

## **OCURRENCIA DE EPISODIOS DE GRANDES ALUDES EN EL PIRINEO ORIENTAL Y RELACIÓN CON LA OSCILACIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE**

**CARLES GARCÍA<sup>1\*</sup>, JUAN CARLOS PEÑA<sup>2</sup>, GLÒRIA MARTÍ<sup>1</sup>, PERE OLLER<sup>1</sup>  
Y PERE MARTÍNEZ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Predicción de Aludes  
Institut Geològic de Catalunya

<sup>2</sup>Área de Climatología  
Servei Meteorològic de Catalunya

### **RESUMEN**

*A partir de una base de datos de 28 años (1971-2008) sobre la actividad de aludes de grandes dimensiones en el Pirineo Oriental, se ha calculado la función de probabilidad de ocurrencia de uno o más episodios. Se han estimado también las distribuciones regionales de probabilidad de ocurrencia. A la hora de diseñar planes de protección civil frente al riesgo de aludes es fundamental disponer de valores estadísticamente significativos sobre la actividad de aludes a escala regional. Con el fin de mejorar la predictibilidad de los aludes de nieve, en el presente trabajo se ha estudiado también la relación entre la actividad de grandes aludes y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), patrón de circulación atmosférica de gran escala. Se ha observado una correlación negativa estadísticamente significativa. Finalmente, se discute la posible actividad de aludes futura en base a la tendencia al alza del índice NAO prevista para las siguientes décadas por la mayoría de modelos de simulación climática.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

En el Pirineo Oriental (nordeste de la península Ibérica), el incremento del turismo ha conllevado una mayor exposición a fenómenos naturales peligrosos propios de la alta montaña y, por tanto, un aumento del riesgo de aludes. Escasean estudios sobre las condiciones y la periodicidad en que se producen aludes en el Pirineo, o bien los que existen versan sobre eventos concretos. Por todo ello, este artículo aborda la ocurrencia y el contexto climático en que se registran aludes de grandes dimensiones, de aplicación en la predicción de aludes.

La relación entre la ocurrencia de aludes y las condiciones meteorológicas y el clima ha estado ampliamente estudiada. Los primeros estudios en esta materia fueron liderados por LaChapelle (1966), Schaerer (1986) y Armstrong et al. (1987). Más recientemente, Birkeland et al. (2001) remarcan que la topografía local explica diferentes efectos de patrones sinópticos sobre aludes. Por lo que concierne a Pirineos existen pocos trabajos centrados en esta materia. Una primera tentativa son los trabajos de Esteban et al. (2002, 2007) en los cuales se analizan las crisis por aludes de 1996 y 2003 a través de modelos de circulación atmosférica. García et al. (2009) proponen una clasificación de patrones sinópticos que provocan aludes mayores en el Pirineo Oriental, a partir de la aplicación de análisis de componentes principales.

En este trabajo, en primer lugar se ha comprobado si los aludes de grandes dimensiones en el Pirineo Oriental pueden ser considerados eventos raros de la misma manera que se ha realizado para otros fenómenos como por ejemplo los días de granizo. El análisis de eventos meteorológicos raros se ha realizado a menudo a través de la distribución de Poisson y de la distribución binomial negativa (Sakamoto, 1973). En este trabajo hemos aplicado ambas funciones al cálculo de la probabilidad anual de episodios de aludes mayores, considerándolos como eventos naturales discretos.

En segundo lugar, debido a que el objetivo final es el de minimizar el peligro de aludes, se ha considerado que indagar en la relación entre la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y las situaciones avalanchosas de grandes dimensiones puede ser una buena herramienta que nos permita avanzar en la predictibilidad de dicho fenómeno en situaciones críticas, especialmente cuando no hay suficientes datos meteorológicos que permitan basar las predicciones de aludes a partir del cálculo de períodos de retorno de espesores de nieve reciente, caso del Pirineo Oriental donde apenas existen series meteorológicas sin lagunas ni inhomogeneidades (Peña et al., 2006).

