

## **EFFECTO COMBINADO DE LA TEMPERATURA Y LA PRECIPITACIÓN EN LA ACTIVIDAD DE GRANDES ALUDES EN EL PIRINEO ORIENTAL**

**S. MANGUÁN\*, C. GARCÍA-SELLÉS<sup>1</sup>, G. MARTÍ<sup>1</sup>, P. OLLER<sup>1</sup>, P. MARTÍNEZ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Unitat de Riscos Geològics  
Institut Geològic de Catalunya

### **RESUMEN**

*Este estudio trata sobre la influencia de la variabilidad de la precipitación y la temperatura durante los días previos a la ocurrencia de grandes aludes en el Pirineo Oriental. Se establece el carácter diario de la precipitación y la temperatura combinadas mediante cuatro modos (CD: frío/seco; CW: frío/húmedo; WD: cálido/seco; WW: cálido/húmedo) a partir de la caracterización por cuantiles de ambas variables. El modo CD presenta la mayor frecuencia durante los 30 días anteriores a los episodios de aludes en la zona de dominio climático mediterráneo, mientras que en la zona de dominio atlántico la mayor frecuencia corresponde a días de carácter CW. Los resultados sugieren que los modos invernales pueden considerarse proxy data en la predicción de avalanchas, para conocer la potencialidad del manto a activar grandes aludes.*

### **1. INTRODUCCION**

El objetivo de este trabajo es comprobar si los modos combinados temperatura-precipitación en invierno pueden considerarse un proxy data en la predicción de avalanchas cuando no se dispone de datos de campo sobre las condiciones de estabilidad estructural y mecánica del manto nivoso. Por otra parte, se evalúa la evolución de los modos combinados relacionados con la actividad de grandes aludes en las últimas décadas.

Varios estudios ya han puesto de manifiesto cómo cambiarían las condiciones de distribución del manto nivoso estacional en alta montaña en un "clima cálido" a finales del siglo XXI en los Alpes (Beniston et al., 2003; Uhlmann et al., 2009) y en las montañas mediterráneas (López-Moreno et al., 2011). Sin embargo, son escasos los estudios que se

centran en los efectos de las condiciones climáticas en la evolución de la estabilidad del manto nivoso, que puede acabar en el desencadenamiento de avalanchas de nieve. En este estudio se investiga la influencia de la variabilidad de la precipitación y la temperatura durante los días previos a la ocurrencia de actividad de grandes aludes. La estructura del manto nivoso es el resultado de los efectos de los factores meteorológicos sobre la nieve, que producen continuamente cambios en el tipo de grano y sus condiciones mecánicas. La variabilidad de la temperatura y la precipitación puede contribuir a la degradación progresiva de la estabilidad del manto nivoso mediante el desarrollo de capas débiles en su interior, incluso ambos parámetros meteorológicos pueden también actuar como factores desencadenantes directos, en caso de fuertes nevadas, lluvia o calor. La cuestión es que las condiciones meteorológicas no siempre actúan de la misma manera en el desencadenamiento de aludes, ya que en función del estado previo del manto nivoso un episodio meteorológico puede ser o bien detonante de aludes, o bien favorecer la estabilización del manto. Así, la variabilidad de la precipitación y de la temperatura a escala temporal puede convertir un manto estable en inestable y viceversa.

El enfoque de la distribución combinada de temperatura y precipitación se ha utilizado en este trabajo para entender mejor la evolución temporal de la estructura del manto y su capacidad de desencadenar avalanchas. Para ello, se han definido cuatro modos de combinación de temperatura y precipitación, que son frío/seco (CD), frío/húmedo (CW), cálido/seco (WD) y cálido/húmedo (WW). Estos modos se han identificado a escala diaria para evaluar la relación entre la actividad de grandes avalanchas y la evolución meteorológica no sólo del día de la actividad de avalanchas (efecto desencadenante) sino durante la secuencia de días previos, que es cuando el manto nivoso va sufriendo los metamorfismos que lo van a dejar en un estado más o menos sensible al desprendimiento (efecto degradante). Finalmente, se comparará la evolución en el tiempo de los cuatro modos en el Pirineo Oriental con la evolución acaecida en los Alpes Suizos, a fin de observar cuál es la frecuencia temporal de los días CD, CW, WD y WW en las últimas décadas en relación a las condiciones de cambio climático en montaña.

