

EVOLUCIÓN RECIENTE DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD Y TEMPERATURA EN LAS MONTAÑAS ESPAÑOLAS Y SU RELACIÓN CON LA CUBIERTA NIVOSA

Enrique MORÁN TEJEDA¹, Sixto HERRERA², J. Ignacio LÓPEZ MORENO³,
Jesús REVUELTO³ y Martín BENISTON¹

¹*Institute for Environmental Studies, Universidad de Ginebra, Suiza*

²*Instituto de Física de Cantabria, CSIC-Universidad de Santander, España*

³*Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, España*

**enrique.moran@unige.ch, sixto@predictia.es, nlopez@ipe.csic.es, jrevuelto@ipe.csic.es,
martin.beniston@unige.ch**

RESUMEN

En este trabajo se estudian la evolución y las tendencias que han experimentado, durante las últimas cuatro décadas, las condiciones climáticas en las montañas de la España peninsular. En lugar de estudiar las series climáticas estándar, se han desarrollado unos índices combinados de humedad y temperatura basados en los extremos de las distribuciones de frecuencias de las series diarias de precipitación y temperatura. El objetivo es por lo tanto reproducir la evolución de condiciones específicas diarias que pueden tener relación directa con la acumulación de nieve en las zonas de montaña. Las series diarias de precipitación y temperatura se han obtenido de la malla climática recientemente desarrollada «Spain02», para el periodo 1970-2007. Los índices estudiados son los siguientes: SC (días secos-cálidos), SF (secos-fríos), HC (húmedos-cálidos) y HF (húmedos fríos). Los resultados muestran un incremento considerable del número de días/año con condiciones SC y HC, así como un descenso notable del número de días/año con condiciones SF y HF, lo cual indica una prevalencia de la tendencia creciente experimentada por las temperaturas sobre una evolución más estacionaria de la precipitación. La evolución del manto de nieve en los Pirineos presenta una correlación negativa con la frecuencia de días secos y cálidos en primavera, en algunos casos, y en otros una correlación positiva con la frecuencia de días secos-fríos y húmedos fríos; lo cual indica cierta sensibilidad del mismo a los índices climáticos seleccionados.

Palabras clave: Montañas, precipitación, temperatura, índices combinados, manto de nieve, Península Ibérica.

ABSTRACT

We study the evolution and trends of climatic conditions in the main mountain chains of the conterminous Spain. For this, indices that combine the tails of the frequency distribution of daily precipitation and temperature were calculated. The objective was to reproduce the evolution of the specific daily conditions that can lead to snow accumulation and/or melting in the mountainous areas. The indices, for the period 1970-2007 were: SC (dry-warm days), SF (dry-cold), HC (wet-warm) and HF (wet-cold). Results show a significant increase in the number of days with warm conditions (both SC and HC) with the correspondent decrease in the number of days with cold conditions (SF and HF). The evolution of the snowpack in the Pyrenees showed a negative and significant correlation with the frequency of dry-warm days in spring, and in some cases a positive correlation with the frequency of dry-cold and wet-cold days. This indicates a sensibility of the snowpack the evolution of the selected indices.

Key words: Mountains, precipitation, temperature, combined indices, snowpack, Iberian Peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas de montaña son áreas especialmente sensibles a las variaciones climáticas, debido a los fuertes contrastes energéticos que se producen en espacios reducidos, por los gradientes de altitud y las distintas exposiciones de las laderas (García-Ruiz, 1990). Las montañas actúan como auténticas «islas climáticas» en las que se registran normalmente condiciones más frías y húmedas con respecto a los territorios adyacentes. Esto les confiere además un papel como reservorios naturales de recursos hídricos, alcanzando una importancia esencial en zonas con tendencia a la aridez climática estacional, como puede ser la cuenca mediterránea (Vivirioli & Weingartner, 2004). Los recientes cambios en las variables climáticas, como consecuencia del «calentamiento global» pueden tener por lo tanto un impacto notable en la variabilidad y disponibilidad de los recursos hídricos que se almacenan en las montañas tanto en forma líquida, como en el manto de nieve, que introduce una inercia estacional en cuanto a la generación de escorrentía. La acumulación de nieve en las montañas es un proceso dependiente de unas condiciones atmosféricas específicas, como la combinación de humedad y bajas temperaturas que den lugar a la nevada, así como la posterior persistencia de bajas temperaturas para que se consolide el manto nivoso.