La relación entre el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAOi) y la actividad de aludes se ha analizado en algunas regiones de Europa, por Keylock (2003) en Islandia y Jomelli et al. (2007) en los Alpes Franceses. La NAO es un patrón de circulación atmosférica de baja frecuencia que determina fuertemente la variabilidad en el comportamiento de la precipitación, la temperatura y el viento en Europa (Hurrell, 1995; Beniston et al., 1996). El interés de establecer vínculos entre la actividad de aludes y este patrón de circulación atmosférica radica en el hecho de que el NAOi para los meses invernales es predecible a medio plazo a un razonable nivel de certeza (Jones et al., 1997). Valores positivos del NAOi indican circulación atmosférica regida por vientos del oeste, con bajas presiones circulando por el Atlántico Norte y las altas presiones centradas en torno a las islas Azores. En el caso contrario, para valores negativos del NAOi, las bajas presiones circulan más al sur de lo habitual debido a un debilitamiento del anticiclón de las Azores y es más probable que los vórtices depresionarios crucen la península Ibérica.

Se ha demostrado una correlación positiva entre la precipitación mensual y el NAOi en muchas partes de la Europa Occidental (Quadrelli et al., 2001). Sin embargo, esta correlación es negativa en bastantes zonas el Pirineo (Esteban et al., 2001). No todos los episodios de grandes aludes acaecidos en el periodo de estudio en los Pirineos Orientales están directamente relacionados con la precipitación, sino que ha habido casos en que se han producido por procesos de fusión o de transporte de nieve por el viento (García et al., 2009). Por tanto, la correlación entre aludes y patrones de circulación atmosférica de gran escala incorpora no sólo la precipitación sino también otras variables meteorológicas y del manto nivoso.

En décadas recientes el NAOi ha manifestado una tendencia al alza y la mayoría de escenarios climáticos de calentamiento global sugieren que las próximas décadas deberían mostrar una fase positiva del NAOi (Gillet et al., 2003). Cambios en los patrones de circulación atmosférica implicarían cambios a su vez en las condiciones nivometeorológicas desencadenantes de grandes aludes. Saber cómo podría evolucionar la actividad aludes en el Pirineo en el futuro debido a un aumento del NAOi abre un interesante tema de debate. En este sentido, Furdada (2006) sostiene que posiblemente los grandes aludes continúen produciéndose, ya que los episodios de precipitaciones extremas no disminuirían. De todas maneras, este trabajo intenta primero establecer la relación entre grandes aludes y NAOi existente hasta el momento.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio, el Pirineo oriental, se localiza en la vertiente suroriental de la cordillera, con una extensión de 149 km de largo y entre 19 y 52 km de ancho. El Pirineo Oriental se ha dividido en 7 regiones en función de la actividad de aludes y de las condiciones nivales (figura 1). La superficie susceptible de ser avalanchosa se muestra a través de un sombreado, que corresponde a las zonas de aludes de la base de datos de aludes del Institut Geològic de Catalunya (IGC) (Oller et al., 2006). Las siete regiones definidas en el Pirineo de Catalunya son de oeste a este: *Aran-Franja Nord de la Pallaresa (AR)*, *Ribagorçana-Vall Fosca (RF)*, *Pallaresa (PL)*, *Perafita-Puigpedrós (PP)*, *Vessant Nord del Cadí-Moixeró (CM)*, *Prepirineu (PR)* y *Ter-Freser (TF)*.

## **3. DATOS**

Se han utilizado dos grupos de datos referentes a episodios de grandes aludes para distintos propósitos. Un episodio de aludes mayores es aquel intervalo de tiempo en el que se registra por lo menos un alud espontáneo mayor (se considera como mínimo un día y el máximo viene definido por un cambio de situación sinóptica). Se han excluido aquellos episodios en los cuales solamente se registraron aludes artificiales y/o accidentales. Hemos considerado aludes mayores en un sentido amplio, tal como definió

Schaerer (1986), es decir aquellos aludes de magnitud superior a los habituales y que llegan al fondo de valle destruyendo masa forestal o dañando estructuras. Además, todos los aludes seleccionados en este estudio superan los 1000 m de recorrido.