## **2. DATOS Y METODOLOGÍA**

Los datos meteorológicos empleados en este estudio han sido suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). Las estaciones escogidas se encuentran entre 1000 y 2300 m y comprenden tanto la zona occidental de clima oceánico, como la oriental donde prevalecen condiciones climáticas de carácter mediterráneo. Se han desechado aquellas series que no han superado las pruebas de tolerancia y consistencia interna (Esteban et al., 2012). Finalmente, se ha trabajado con cuatro estaciones: Vielha (1002 m) y Bonaigua (2266 m), ubicadas en la zona de influencia atlántica, y La Molina (1704 m) y Vall de Núria (1967 m) situadas en el sector mediterráneo. Los datos analizados corresponden a los meses de noviembre a abril, lapso de tiempo de ocurrencia de grandes aludes, del periodo de inviernos de 1969-1970/2011-2012. En el sector oceánico, la

estación de Vielha cubre los inviernos de los periodos 1969-1970 a 1992-1993 y de 1995-1996 a 2000-2001 y la estación de Bonaigua comprende el periodo de 2001-2002 a 2011-2012. Actualmente, no existe ninguna serie consistente que cubra la década de los 90 de forma completa, motivo por el cual los resultados adolecen de la suficiente solidez para considerarlos concluyentes. No obstante, consideramos que sí que entreamos una línea de trabajo a seguir una vez se vayan recuperando y completando series de montaña en distintos proyectos de investigación de cambio climático ([www.bsc.es](http://www.bsc.es)).

Para el sector mediterráneo del Pirineo Oriental se ha creado una única serie a partir de las series de La Molina y de Núria entre los años 1970 y 2012. Se han utilizado los trece años comunes, 1985 a 1997, con el fin de aplicar un modelo de regresión lineal y reconstruir la serie de Núria. Los coeficientes de correlación son significativos con un nivel de confianza del 99% y 13 grados de libertad (Tabla 1).

	Corrección La Molina-Núria	r	significación
T mín	-1,04°C	0,842	<0,01
T max	-1,62°C	0,892	<0,01

Tabla 1. Corrección realizada sobre los datos de la Molina con el objetivo de construir una sola serie climática en el sector mediterráneo. Factor de correlación y nivel de significación de dicha corrección.

La información sobre la ocurrencia de avalanchas proviene de la Base de Datos de Aludes de Catalunya (BDAC) del Institut Geològic de Catalunya (IGC). Se han identificado los episodios de actividad de grandes aludes desde 1970 hasta 2006. Hemos considerado un episodio de actividad de grandes aludes (EGA) como una unidad definida por un intervalo de tiempo (igual o superior a un día) sin variaciones en las condiciones sinópticas durante el cual se ha registrado una o más avalanchas (no se han considerado las desencadenados artificialmente) (García-Sellés et al., 2009). Se han considerado como aludes de grandes dimensiones, en un sentido amplio, los que exceden 1000 m de recorrido, que hayan llegado hasta el fondo del valle, o hayan destruido masa forestal o dañado infraestructuras, en general avalanchas de medidas superiores a las habituales (Schaerer, 1986). Con estos criterios se han identificado 17 episodios de grandes avalanchas, 11 de los cuales tuvieron lugar en el área mediterránea y 6 en la atlántica.

Por lo que respecta a la metodología empleada, para establecer el carácter combinado de la precipitación y de la temperatura en los días previos a los episodios de aludes, se ha utilizado la aproximación de cuantiles combinados definida por Beniston and Goyette (2007) y ya aplicada por López-Moreno et al. (2011) en el Pirineo para evaluar los efectos de cambios en la circulación general atmosférica sobre la termometría y pluviometría. Se han calculado los percentiles 40% y 60%, tanto para la temperatura (T) como para la precipitación (P). A partir de estos umbrales se han clasificado los días en cuatro modos: CD (frío/seco) cuando ambos

cuantiles eran iguales o inferiores a  $T_{40} - P_{40}$ , siendo el subíndice el umbral cuantil; y así, CW (frío/húmedo):  $T_{<40} - P_{>60}$ ; WD (cálido/seco):  $T_{>60} - P_{<40}$ ; WW (cálido/húmedo):  $T_{>60} - P_{>60}$ . Los percentiles de precipitación se han calculado sólo en base a los días con  $P_{>0}$  y todos los días con  $P_{=0}$  son considerados secos. Los modos invernales se han calculado para todos los días de la serie de noviembre a abril.