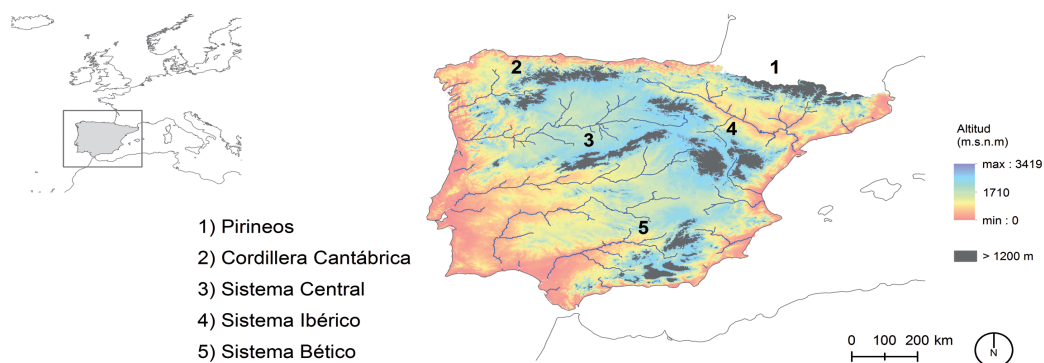


FIG. 1: La península Ibérica y sus principales sistemas montañosos.

Existe un consenso general en que las temperaturas han aumentado en las últimas décadas como consecuencia del cambio climático (Salomon et al., 2007). Por el contrario, las precipitaciones no muestran una señal homogénea de cambio. Tal es el caso del territorio español, en el que la mayoría de los estudios evidencian un incremento térmico paulatino y homogéneo en el territorio, a la vez que las precipitaciones muestran evoluciones contrastadas entre territorios, y en cualquier caso con una señal de cambio a largo plazo débil, cuando no inexistente (p.ej. Bladé & Castro-Díez, 2010). Los numerosos estudios que se han realizado al respecto han tratado, sin embargo, las variables climáticas por separado, y en general se desconoce cómo ha sido la evolución conjunta de las condiciones de humedad y temperatura. En los lugares de montaña, los investigadores dan cada vez más importancia al estudio de las condiciones combinadas de precipitación y temperatura, ya que permiten un conocimiento más profundo del comportamiento climático debido a los *feedbacks* mutuos que se pueden generar entre las variables (Beniston et al., 2011; López-Moreno et al., 2011), y permiten inferir las consecuencias de la evolución climática sobre la acumulación y fusión del manto de nieve.

En este trabajo se estudian la evolución y tendencias recientes de índices combinados de precipitación y temperatura en las montañas de la España peninsular (Figura 1), durante el periodo 1970-2007. La hipótesis principal es que un cambio a largo plazo en las condiciones de humedad y temperatura en las montañas debería provocar cambios correspondientes en el espesor y duración del manto de nieve. Este trabajo constituye la primera aproximación realizada sobre la evolución de las condiciones climáticas en las montañas españolas (Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sistema Central, Sistema Ibérico y Sistema Bético) en relación a la acumulación del manto de nieve.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La base de datos climáticos utilizada para realizar el estudio ha sido extraída de la malla climática Spain02 (Herrera et al., 2012), que presenta series de precipitación, temperaturas máximas y mínimas diarias para el periodo 1950-2007, con una resolución de 0.2° (aprox. 20 kms). Para asegurarnos la cobertura espacial del territorio ocupado por las cadenas montañosas, sin comprometer la capacidad de la base de datos para reproducir las condiciones climáticas de montaña, se seleccionó un umbral de elevación de 1.200m, de tal forma que todos los píxeles de la base de datos con una elevación media igual o superior a los 1.200m fueron seleccionados para los análisis (Fig. 1). Como aseguran los autores de la base de datos (Herrera et al., 2012), el número de estaciones utilizadas para construirla varía notablemente a lo largo de los años, llegando a estabilizarse más o menos a comienzos de los 70. Por ello, y a pesar de que las series climáticas se extienden desde 1950 hasta el 2007, para asegurarnos la detección de tendencias con cierta homogeneidad regional, se seleccionó como periodo de estudio el comprendido entre 1970 y 2007.