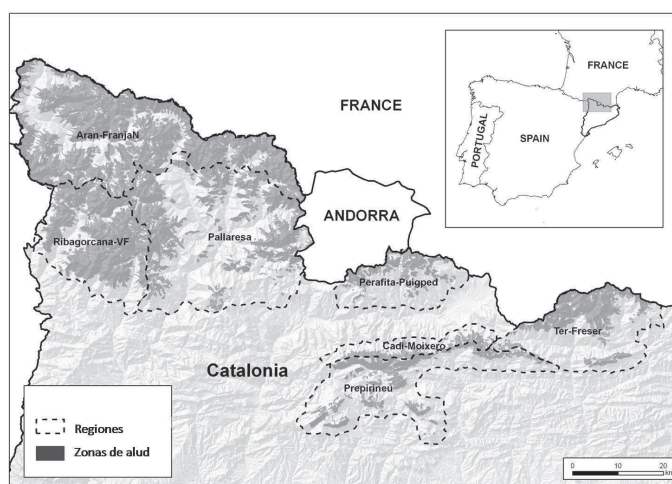


Figura 1.- Localización del Pirineo Oriental. El área de estudio se ha dividido en siete regiones para la predicción de aludes. La zona sombreada es el área correspondiente a las zonas de alud.

El primer grupo de datos consta de aludes mayores (N=39) registrados desde la temporada 1970-71 hasta la temporada 2007-08 (38 temporadas invernales) y datados como mínimo a resolución anual. Estos datos se han utilizado para calcular la función de probabilidad anual de registrar uno o más episodios de aludes mayores para cada una de las regiones a las que va referida la predicción de aludes. Los datos provienen de la Base de Datos de Aludes de Catalunya del Institut Geològic de Catalunya (IGC), recogidos en el marco del proyecto de cartografía y predicción de aludes en el Pirineo de Cataluña.

Además de la resolución anual, los aludes han sido sistemáticamente datados a resolución diaria y cartografiados desde 1996 hasta el presente. En 1996 la Red de Observadores Nivo-meteorológicos del IGC (NIVOBS) empezó a realizar el seguimiento invernal a través de transectos diarios por la alta montaña con el fin de observar tanto las condiciones del manto nivoso como la actividad de aludes.

Una segunda base de datos la constituyen, por una parte, los registros de aludes mayores datados a resolución diaria (N=26) entre 1970-71 y 2008-09, y por otra parte, el NAOi mensual, calculado como la diferencia de presión atmosférica al nivel del mar estandarizada entre Reykjavik y Gibraltar (Jones et al., 1997), de diciembre a abril, ([http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao\\_update.htm](http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm)). Además de los episodios de grandes aludes, también se han tenido en cuenta los eventos de caídas de aludes para

reforzar la relación entre aludes y NAOi. Por evento consideramos cada uno de los aludes individuales registrado, datado y localizado, mientras que un episodio es un lapso de tiempo que concentra toda la actividad de aludes generada por una determinada situación nivometeorológica crítica. La diferencia entre ambas muestras es que muy probablemente conozcamos el número real de episodios entre 1970-2009 (26), pero no todos los aludes caídos (como mínimo se han registrado 254 eventos). Esta incertidumbre es debida a la densidad variable de la red de observación a lo largo del tiempo, más densa en los años finales del periodo que en los iniciales. Por tanto, hay que tomar con reservas los resultados procedentes del análisis de los eventos.

Según la base de datos del IGC, hay registros de aludes de aludes mayores caídos entre octubre y abril, pero en este trabajo, en la parte en que se relaciona aludes y NAOi, se han seleccionado los episodios y eventos ocurridos entre diciembre y abril, que suponen un 93% de los episodios. Esto es debido a que la NAO rige fundamentalmente la variabilidad climática de los meses invernales.

#### 4. METODOLOGÍA

Respecto a la ocurrencia de aludes (periodo 1970-71 a 2007-08, 39 episodios), se ha utilizado el test de Kolmogorov-Smirnov con los valores críticos del test de Lilliefors a un nivel de confianza de 0,05, para determinar si la distribución de Poisson o la distribución binomial negativa son adecuadas para calcular la frecuencia teórica de ocurrencia anual de episodios de grandes aludes. La distribución de Poisson se suele utilizar para eventos raros, que estadísticamente tienen una baja probabilidad de ocurrencia, o bien que es improbable que ocurran. La función de densidad de Poisson viene dada por:

$$f(x) = \lambda^x \frac{e^{-\lambda}}{x!} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la media aritmética de la población y  $x$  el número de sucesos.