La hipótesis de trabajo es que en la ocurrencia de grandes avalanchas, la estructura interna del manto nivoso, generada por condiciones meteorológicas a escala temporal multi-día, puede tener un papel tan fundamental como las condiciones meteorológicas desencadenantes de escala temporal horaria. Generalmente, la bibliografía existente enfatiza el papel de la meteorología en los tres días previos al desencadenamiento de grandes avalanchas; en concreto, el espesor de nieve acumulado a lo largo de los tres días ( $H_{72}$ ) previos al evento es el parámetro a partir del cual se establecen los mapas de riesgo de avalanchas, ya que se considera representativa del volumen de nieve que la avalancha va a movilizar en la zona de salida (Salm et al., 1990; Burkard and Salm, 1992). No obstante, las acumulaciones de nieve reciente en las tres jornadas previas son una condición necesaria pero no suficiente para generar un episodio de avalanchas excepcionales, como se desprende del reanálisis de la situación catastrófica de febrero de 1999 en los Alpes franceses (Vilicrose, 2001). Las causas meteorológicas directas desencadenantes como nevadas intensas o lluvias persistentes no siempre provocan grandes avalanchas debido a las condiciones previas de inestabilidad del manto nivoso, las cuales son resultado de las condiciones meteorológicas a largo plazo (García-Sellés et al. 2010). El objetivo es conocer la combinación de temperatura y precipitación durante los días previos a un episodio de grandes aludes, ya que de su comportamiento depende la susceptibilidad de la estratigrafía del manto a soportar una sobrecarga; por ello se va a prestar especial atención a los 30 días previos a un EGA

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No hay diferencias en las funciones de densidad de probabilidad de los modos invernales a escala diaria para el conjunto de la serie de 43 inviernos entre la zona de influencia atlántica y la mediterránea (Tabla 2), siendo el modo WD (mediterráneo-oceánico: 34%-32%,) el más frecuente, seguido de CD (29%-23%), CW (7%-9%) y el menos frecuente WW (3%-5%). Hay concordancia con lo que sucede en los Alpes, donde el modo WD alcanza un 36% en el periodo 1960-1991 (Beniston et al., 2011). De esta distribución se desprende que la ocurrencia de las mayores precipitaciones muestra una dependencia de la temperatura, en el sentido que los días de mayor precipitación van asociados a días con temperaturas especialmente bajas en ambos dominios climáticos.

Es interesante observar que aparecen diferencias apreciables en la distribución de los modos invernales diarios entre la serie completa y los 30 días previos a un EGA, y lo hacen siguiendo distintos patrones en ambas zonas (Tabla 3). En la zona mediterránea se invierte el carácter termométrico de los días secos, pasando a ser los días fríos/secos CD los

predominantes (29%) antes de un episodio, seguidos de los cálidos y secos WD (23%), los fríos y nivosos CW (12%) y los cálidos y lluviosos/nivosos WW (4%). En el dominio oceánico se mantiene el mismo orden de la distribución entre la serie invernal y los 30 días previos a un EGA (WD, CD, CW y WW), pero destaca el incremento de días fríos y nivosos, duplicándose el porcentaje. El comportamiento climático de los 30 días previos a un EGA es distinto entre la zona mediterránea y la atlántica. En la zona mediterránea son predominantes los días CD, mientras que en el atlántico los más frecuentes son los WD; otra diferencia es el mayor peso que tienen los días CW en el dominio oceánico respecto a lo que sucede en el ámbito mediterráneo. El aumento de días CW es menor en el caso mediterráneo que en el caso oceánico. Probablemente esto vaya relacionado con que las advecciones de norte y noroeste suelen ser persistentes y acumular cantidades muy abundantes de nieve que den lugar a un EGA, mientras que en el sector mediterráneo los episodios de nevadas muy abundantes no son tan persistentes (menor aumento del modo CW). En este sentido, estos resultados son acordes con las conclusiones de estudios realizados sobre actividad de avalanchas y condiciones sinópticas en el Pirineo Oriental que apuntan que las advecciones de noroeste son la principal causa de EGAs en el dominio climático oceánico (García-Sellés et al., 2009).

DISTRIBUCIÓN DE LOS MODOS COMBINADOS EN LA SERIE HIBERNAL (%)		
	Ámbito oceánico	Ámbito mediterráneo
WD cálido/seco	31,5	33,7
CD frío/seco	22,9	29,2
CW frío/húmedo	9,4	6,5
WW cálido/húmedo	5,0	3,2

Tabla 2. Distribución de las frecuencias de los modos combinados en la serie hibernal de 1970-71 a 2010-11 en los dominios climáticos oceánicos y mediterráneos.