La resolución diaria de la base de datos permite el estudio de eventos más o menos extremos o alejados de la media. Siguiendo el método propuesto por Beniston (2009) se elaboraron unos índices de condiciones combinadas de humedad y temperatura alejadas de las condiciones medias, con el objetivo de acercarnos a las condiciones que pueden favorecer u obstaculizar la presencia de nieve en las montañas. El cálculo de los índices incluye (para el periodo diciembre-mayo de 1970-2007):

- Separación de los días sin lluvia ($P < 0.1$ mm), de la serie de precipitación, y cálculo del percentil 25 (p_{25}) de la serie con $P > 0.1$ mm. Los días con $P < 0.1$ mm (p_0) se consideraron «días secos» y los días con $P > p_{25}$ se consideraron días húmedos.
- Cálculo de los percentiles 25 (t_{25}) y 75 (t_{75}) de las series de temperaturas. Los días con $T < t_{25}$ se consideraron «días fríos» y los días con $T > t_{75}$ se consideraron «días cálidos».
- Combinación de los umbrales de humedad y temperatura (p_0 , p_{25} , t_{25} y t_{75}) para obtener tipos de días: SC (días secos y cálidos), SF (días secos y fríos), HC (días húmedos y cálidos) y HF (días húmedos y fríos).

Una vez calculadas las series de excedencia para cada índice, es decir el número de días/año correspondiente a cada clase, se realizó un análisis de tendencias por separado para el conjunto de los meses de invierno (diciembre-febrero) y el conjunto de los meses de primavera (marzo-mayo). El análisis incluyó, por un lado, el ajuste por el método de mínimos cuadrados de una regresión lineal con el objetivo de conocer los valores en la línea de ajuste al principio y al final de la serie, y así obtener una magnitud del cambio; y por otro lado la aplicación del test no paramétrico de Mann-Kendall para evaluar la significación estadística de las tendencias.

Para estudiar la evolución del manto de nieve, se utilizaron las series de espesor nival de las montañas españolas recogidas por el programa ERHIN (Evaluación de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación). La calidad de los datos sólo hizo posible el estudio de las series de espesor de nieve en primavera en los Pirineos. Un total de 84 series, con un dato de espesor por año, registrado en pértigas fijas cubriendo el territorio pirenaico fueron utilizadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 2 y 3 muestran la evolución de las series de excedencia correspondientes a cada clase (los modos «secos» en la Fig. 2 y los «húmedos» en la Fig. 3), en cada cadena montañosa. Se trata de las series promediadas de todos los píxeles correspondientes a cada sistema montañoso, y suavizadas con una media móvil de 5 años, para favorecer la visualización de ciclos y tendencias. De forma general, de las figuras se pueden extraer varias conclusiones: 1) el número de días con condiciones SC y HC muestra en general una evolución creciente (excepto en el caso de los días SC en invierno), mientras que los días con condiciones SF y HF muestran una evolución decreciente, siendo por lo tanto las temperaturas el factor principal de cambio; 2) en primavera las tendencias para la todos los índices, son más acusadas que