La función de densidad binomial negativa es más adecuada para eventos más probables y que en la ocurrencia muestran una cierta dependencia entre ellos. La función binomial negativa viene dada por:

$$f(x) = \frac{\Gamma(x+k)}{\Gamma(x+1)\Gamma(k)} \cdot \frac{p^x}{(1+p)^{k+x}} \quad (2)$$

donde  $x$  es el número de sucesos al año y  $k$  y  $p$  son los parámetros de la distribución.

En la relación entre aludes y circulación atmosférica, se ha calculado un índice acumulativo

del valor mensual del índice NAO a partir de los valores mensuales del NAO<sub>i</sub>, siguiendo la propuesta de Keylock (2003). Este autor demuestra que el nuevo índice NAO acumulativo que él propone (CNI) predice mejor la actividad de aludes en Islandia que la definición convencional del índice NAO. El cálculo del CNI para un mes se obtiene de la suma de los índices mensuales positivos de la NAO de los meses precedentes a condición de que sean valores positivos consecutivos. Según este autor, la actividad de aludes en Islandia está estrechamente relacionada con nevadas intensas a diferencia de otras zonas climáticas, donde la actividad de aludes mayores está también condicionada por procesos internos de desestabilización progresiva del manto nivoso. El CNI positivo muestra una alta correlación positiva con la actividad de aludes en Islandia, ya que este índice incorpora el efecto acumulativo del espesor de nieve reciente mes tras mes en la zona de salida del alud, en una zona climática donde las precipitaciones tienen una correlación positiva con un índice positivo NAO. Dado que la correlación entre precipitación y NAO<sub>i</sub> es negativa en gran parte del Pirineo Oriental, en este trabajo se ha calculado un CNI negativo. En los gráficos, los meses con CNI positivo se representan con valor igual a 0.

Por tanto, se han establecido correlaciones entre la actividad de aludes mayores tanto con el índice mensual clásico de la NAO como con el índice acumulativo negativo CNI, para el periodo 1970-71 a 2008-09 y también para el periodo 1988-89 a 2008-09, en que los aludes se han registrado de forma metódica y sistemática.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados que aparecen en la figura 2 muestran que la probabilidad teórica anual de registrar al menos un episodio de aludes de gran tamaño en el Pirineo Oriental es de un 64% según la función de Poisson y de un 62% según la función binomial negativa. La distribución de frecuencias observada se ajusta a las dos distribuciones teóricas y las diferencias en los valores  $p$  son mínimas entre ellas. El valor máximo de las diferencias entre las frecuencias acumuladas observadas y teóricas es de 0.069 para Poisson y de 0.087 para la binomial negativa (valores  $p$ ). El mejor ajuste según el test de Kolmogorov-Smirnov y los valores críticos a un nivel de confianza de 0.05 corresponde a la distribución de Poisson, ya que la diferencia entre ambos valores  $p$  es menor para Poisson (0.055) que para la binomial negativa (0.073). Al ser una diferencia tan mínima tal vez no sea suficientemente significativa desde un punto de vista estadístico, así que sustentamos la elección de Poisson también en criterios teóricos, según los cuales consideramos que Poisson como la función más apropiada que la binomial negativa, ya que esta última es más propia de eventos que muestran una dependencia entre ellos a la hora de ocurrir. Asumimos que los episodios de aludes mayores no muestran dependencia entre ellos a la hora de ocurrir debido a la alta variabilidad de las condiciones del manto nivoso a lo largo del tiempo.

Los resultados de la tabla 1 muestran que existe una mayor probabilidad de registrar al menos

un episodio de grandes aludes al año en alguna región del Pirineo Oriental que ninguno. Por tanto, los aludes de gran tamaño en el Pirineo Oriental son un evento raro pero no excepcional. La máxima actividad de aludes de gran tamaño tuvo lugar en el invierno 1995-96, cuando se registraron 6 episodios con un total de 144 grandes aludes cartografiados.

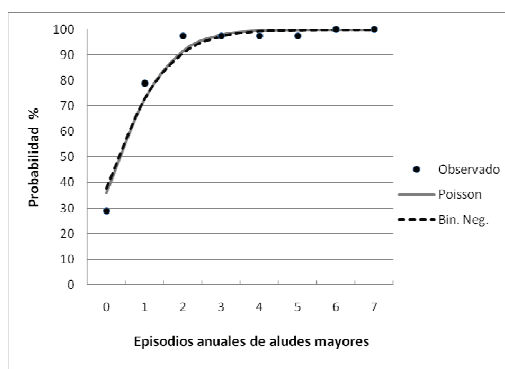


Figura 2. Comparación entre las frecuencias acumuladas observadas del número de episodios anuales de aludes mayores y las frecuencias acumuladas de las funciones de Poisson y binomial negativa en el Pirineo Oriental (1970/71-2007/08).