DISTRIBUCIÓN DE LOS MODOS COMBINADOS EN LOS 30 DIAS PREVIOS A UN EGA (%)		
	Ámbito oceánico	Ámbito mediterráneo
WD cálido/seco	31,1	23,0
CD frío/seco	20,6	29,4
CW frío/húmedo	18,3	11,5
WW cálido/húmedo	6,1	4,2

Tabla 3. Distribución de las frecuencias de los modos combinados en los 30 días previos a un EGA del periodo 1970-71 a 2005-06 en los dominios climáticos oceánicos y mediterráneos.

Las distribuciones de los modos combinados se han sometido a la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, para comprobar si hay diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de los modos de las series invernales y las de los 30 días previos a un EGA (Kruskal y Wallis, 1952). Se han comparado también las poblaciones de los modos

combinados en los EGA entre el ámbito oceánico y el mediterráneo. Pese a haber diferencias apreciables en los órdenes y porcentajes de frecuencias con implicaciones en la evolución del manto nivoso, en ningún caso pueden considerarse que los grupos sean estadísticamente diferentes entre sí.

### **Ámbito mediterráneo.**

A la vista de los resultados, las condiciones meteorológicas para gestar un EGA en la zona mediterránea son distintas de las condiciones climáticas de temperatura y precipitación a lo largo del invierno. En concreto, el periodo de 30 días previo a una EGA se caracteriza en el sector mediterráneo por un aumento de la frecuencia de días fríos ( $T_{<40}$ ) y de los días húmedos ( $P_{>60}$ ) respecto a la media; en cuanto a los modos combinados temperatura-precipitación, lo más notable es la disminución de días cálidos/secos WD, aumentan ligeramente los CW y se mantienen los días CD y los WW. El modo frío/seco CD es el más frecuente (29%).

La persistencia de días fríos favorece procesos de metamorfismo de gradiente térmico del manto nivoso de orden medio y alto, responsables de la formación de capas internas débiles formadas por granos de nieve sin cohesión denominados facetas y cubiletes. Estas capas débiles internas permanecen en el manto prolongadamente, del orden de semanas, por lo que se denominan capas débiles persistentes (Haegeli y McLung, 2007). Este tipo de estratigrafía permite el colapso espontáneo de capas de nieve superiores más densas, cuando se supera el umbral de sobrecarga, habitualmente cuando se producen precipitaciones abundantes con sobreacumulaciones de nieve compactada por el viento, fuertes aumentos térmicos o lluvias intensas, para el caso de avalanchas de carácter excepcional. La persistencia de días fríos también favorece la formación de cristales de escarcha en la superficie de la nieve, que una vez cubiertos por nuevas nevadas suponen una capa débil persistente muy frágil, que, por tanto, facilita el desprendimiento espontáneo de capas de nieve suprayacentes. En definitiva, los periodos fríos generan estratigrafías inestables que permiten el desencadenamiento espontáneo de avalanchas días o semanas después de su formación, una vez se sobrepasa su capacidad de sobrecarga.

El EGA del 31 de enero de 2006 en el sector mediterráneo es un ejemplo de manto inestable previo a las nevadas desencadenantes de las avalanchas. Durante la primera quincena de enero, con predominio de días CD y un manto de poco espesor (entre 50-100 cm), se formaron capas internas persistentes (cubiletes y facetas) (Figura 1). A final de mes, tres días de nevada con 90 cm, dieron lugar al desprendimiento de grandes avalanchas en la sierra del Cadí-Moixeró, con destrucción de masa forestal madura. En el sondeo por percusión y perfil estratigráfico efectuado el día previo al EGA en la zona de La Molina, muy próxima a las zonas de avalanchas, se observa el manto viejo de 0 a 60 cm muy incohesivo formado por cubiletes muy desarrollados (3-4 mm de diámetro) en la base (0-40 cm) y facetas (entre 40-60 cm), incluso con un nivel de escarcha enterrado (en torno a los 60 cm). De 60 a 160 cm se observan todos los niveles correspondientes a las precipitaciones de los tres días previos, con durezas incluso superiores a los niveles subyacentes.