en el invierno; 3) la evolución de los índices, con los ciclos de ascenso y descenso es muy similar en todas las cadenas montañosas, en general se aprecia un paulatino ascenso (descenso) para los modos cálidos (fríos), y un ligero cambio de tendencia en los últimos años de la serie. Siendo estas unas conclusiones generales, en los mapas de la Figura 4 se muestran las tendencias para cada píxel de la base de datos y se puede comprobar cierta variabilidad en la distribución de las mismas en el espacio. Se aprecia por ejemplo que en el invierno, en la mayoría de los píxeles no se registran tendencias significativas, pero en algunos territorios como los sectores sureños del Sistema Central y el Sistema Bético o en el caso de los días SF también en el Pirineo occidental, las tendencias (de uno y otro signo) sí son significativas. Por otro lado se observa también como los Pirineos muestran la señal de cambio más homogénea y acusada de entre todos los sistemas montañosos. Después, el sector suroeste del Sistema Central también presenta tendencias acusadas y significativas. Por el contrario las montañas Béticas son las que presentan una señal de cambio más atenuada de entre los sistemas estudiados.

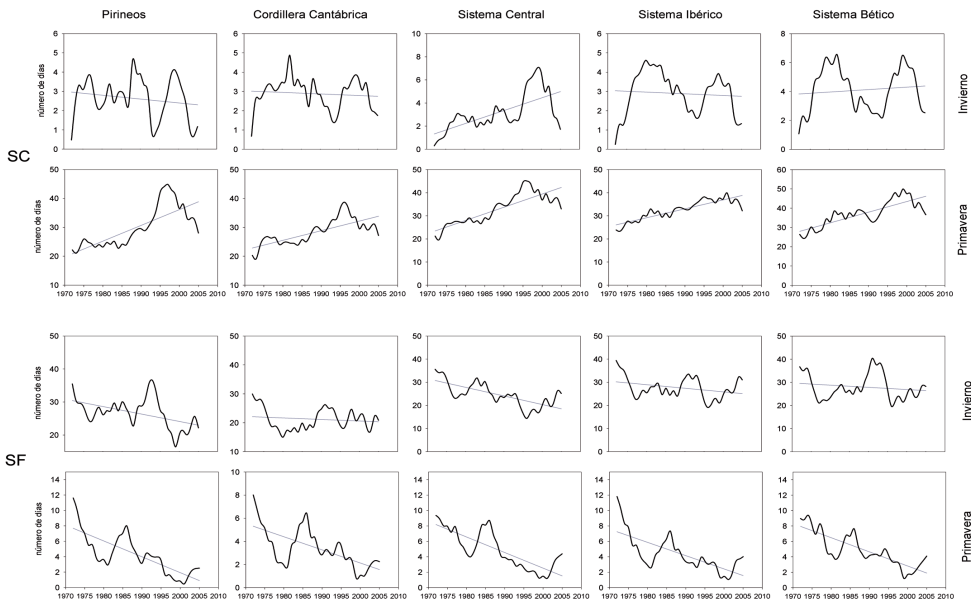


FIG. 2: Evolución de los índices combinados (modo «seco») para invierno y primavera, de las series promedio de cada sistema montañoso.

Para hacernos una idea de cuál ha sido la magnitud del cambio se han calculado los valores inicial y final de la recta de ajuste de cada índice, para cada serie promediada de cada sistema montañoso (las líneas de tendencia de las figuras 2 y 3). Mediante este análisis se han obtenido, por una lado el valor absoluto de cambio (n) al restar el valor final del valor inicial y por otro el valor relativo (f , de inglés *fold-change*) que permite comparar distintos casos, resultado de dividir ambos valores. En la tabla 1 se muestran ambos coeficientes. Los valores nos confirman lo apuntado líneas arriba. Las magnitudes de cambio más acentuadas se han producido en la primavera, y en los Pirineos. Con estas ha habido un aumento de 15 días con condiciones SC en primavera, o un descenso de en torno a 10 días con condiciones SF tanto en el invierno como en la primavera. En cuanto a los modos «húmedos», ha ascendido en 6 el número de días con condiciones HC, y han descendido en torno a 5, los días con condiciones HF en primavera. En el Sistema Central, se observa que los valores de cambio han sido similares, y ligeramente menores en la Cantábrica, el Sistema Ibérico y el Bético, registrando este último, no obstante un incremento de 18 en el número de días SC en primavera. Los coeficientes de cambio relativo muestran en gran parte de los casos incrementos de más del doble ($f > 2.0$), y en ocasiones se han multiplicado por más de 5 y hasta por 8 veces entre el principio y el final del periodo.