Nº Episodios	fi	Prob. Obs.	Prob. Calc.	
			Poisson	Bin. Neg.
0	11	0.289	0.358	0.376
1	19	0.500	0.368	0.351
2	7	0.184	0.189	0.179
3	0	0.000	0.065	0.067
4	0	0.000	0.017	0.020
5	0	0.000	0.003	0.005
6	1	0.026	0.001	0.001
7	0	0.000	0.000	0.000

Tabla 1. Casos observados (fi) y probabilidades teóricas de ocurrencia de diversos episodios por año en el Pirineo Oriental (1970/71-2007/08), según las funciones de Poisson y binomial negativa.

La frecuencia anual teórica de episodios obtenida por ajuste varía ampliamente de una región a otra, a pesar de que son regiones de reducida dimensión y similares en latitud (tabla 2). La región de clima oceánico (*Aran-Franja Nord de la Pallaresa, AP*) tiene la mayor probabilidad de sufrir como mínimo un episodio al año (44%). La probabilidad disminuye drásticamente hacia el este, hacia regiones de clima más continental donde la probabilidad teórica de sufrir al menos un episodio es, en la mayor parte, inferior al 13% de media (*Perafita-Puigpedrós, PP; Cadí-Moixeró, CM; Ribagorçana-Vallfoscá, RF; Pallaresa, PL*); incluso podría considerarse como excepcional registrar un episodio en el *Perafita-Puigpedrós (PP)*, donde la probabilidad

es inferior al 3%. En este caso los factores geográficos juegan un papel fundamental ya que este macizo montañoso se encuentra en una zona de sombra pluviométrica, que se manifiesta claramente en la presencia de vegetación xerófila. Por otra parte, hay que tener presente que es una zona con muy baja densidad de población y el número de posibles testimonios de aludes es menor que en el resto de regiones. Continuando el desplazamiento hacia el este, cerca del mar Mediterráneo, la probabilidad vuelve a aumentar hasta un 25% en el *Ter-Freser (TF)*, probablemente debido a los procesos ciclogénicos propios del Mediterráneo occidental.

Nº Epis.	Regiones						
	AR	RF	PL	PP	CM	PR	TF
0	0.560	0.692	0.789	0.974	0.854	0.900	0.749
1	0.324	0.255	0.187	0.026	0.135	0.095	0.217
2	0.094	0.047	0.022	0.000	0.011	0.005	0.031
3	0.018	0.006	0.002	0.000	0.001	0.000	0.003
4	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 2. Probabilidad de registrar un episodio o más de grandes aludes para cada región del Pirineo Oriental (1970/71-2007/08).

El segundo aspecto del trabajo es relacionar la ocurrencia de aludes con un patrón de circulación atmosférica de gran escala, la NAO. La correlación entre episodios de aludes mayores (1970-71 a 2008-09, diciembre a abril) es significativa a un nivel de confianza del 5% con valores de  $R=-0.44$ , mejorando hasta  $R=-0.70$  para el período 1988-89 a 2008-09, en que los episodios han sido sistemáticamente registrados.

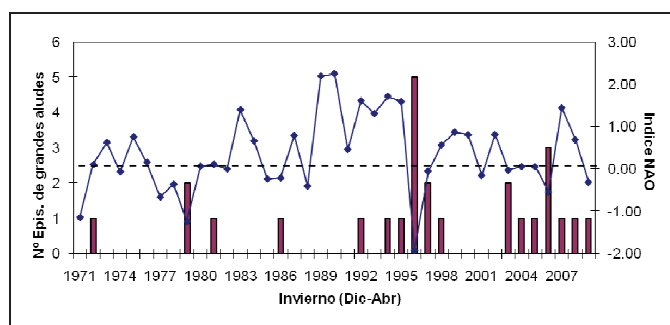


Figura 3. Número de episodios de aludes mayores (barras) e índice NAO de cada invierno de diciembre (*año-1*) a abril (*año*). La línea discontinua corresponde al valor 0 de NAOi.