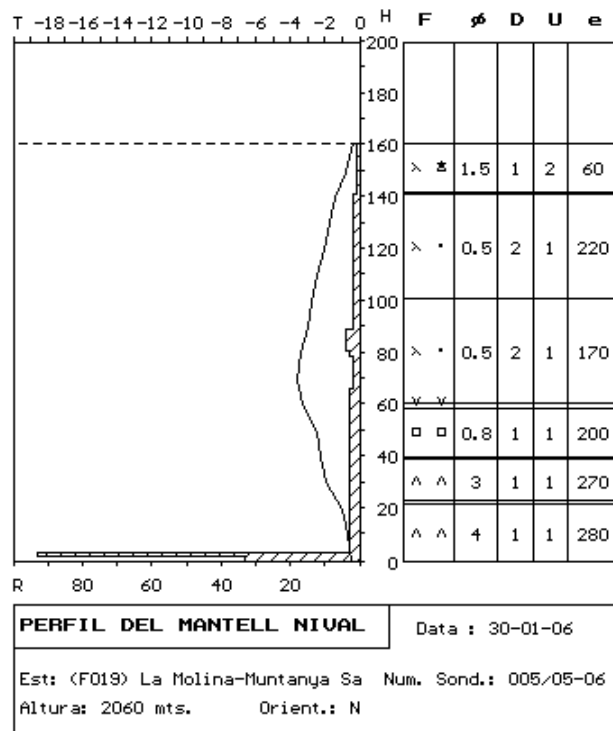


Figura 1. Sondeo por percusión y perfil estratigráfico efectuado el 30 de enero de 2006 en La Molina, sector de dominio mediterráneo (IGC).

El predominio de mantos nivosos de espesores moderados en el sector mediterráneo acrecienta el efecto que el enfriamiento ambiental tiene en la generación de elevados gradientes térmicos de la nieve, ya que a igualdad de temperaturas superficiales de la nieve, a menor espesor del manto, mayor es el gradiente térmico del mismo.

### Ámbito oceánico.

Atendiendo a la distribución de frecuencias de modo hibernal calculadas, las condiciones meteorológicas en el periodo de 30 días previo a una EGA en la zona oceánica no difieren apreciablemente de las condiciones climáticas de temperatura y precipitación a lo largo del invierno. En concreto, apenas hay cambios en el carácter térmico de los días, pero sí es destacable el aumento de días de precipitaciones elevadas. En cuanto a los modos combinados temperatura-precipitación, lo más notable es el aumento de días fríos/húmedos CW, mientras que apenas hay variaciones en el resto. El modo WD es el más frecuente (31%).

Puede afirmarse por ello que los procesos degradantes del manto nivoso, formación de capas débiles persistentes con efectos a medio y largo plazo en la inestabilidad del manto, no son determinantes en la actividad de EGAs en el ámbito oceánico. En todo caso, juegan un papel menor que en el dominio climático mediterráneo. Una menor proporción de días fríos que de días cálidos no significa necesariamente que no existan condiciones propicias para el

enfriamiento del manto y para un metamorfismo de gradiente medio y alto. Los días cálidos/secos, especialmente si son días sin precipitación, se dan en alta montaña en situaciones de anticiclones dinámicos, no térmicos, cercanos a la península Ibérica, asociados a subsidencias con temperaturas anómalamente elevadas y humedades relativas muy bajas, a menudo inferiores al 10%. Es difícil la formación de nubosidad y por tanto de día y de noche los cielos están despejados. A través de la monitorización del manto nivoso con termistores colocados a distintas profundidades del manto nivoso, hemos observado que en dichas condiciones de baja humedad ambiental y vientos flojos el enfriamiento superficial del manto nivoso por irradiación es tal vez el proceso de enfriamiento de mayor intensidad horaria, en cuanto a breve pero intenso, de escala horaria, limitado al periodo nocturno, en que el balance energético del manto nivoso es claramente negativo en la primera mitad del invierno (Male, 1980). Por otra parte, los espesores abundantes del manto nivoso propios de un clima más nivoso amortiguan los efectos comentados que días cálidos/secos tienen sobre el gradiente térmico de la nieve, ya que a mayor espesor, mayor diferencia de temperatura es necesaria entre la superficie y la base del manto.

El efecto de una mayor presencia de días fríos/húmedos en los EGA en el sector oceánico debe entenderse como una mayor disponibilidad de nieve reciente que favorece el desencadenamiento de avalanchas de grandes dimensiones por rotura de la estructura estelar, sin necesariamente depositarse por encima de un manto previamente inestable. El incremento de nieve reciente en 72 horas es considerado clásicamente como uno de los elementos determinantes para el desencadenamiento de grandes avalanchas (Bocchiola et al., 2008). Efectivamente el modo combinado CW se concentra en los 5 días previos al desencadenamiento de un EGA, a diferencia de lo que sucede en el ámbito mediterráneo. En los 5 días previos a un EGA el modo CW está presente en un 67% en el dominio oceánico (9% en la serie invernal), por un 42% en el ámbito mediterráneo (un 6% en la serie invernal).