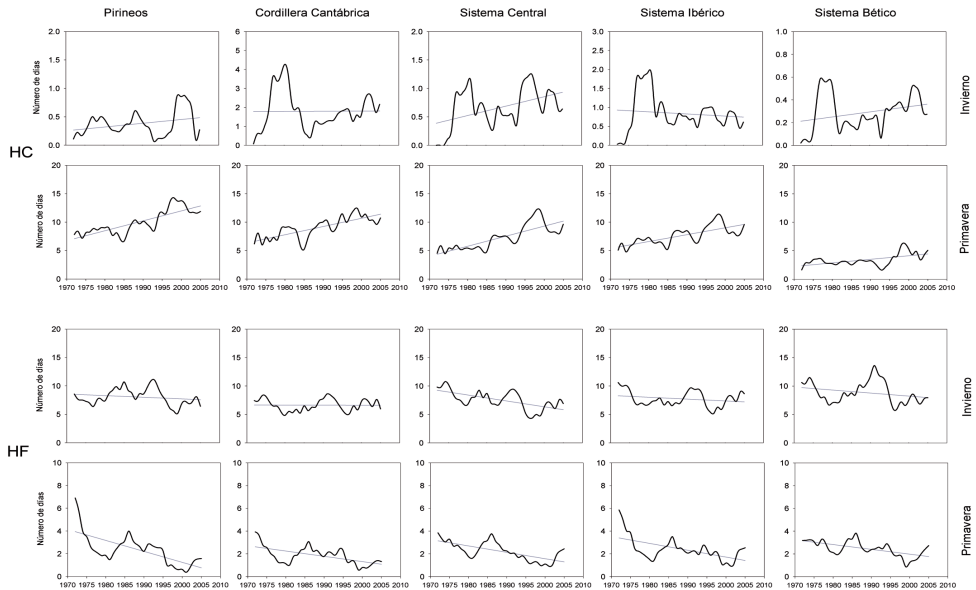


FIG. 3: Evolución de los índices combinados (modo «húmedo») para invierno y primavera, de las series promedio de cada sistema montañoso.

Índice	Pirineos		C. Cantábrica		S. Central		S. Ibérico		S. Bético	
	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>f</i>	<i>n</i>	<i>f</i>
SC Inv	-0.2	-1.1	-0.1	-1.0	3.2	3.5	0.0	1.0	0.8	1.2
SC Prim	15.3	1.7	9.9	1.4	17.8	1.8	12.6	1.5	18.2	1.7
SF Inv	-10.2	-1.5	-2.8	-1.1	-11.7	-1.6	-5.2	-1.2	-3.9	-1.1
SF Prim	-9.2	-91.6	-5.6	-7.0	-7.5	-6.2	-7.8	-8.6	-6.5	-4.3
HC Inv	0.2	2.0	0.4	1.3	0.5	2.5	0.0	-1.1	0.1	1.6
HC Prim	6.0	1.9	5.4	1.9	6.2	2.5	4.5	1.8	3.0	2.5
HF Inv	-1.6	-1.2	-0.1	-1.0	-3.1	-1.5	-1.0	-1.1	-1.8	-1.2
HF Prim	-4.6	-16.2	-2.2	-3.6	-2.0	-2.5	-2.8	-3.2	-1.3	-1.7

TABLA 1: Coeficientes de cambio en las series promediadas de los índices climáticos para cada sistema montañoso. *n*: número de días (valor de cambio absoluto); *f*: fold-change (valor de cambio relativo). En negrita se resaltan los cambios significativos con un 95% de confianza.