De un total de 194 meses, 117 de ellos tienen NAOi positivo y 77 negativo, con lo cual ha prevalecido la fase positiva de la NAO en los últimos 39 inviernos (figura 3). No obstante, de un total de 26 episodios, la mayor parte (17 casos, un 65%) ocurrieron en meses con CNI negativo, y sólo el 35% en meses de CNI positivo. La mediana de los meses de CNI negativo con episodios de aludes es de -2.5, mientras que para los meses avalanchosos de CNI positivo



es más cercana a 0, valor de 1.5. Esto significa que los episodios en meses de CNI positivos se concentran en meses de fase NAO ligeramente positiva, mientras que los episodios que se registran en meses de CNI negativo lo hacen en meses con fase negativa de NAO más extrema o persistente (figura 4). Además, una parte significativa de los episodios (9 de 26) se han registrado con valores CNI extremadamente negativos (inferiores a -5.3). En este sentido, destaca que el 35% de todos los episodios de grandes aludes tengan lugar en el percentil 96 de los valores CNI.

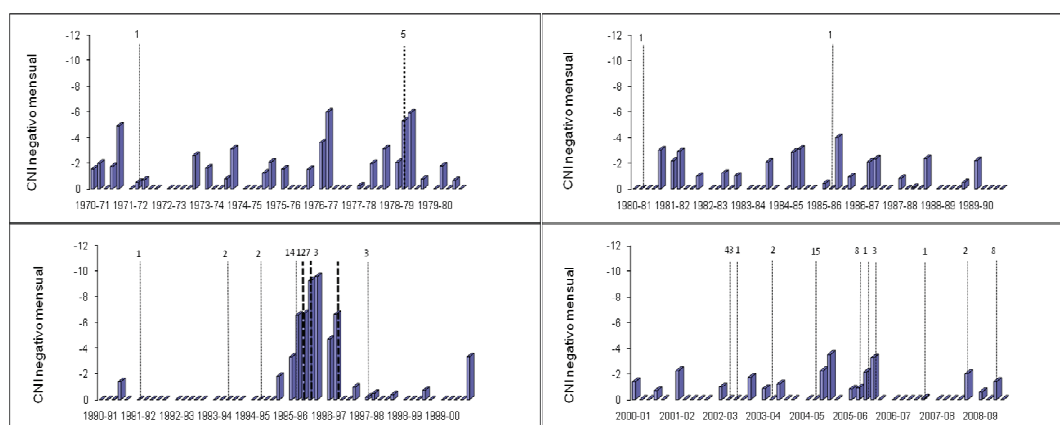


Figura 4. Correspondencia entre valores negativos mensuales de CNI y registro de aludes (dic-abr). La línea fina indica un episodio, la línea gruesa más de un episodio. Los números indican el total de aludes observados.

La comparación entre eventos de aludes y valores de CNI muestra una relación similar a la detectada con los episodios. De un total de 254 grandes aludes registrados, 186 de ellos fueron observados durante meses de CNI negativo; 154 de los cuales con valores negativos inferiores a -6.6, lo que significa que un 60% de la población de aludes se registra en el percentil 98 de los valores mensuales de CNI. El coeficiente de correlación entre el valor medio invernal de CNI negativo y número de episodios por invierno es de  $R=-0.69$  y respecto a aludes caídos  $R=-0.82$ , siendo en ambos casos superiores a los que presenta la relación con el valor NAOi invernal.

## 6. DISCUSIÓN

Los resultados demuestran una clara correlación negativa entre la actividad de grandes aludes y la NAO en los Pirineos Orientales, aún más manifiesta aplicando el índice CNI, el cual incorpora la persistencia de la fase negativa de la NAO. Tanto los aludes como los episodios se incrementan en intensidad y frecuencia cuando la fase negativa de la NAO es persistente y los valores mensuales muy negativos. Por tanto, el índice CNI puede ser considerado un indicador de posibles inviernos extremos en cuanto a situaciones críticas por aludes. Esta aplicación podría ser válida tanto para el futuro, una predicción estacional de aludes, como

para el pasado, la reconstrucción de actividad de aludes histórica.