El EGA del 2 de enero de 2004 en el sector oceánico es un ejemplo de situación de actividad de avalanchas debida enteramente al evento meteorológico desencadenante, nevadas intensas con viento del noroeste, independientemente del estado previo en que se hallaba el manto nivoso antes de la nevada. En las 5 jornadas previas al EGA se acumulan 135 cm de nieve reciente. Durante los 25 días precedentes se suceden días secos, sin apenas nevadas significativas, con predominio del modo WD y alguna secuencia de días CD. Observando el perfil nivológico efectuado el primer día de precipitación (Figura 2), la nevada se deposita sobre un manto de poco espesor (capas entre 40-85 cm); no se aprecia una estratigrafía resultado de un metamorfismo de gradiente alto en la nieve vieja (tampoco en otras orientaciones más umbrías), propia de un manto reducido de inicio de invierno. Al contrario, el manto internamente presenta capas de resistencia moderada, formadas por granos finos (capas entre 40 cm y el suelo). Las avalanchas arrancan por encima del contacto con la nieve vieja, sin que esta se incorpore a la nieve movilizable.



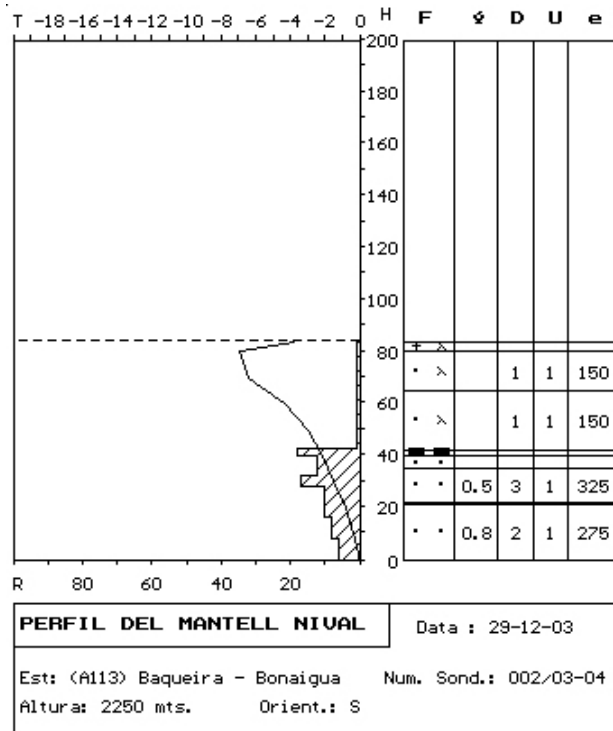


Figura 2. Sondeo por percusión y perfil estratigráfico efectuado el 29 de diciembre de 2003 en el Port de la Bonaigua, sector de dominio oceánico (IGC).

### Evolución temporal de los modos combinados.

Respecto a la evolución del riesgo de grandes avalanchas en las próximas décadas, es interesante observar cómo han evolucionado en las últimas 40 años los modos combinados relacionados con la actividad de EGAs (Figuras 3 y 4). El modo CD, responsable del debilitamiento interno del manto nivoso ha sufrido una disminución de su frecuencia, especialmente en la década de los 70 (43 días en 39 años). No obstante parece haberse estabilizado en los últimos 20 años. El modo CW, responsable del aporte de nieve fresca en grandes cantidades que facilita el desencadenamiento de grandes avalanchas ha disminuido en el ámbito mediterráneo desde la década de los 80, pero se está incrementando en el ámbito oceánico (7 días en 36 años). A pesar de estos resultados, la alta variabilidad interanual de este modo asegura inviernos nivosos y EGAs (1995-1996, 2005-2006) en el ámbito mediterráneo, aunque el modo WD se incremente sostenidamente año tras año (13 días en la última década). En la tabla 4 se observan los resultados de las tendencias tras aplicar los tests de Kendall y Spearman, con significación estadística en la mayoría de ellos.