Los resultados muestran por lo tanto un cambio homogéneo de las condiciones climáticas en las montañas españolas, A priori parece que las temperaturas son el principal factor de cambio; sin embargo, como demostrase Beniston (2009) en un análisis más profundo del comportamiento de las precipitaciones y temperaturas cuando se alcanza cada una de las modalidades combinadas, en distintas capitales europeas, las precipitaciones también juegan su papel. En concreto se demostró que la cantidad media de precipitación durante el modo «húmedo-frío» había disminuido, mientras que durante el modo «húmedo-cálido» había aumentado. A priori, las tendencias observadas parecen indicar que la acumulación de nieve en las montañas ha debido disminuir durante el periodo estudiado.

En la Figura 5 (A) se muestra la evolución media del espesor del manto de nieve en los Pirineos (en el resto de montañas los datos no eran lo suficientemente buenos como para construir series fiables) a finales de abril-principio de mayo. La línea negra es la serie media regional, mientras que

el sombreado gris representa el rango intercuartil de las 84 series de nieve analizadas. Se aprecia una evolución decreciente durante el periodo de registro (1986-07), si bien con una leve recuperación en la última década. El grosor del rango intercuartil muestra, sin embargo, variabilidad espacial entre series. Un análisis de componentes principales nos ha permitido extraer los dos patrones de evolución más comunes, los cuales muestran una evolución decreciente, pero con distinta dinámica inter-anual. La figura 5 (B) muestra los coeficientes de correlación de Pearson de cada uno de los índices estudiados (en cada uno de los 20 píxeles correspondientes a los pirineos), con las series de los componentes principales extraídos. Se observa que el PC1 está correlacionado negativa y significativamente con la frecuencia de días secos-cálidos en primavera (SCp), esto es, con las condiciones que dan lugar a la desaparición del manto nival. Por su parte el PC2 se correlaciona de forma significativa con la frecuencia de días húmedos-fríos y secos-fríos en la primavera, es decir, con las condiciones que dan lugar a la precipitación nivosa, y a la posterior consolidación del manto de nieve. Estos resultados son coherentes desde un punto de vista climatológico, pues el manto de nieve parece responder con sensibilidad a las condiciones combinadas de precipitación y temperatura. También Beniston et al. (2011) demostraron, en su caso para los Alpes, que el manto de nieve mostraba una fuerte anti-correlación con la evolución del número de días secos-cálidos. Hay que añadir, no obstante, que los coeficientes de correlación obtenidos no son de gran magnitud. Ello puede deberse a la propia estructura de los datos de nieve, ya que no contamos con series diarias de espesor nival, sino con un solo dato de espesor en la primavera, lo cual puede estar enmascarando una evolución del manto específica en cada punto de medición.

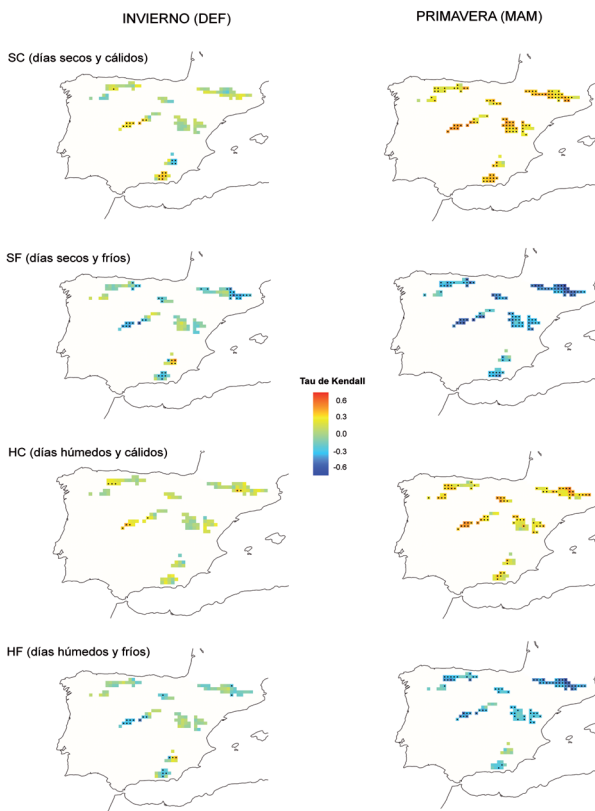


FIG. 4: Tendencias en los índices combinados para invierno y primavera. Los colores fríos indican tendencia negativa y los colores cálidos tendencia positiva. Los puntos negros indican que la tendencia es significativa con un 95% de confianza.