En este sentido hay que destacar que el invierno de 1995-96, que registra el máximo en actividad de grandes aludes, tanto por episodios como por eventos (Muntán et al., 2007), rompió el récord de anomalía negativa invernal de la NAO (media de -2.35) de los últimos 39 años. Es más, ha sido el único invierno de los últimos 60 años en que todos los meses de diciembre a abril se han hallado bajo fase negativa de la NAO.

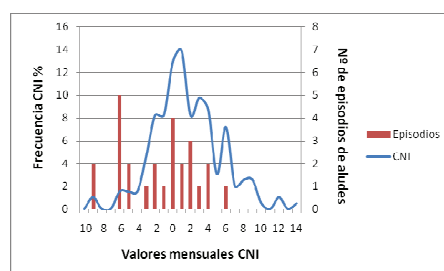


Figura 5. Distribución de frecuencias de los valores mensuales de CNI y número de episodios de grandes aludes observados para cada intervalo de CNI.

Una vez argumentada la relación entre aludes y NAO negativa, el debate debería centrarse en conocer cuales son los procesos de la fase negativa de la NAO que rigen la actividad de aludes en el Pirineo Oriental. Un primer paso debería ser el profundizar en la caracterización del comportamiento del manto nivoso y de las variables meteorológicas que influyen en su evolución, para las distintas situaciones sinópticas generadas en la fase negativa de la NAO, con resultados preliminares en García et al. (2009).

Con todo, no hay que olvidar que una parte significativa de los episodios (35%) se ha registrado en meses de CNI positivo. La distribución de frecuencias de los episodios de grandes aludes en función del valor CNI sugiere una distribución bimodal (figura 5). El segundo máximo observado se registra en el intervalo de clase cercano a 0 (0 a -1) y la distribución parece mostrar un ligero sesgo hacia la derecha, hacia valores positivos de la NAO. La actividad de aludes en fase positiva de la NAO probablemente se corresponda con diferencias espaciales en la distribución de la precipitación invernal atribuibles a máximos en fases positivas de la NAO localizados en zonas de clima oceánico (Esteban et al., 2001). Una línea futura de trabajo debería encaminarse a evaluar si la relación aludes-NAO es igualmente significativa y de misma índole en todas las regiones del Pirineo Oriental.

Respecto a la evolución temporal de la NAO, la mayoría de estudios coinciden en que se ha observado una tendencia al incremento del índice NAO, con una clara persistencia del índice acumulativo positivo en la década de los 90 (Keylock, 2003). La mayoría de modelos climáticos mantienen la tendencia al incremento durante las próximas décadas (Gillet et al.,

2003). Atendiendo a los resultados de este trabajo, una respuesta simplista y focalizada sobre el Pirineo Oriental podría sustentar que la actividad aludes no se incrementará e incluso podrá disminuir, dado el predominio previsto de fases positivas de la NAO. No obstante, en este trabajo se muestra cómo unos picos extremos de CNI negativo pinchan una década de los 90 caracterizada por la media decenal del índice NAO más elevada de las 4 últimas décadas, como mínimo. Incluso el índice NAO está descendiendo claramente entre el 2000-2009 con cambios meteorológicos destacables en la alta montaña (Peña et al., 2006).

## 7. CONCLUSIONES

- La probabilidad teórica de ocurrencia de episodios de grandes aludes en el Pirineo Oriental se ajusta a la función de Poisson. La probabilidad de un episodio o más anual es superior al 64% para el conjunto de la zona de estudio.
- La variabilidad espacial de probabilidad de ocurrencia es muy elevada, con un máximo en la zona de clima oceánico y un mínimo en macizos con sombra pluviométrica.
- Tanto el cálculo de la frecuencia teórica como la irregularidad espacial del fenómeno, debería implicar el diseño y la aplicación de políticas de reducción del riesgo adecuadas a la problemática de cada región.
- Existe una correlación negativa alta entre la ocurrencia de grandes aludes y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que mejora con la aplicación del índice acumulativo CNI. Es decir, la frecuencia de grandes aludes aumenta en inviernos con persistencia de fase negativa de la NAO y en meses con NAOi muy negativos.
- La correlación entre actividad de aludes y NAO puede suponer un avance para la predicción estacional del peligro de aludes.
- Pese al aumento de las fases positivas de la NAO en las próximas décadas, no implica la desaparición de puntas de fase negativa con intensa actividad de aludes, como se ha observado en el pasado reciente.