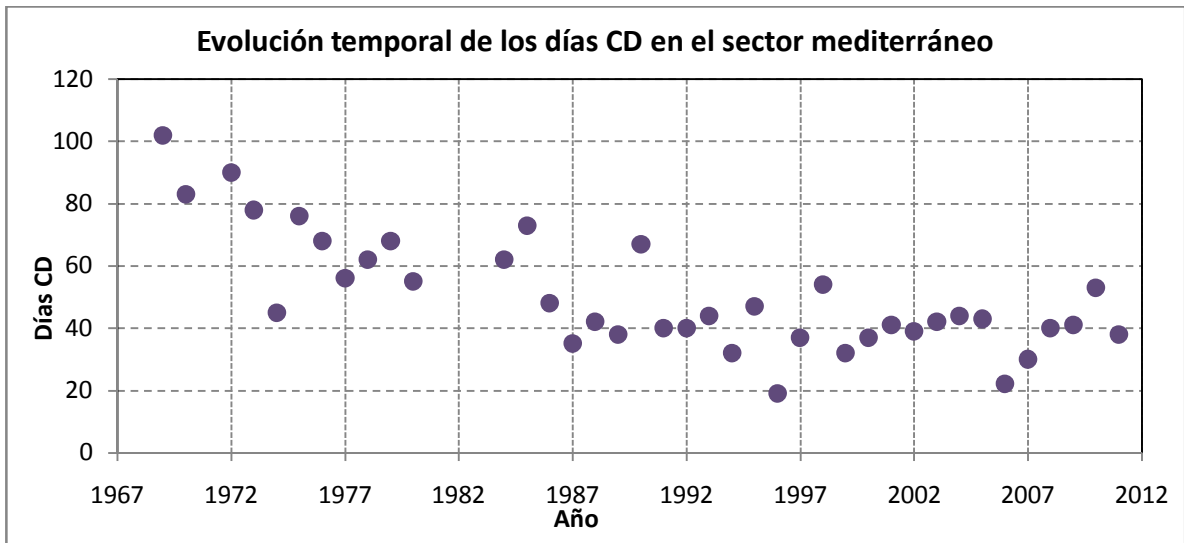


Figura 3: Evolución del número de días fríos/secos en el sector de influencia mediterránea desde la temporada 1969-70 a la 2011-12.

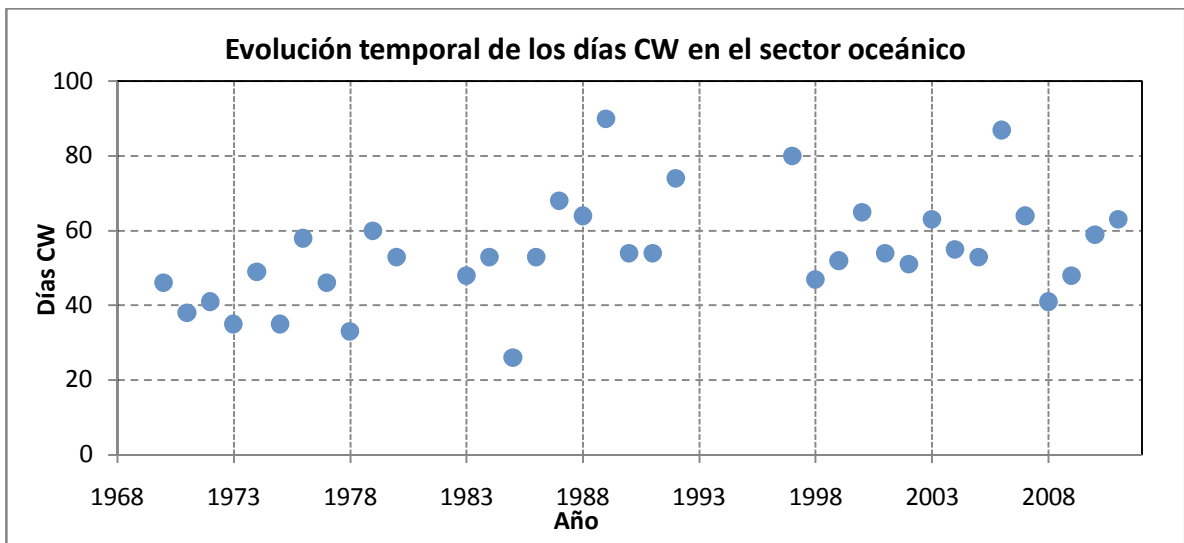


Figura 4: Evolución del número de días fríos/húmedos en el sector de influencia oceánica desde la temporada 1970-71 a la 2011-12.

Modos Combinados	Tendencia en el sector mediterráneo (días por temporada)	Tendencia en el sector atlántico (días por temporada)
CD	-1,1**	-0,3*
CW	-0,2**	+0,2*
WD	+1,3**	+0,5**
WW	+0,1**	+0,0

Tabla 4: Evolución registrada en los diferentes modos diarios para los sectores mediterráneo y oceánico. Nivel de significación estadística: \*Nivel de significación estadística del 95%, \*\*Nivel de significación estadística del 99%.