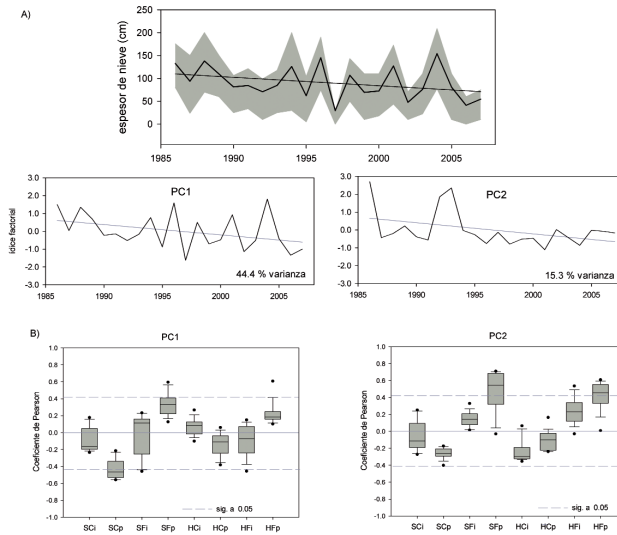


FIG. 5: A) Evolución del espesor medio del manto de nieve en los Pirineos (sombreado = rango intercuartil), y de los dos patrones más comunes de cambio (componentes principales 1 y 2). B) Correlación entre los índices climáticos para cada píxel de los Pirineos, y los dos patrones más comunes de evolución del manto de nieve.

En este trabajo queda demostrado que el uso de índices climáticos puede ser de gran utilidad para predecir la evolución del manto de nieve. López-Moreno et al. (2005) demostraron anteriormente en los Pirineos que el manto de nieve se correlacionaba en gran medida con las precipitaciones de los meses precedentes y en menor medida, en primavera, también con las temperaturas. Hamlet et al. (2005), para las montañas del oeste de Norteamérica, observó que las tendencias regresivas del *snow water equivalent* (una medida de la cantidad de agua contenida en la nieve) se explicaban a largo plazo por el aumento de las temperaturas, pero su variabilidad «decadal» respondía a la evolución de las precipitaciones. Este tipo de observaciones pone de manifiesto la necesidad de ampliar el conocimiento sobre las relaciones entre la cubierta nivosa y las variables climáticas, con el objeto de simular su evolución en futuras condiciones de cambio climático. La duración de la cubierta de nieve en las montañas tiene numerosas implicaciones ecológico-medioambientales (ecosistemas de montaña, recursos hídricos), y socioeconómicas (como el turismo de invierno, la producción hidroeléctrica, o el regadío). Recientemente se ha demostrado un cambio en las aguas altas de primavera en las cabeceras de ríos ibéricos (López-Moreno et al., 2011; Morán-Tejeda et al., 2011), indicando una fusión nival más temprana debido a las crecientes temperaturas. Por otro lado, los deportes de invierno juegan un importantísimo papel en las economías de las zonas de montaña. Ejemplos de una expansión en el sector podemos verlos en el reciente incremento de la inversión en el Pirineo central, con la ampliación de las estaciones aragonesas; la construcción proyectada de una nueva estación de esquí en San Glorio, Cordillera Cantábrica; o la reciente disputa entre los ayuntamientos de Zaragoza y Barcelona para optar a la candidatura de los Pirineos (aragonés y catalán, respectivamente) para organizar los juegos olímpicos de invierno de 2020. El futuro éxito de estos proyectos radica enormemente en la evolución de las condiciones nivales en las próximas décadas. Por ejemplo, Uhlman et al. (2009) pronosticó una reducción del manto de nieve, y del número de días «esquiabiles» en las estaciones de esquí de los Alpes suizos para el curso del siglo XXI. No es arriesgado pensar que este puede ser el caso de las estaciones de esquí españolas, aunque hará falta una modelización exhaustiva para corroborarlo. Mientras tanto, los políticos, legisladores e inversores deberían considerar las actuales observaciones científicas con el fin de minimizar los impactos medioambientales y económicos de una potencial reducción de la cubierta de nieve en las montañas ibéricas.