## REFERENCIAS

- Armstrong, R.L. and Armstrong, B.R., 1987. Snow and avalanche climates of the western United States: a comparison of maritime, intermountain and continental conditions. International Association of Hydrological sciences Publication, 162: 281-294.
- Beniston, M. and Rebetez, M., 1996. Regional behaviour of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979-1993. *Theor. Appl. Climatol.*, 53, Springer-Verlag: 231-243.
- Birkeland, K.W., Mock, C.J. and Shinker, J.J., 2001. Avalanche extremes and atmospheric circulation patterns. *Annals of Glaciology*, 32: 135-140.
- Esteban, P., Soler, X., Prohom, M. and Planchon, O., 2001. La distribución de la precipitación a través del índice NAO. El efecto del relieve a escala local: El Pirineo Oriental. In: J.A. Guijarro Pastor, M. Grimalt Gelabert, M. Laita Ruiz de Asúa y S. Alonso Oroza (Eds.), *El Agua y el*

- Clima - L'Aigua i el Clima. Publications of the Spanish association of climatology (AEC), 2002, Serie A, nº 3. Planogràfica Balear, Marratxí (Mallorca), pp. xii+594.
- Esteban, P., Mases, M. and Martin-Vide, J., 2002. Climatologia per a la predicció d'allaus: l'allau de Les Fonts d'Arinsal, Andorra, 8 de febrero de 1996. *Horitzó* 2: 10-19.
- Esteban, P., Martí, G., García, C., Aran, M., García, A., Gavaldà, J. and Moner, I., 2007. Heavy snowfalls and avalanche activity over Eastern Pyrenees: a study of two extreme cases. *Proceedings of the Alpine&Snow Workshop. Forschungsbericht* 53. pp. 44-48.
- Furdada, G. 2006. Aludes de nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Cuatrenario y Geomorfología*, 20 (3-4). pp 74-88.
- García, C., Martí, G., Oller, P., Moner, I., Gavaldà, J., Martínez, P., Peña, J.C., 2009. Major avalanche occurrence at regional scale and related atmospheric circulation patterns in the Eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology* (en prensa).
- Gillet, N.P., Graf, H.F., Osborn, T.J., 2003. Climate Change and North Atlantic Oscillation. *Geophysical Monograph*, 134. American Geophysical Union, 10.1229/134GM09, pp. 193-209.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- Jomelli, V., Delval, C., Grancher, D., Escande, S., Brunstein, D., Hetu, B., Fillion, L. and Pech, P., 2007. Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 47: 180-192.
- Jones, P.D., Jonsson, T., and Wheeler, D., 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* 17: 1433-1450.
- Keylock, C.J., 2003. The North Atlantic Oscillation and snow avalanching in Iceland. *Geophys. Res. Lett.*, Vol.30. N°5 (58): 1-4.
- LaChapelle, E.R. 1966. Avalanche forecasting. A modern synthesis. *International Association of Hydrological Sciences Publication*. Vol. 69. 350-356.
- Muntán, E., Oller, P., García, C., Gutiérrez, E., Martí, G., 2007. Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, 07036. Sref-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-07036. *Contributions of the EGU General Assembly 2007*, Wien (Austria), European Geosciences Union. ISSN: 1029-7006.
- Oller, P., Muntán, E., Marturià, J., García, C., García, A., Martínez, P., 2006. The avalanche data in the Eastern Pyrenees. 20 years of avalanche mapping. *Proceedings of the ISSW. Telluride, Colorado, USA*, pp. 305-313.
- Peña, J.C., Esteban, P., García, C., Martí, G., Prohom, M., 2006. Recent decrease of temperature over the Eastern Pyrenees and its relationship with the atmospheric circulation: preliminary results. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Session 4 – Climate Change*, vol.1, pp 361-363, Barcelona 13-16 de junio 2006.
- Quadrelli, R., Lazeri, M., Cacciamani, C., Tibaldi, S., 2001. Observed winter alpine precipitation variability and links with large-scale circulation patterns. *Clim. Res.*, 17, 275-284.
- Sakamoto, C. M., 1973. Application of the Poisson and negative binomial models to thunderstorm and hail days probabilities in Nevada. *Monthly Weather Review*, Vol 101, nº 4: 350-355.
- Schaerer, P., 1986. Weather patterns for major avalanches. *The avalanche Review*, vol. 4, nº 3: 2.