#### 4. CONCLUSIONES

- El uso de los modos combinados T-P aporta una perspectiva climática al estudio de la ocurrencia de grandes avalanchas, al caracterizar el comportamiento combinado de la precipitación y la temperatura en el periodo previo al desencadenamiento de un EGA.
- Los resultados sugieren que el régimen meteorológico previo a la activación de grandes avalanchas en el Pirineo Oriental tiene una mayor dependencia de las precipitaciones en el sector atlántico (avalanchas que involucran nieve reciente poco o nada transformada), mientras que en el sector mediterráneo un elemento fundamental para la activación de grandes avalanchas parece ser la progresiva desagregación interna del manto nivoso por efecto de fuertes gradientes térmicos causados por largas secuencias de días fríos y secos. Dicha hipótesis deberá ser consolidada mediante el análisis de nuevas series meteorológicas de alta montaña, a medida que éstas se vayan homogeneizando y reconstruyendo.
- En cuanto a la tendencia de las condiciones meteorológicas propicias a grandes avalanchas, las condiciones que favorecen este riesgo natural han sufrido una disminución general en las últimas décadas, semejante al registrado en los Alpes, aunque el comportamiento es distinto entre los ámbitos mediterráneo y oceánico. Por otra parte, la fuerte variabilidad observada no permite afirmar que este riesgo vaya a disminuir próximamente.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta línea de investigación se inscribe en los trabajos desarrollados en el seno del proyecto CTP-2010 Proyecto de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos "Influencia del Cambio Climático en el Turismo de Nieve en los Pirineos".

#### 5. REFERENCIAS

Beniston, M., Keller, F., Koffi, B. and Goyette, S., 2003. Estimates of snow accumulation and volume

- in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 76, pp. 125-140.
- Beniston, M. and Goyette, S., 2007. Changes in variability and persistence of climate in Switzerland; exploring 20th century observations and 21st century simulations. *Global and Planetary Change*, 57, pp. 1-20.
- Beniston, M., Uhlmann, B., Goyette, S., and López-Moreno, J.I., 2011. Will snow-abundant winters still exist in the Swiss Alps in an enhanced greenhouse climate? *International Journal of Climatology*, 31, pp., 1257-1263.
- Bocchiola, D., Bianchi Janetti, E., Gorni, E., Marty, C., and Sovilla, B., 2008. Regional evaluation of three day snow depth for avalanche hazard mapping in Switzerland, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 685-705, doi:10.5194/nhess-8-685-2008.
- Burkard, A. and Salm, B., 1992. Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d0 zur Berechnung von Fliesslawinen /Estimate of the average release depth d0 for the calculation of flowing avalanches. *Internal Report of the Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research*, No. 668, Davos, Switzerland, (en alemán).
- Esteban, P., Duran, M. and Aguilar, E., 2012. Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008). *Pirineos*, 167(0): 87-106 doi: 10.3989/Pirineos.2012.167005.
- García-Sellés, C., Martí, G., Oller, P., Moner, I., Gavalda, J., Martínez, P. and Peña, J.C., 2009. Major avalanche occurrence at regional scale and related atmospheric circulation patterns in the Eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*, 59, pp. 106-118.
- García-Sellés, C., Peña, J.C., Martí, G., Oller, P. and Martínez, P., 2010. WeMOi and NAOi influence on major avalanche activity in the Eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology* 64, pp. 137-145.
- Haegeli, P., and McClung, D.M., 2007. Expanding the snow climate classification with avalanche relevant information - initial description of avalanche winter regimes for south-western Canada. *Journal of Glaciology*, 53, 266-276.
- Kruskal, W.H. and Wallis, W.A., 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47 (260): 583-621.
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Morán-tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., Kenawy, M. and 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, pp. 62-76.
- Male, D.H. 1980. The seasonal snowcover. In *Dynamics of the Snow and Ice Masses*, S. Colbeck (Ed.). Academic Press, Toronto, pp. 305-395.
- Salm, B., Burkard, A., and Gubler, H., 1990. Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen (Avalanche calculations: a practical method with examples). *Eidg. Inst.Schnee und Lawinenforsch. Mitt.*, 47, 41 pp., (en alemán).
- Schaerer, P., 1986. Weather patterns for majos avalanches. *The Avalanche Review*, Vol. 4, 3, pp. 2.
- 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 condition of climate change. *International Journal of Climatology*, 29, pp. 1048-1055.
- Villecrose, J., 2001. Les avalanches de janvier et fevrier 1999 dans les Alps du Nord Françaises. *La Météorologie*, 8° série, vol.32, pp 11-12.
- [www.bsc.es](http://www.bsc.es) Proyecto ESCAT, Generación de Escenarios Climáticos con Alta Resolución para Catalunya. Centro Nacional de Supercomputación.