4. CONCLUSIONES

Las condiciones climáticas en las montañas españolas han sufrido un cambio sistemático durante los últimos 40 años, con un aumento significativo del número de días y la duración de rachas con condiciones secas y cálidas y húmedas y cálidas, y un descenso en sus respectivos modos fríos. La señal de cambio es homogénea en todos los sistemas estudiados, si bien es más fuerte en los Pirineos, y más débil en las montañas Béticas.

El manto de nieve (en los Pirineos) ha sufrido una reducción durante las dos últimas décadas. En la mayoría de puntos de muestreo el espesor del manto muestra una correlación negativa con la frecuencia de días secos-cálidos de primavera, esto es, de las condiciones favorables a la fusión nival. En otros casos también se aprecia una correlación positiva con la frecuencia de días húmedos-fríos y secos-fríos, es decir, las condiciones que favorecen la persistencia del manto de nieve.

Este trabajo constituye la primera aproximación sobre el estudio combinado de las condiciones climáticas y el manto de nieve en las montañas españolas. Aunque los resultados muestran evidencias de un cambio en las variables consideradas, es necesario profundizar en su estudio con el objeto de realizar predicciones fiables sobre la disponibilidad futura del manto de nieve.

REFERENCIAS

- Beniston, M. 2009. Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected to 2100. *Geophysical Research Letters*, 36, L07707, doi: 10.1029/2008GL037119
- Beniston, M., Uhlmann, B., Goyette, S. & Lopez-Moreno, J. I. 2011. Will snow-abundant winters still exist in the Swiss Alps in an enhanced greenhouse climate?. *Int. J. Climatol.*, 31: 1257–1263. doi: 10.1002/joc.2151
- Bladé, I. & Castro-Díez, Y. 2010. Tendencias atmosféricas en la Península Ibérica durante el periodo instrumental en el contexto de la variabilidad natural. En F. Pérez & R. Boscolo, (Eds). *Clima en España: pasado, presente y futuro*. 25-42 pp.
- García-Ruiz, J.M. 1990. La montaña: Una perspectiva geocológica. En: García-Ruiz, J.M. (Ed): *Geocología de las áreas de montaña*. Geoforma Ediciones. Logroño. Pp 15-31.
- Hamlet, A. F., Mote, P. W., Clark, M. P. & Lettenmaier. 2005 D. P. Effects of temperature and precipitation variability on snow pack trends in the western U.S. *J. Clim.* 18: 4545-4561.
- Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D. and Fernández, J. (2012), Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int. J. Climatol.*, 32: 74–85. doi: 10.1002/joc.2256
- López-Moreno, J.I. 2005. Recent variations of snowpack depth in the central Spanish Pyrenees. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 37.
- López-Moreno, J. I., Beniston, M. & García-Ruiz, J. M. 2008. Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change* 61:300-312.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Kenawy, A., Beniston, M.(2011): Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation Winter modes in the Mediterranean mountains: observed relationships and projections for the 21st Century, *Global and Planetary Change*, 77, 62-76.
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J.I., Ceballos-Barbancho, A. & Vicente-Serrano, S.M. 2011. River regimes and recent hydrological changes in the Duero basin (Spain). *Journal of Hydrology* 404 (3-4):241-258.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z. & Marquis, M. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press New York.
- Uhlmann, B., Goyette, S. and Beniston, M. (2009), Sensitivity analysis of snow patterns in Swiss ski resorts to shifts in temperature, precipitation and humidity under conditions of climate change. *Int. J. Climatol.*, 29: 1048–1055. doi: 10.1002/joc.1786
- Viviroli, D. & Weingartner, R. 2004. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences* 8:1016-1029.