PALACIOS, D., M. García
1997 «The influence of nival erosion on the distribution of high mountain vegetation to snow cover: Peñalara, Spain». *Catena*, 30: 1-40.
- PALACIOS, D., N. ANDRÉS, E. LUENGO
2003 «Distribution and effectiveness of nivation in mediterranean mountains: Peñalara (Spain)». *Geomorphology*, 54: 157-178.
- PAULI, H., M. GOTTFRIED, G. GRABHERR
2003 «Effects of climate change on the alpine and nival vegetation of the Alps». *Journal of Mountain Ecology*, 7 (suppl.): 9-12.
- PEÑUELAS, J., I. FILELLA, P. COMAS
2002 «Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region». *Global Change Biology*, 8: 531-544.
- RAPP, A.
1960 «Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings, north Scandinavia». *Geografiska Annaler*, 42: 65-200.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., P. CANTÓ, F. FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, C. NAVARRO y D. SÁNCHEZ-MATA
1989 *Sinopsis de la vegetación saxícola del sistema central*. Madrid: Universidad Complutense, Facultad de Farmacia.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S., P. CANTÓ, F. FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, J.A. MOLINA, J.M. PIZARRO y D. SÁNCHEZ-MATA
1999 «Sinopsis of the Sierra de Guadarrama vegetation». *Itinera Geobotánica*, 13: 189-206.

SANZ, C.

1979 «El mosaico de geofacias supraforestales en la zona más elevada de la Sierra de Guadarrama». En *VI Coloquio de Geografía*. Palma de Mallorca: Asociación de Geógrafos Españoles, pp. 243-248.

SANZ -ELORZA, E.D. DANA, A. GONZÁLEZ, E. SOBRINO

2003 «Changes in high-mountain vegetation of the Central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming». *Annals of Botany*, 92: 273-280.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

1976 «Relación de valores normales correspondientes a Observatorios Principales con datos del período 1931-60». Madrid: SMN (policop.).

UNIT GEO SOFTWARE DEVELOPMENT (UGSD)

2001 *ILWIS 3.0 Academic User's Guide*. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).

VALENZUELA, M.

1977 *Urbanización y crisis rural en la Sierra de Madrid, Madrid*. Madrid: Instituto de Estudios de Administración Local.

WALKER, D.A., J.C. HALFPENNY, M.D. WALKER, C.A. WESSMAN

1993 «Long-term studies of snow-vegetation interactions». *BioScience*, 43/5: 287-301.