

Caracterización de avalanchas de nieve con métodos sismológicos

Snow avalanche characterization through seismological methods.

E. Suriñach, I. Vilajosana, G. Khazaradze y Grup d'Allaus de la UB (*)

Grup d'Allaus (RISKMAT, <http://www.ub.es/riskmat>). Dept. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona. Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, Spain (emma.surinach@ub.edu, vilajosana@ub.edu, gkharzar@ub.edu)

ABSTRACT

Snow avalanches associated risk in mountain areas can be very high. The knowledge of these phenomena is very important in order to mitigate that risk. The avalanche research group at the University of Barcelona has been working with the seismic signals of snow avalanches since 1994 at different sites all around Europe. The availability of more than 50 seismic records of snow avalanches made possible the identification of the specific characteristics of the seismic signals generated by avalanches. Classical seismological techniques frequently used to study earthquakes have been imported to perform the seismic signal characterization. However, the recent studies of the group have been focused in determining the physical parameters that can help in the description of the phenomena. In this case, seismological techniques have been used, in addition of the characterization of the seismic signals to obtain information of the avalanche itself. In this paper an overview of the most successful results in this field are presented.

Key words: Seismology, snow avalanches, seismic signals, avalanche experimental site, time series.

Geogaceta, 41 (2007), 227-230
ISSN: 0213683X

Introducción

En las últimas décadas el riesgo asociado por las avalanchas de nieve se ha visto incrementado debido al crecimiento de la actividad humana en las zonas montañosas.

Una avalancha de nieve se puede definir como un flujo de nieve descendiendo a lo largo de una pendiente. No obstante, este fenómeno natural es complejo y no es fácil describir sus características en vistas a una clasificación. Los criterios de clasificación son diversos; para ello se considera el tipo y forma de la zona de partida (puntual, lineal...), la calidad de la nieve en el flujo dependiendo del contenido en agua, cohesión y tipo de nieve (húmeda, seca...), el tipo de flujo (fluido, con o sin aerosol, con incorporación o no de nieve...), etc. Las velocidades de avance del flujo varían según la cantidad de masa involucrada, tipo de nieve y de flujo, y características de la pendiente. Estas velocidades pueden alcanzar valores de 60 m/s (216 km/h), y hasta superiores a 300 km/h, aunque son valores normales entre 20 y 30 m/s (90 km/h). Las presiones de impacto dependen de las velocidades y de las características de la nieve y pueden llegar hasta los 300-600 kPa. Estos valores denuncian que las avalanchas de nieve pueden llegar a ser fenómenos muy

destruictivos. En consecuencia, conocer su comportamiento con el fin de prevenir y reducir el riesgo asociado a éstas es de gran importancia. Actualmente existe un colectivo científico de ámbito internacional que está investigando sobre esta cuestión. Así mismo, ha sido, y es, una de las líneas prioritarias de investigación de los proyectos financiados por la UE.

La determinación de aquellos parámetros físicos que caracterizan una avalancha de nieve es, pues, de vital importancia para la verificación de los modelos numéricos utilizados en la zonificación de áreas afectadas por aludes de nieve (Issler, 2003). No obstante, las condiciones meteorológicas adversas que normalmente acompañan al fenómeno, la dificultad de acceso a las zonas montañosas donde ocurren las avalanchas, así como la naturaleza del fenómeno en sí, justifican la escasez de medidas de estos parámetros físicos.

El Grup d'Allaus de la UB inició en 1994 los estudios sobre las señales sísmicas generadas por avalanchas de nieve. El objetivo fue utilizar la sismología como herramienta para la mejora en los sistemas de detección remota de avalanchas de nieve. Desde 1986, no obstante, miembros del Grup d'Allaus estudian las avalanchas de nieve y su im-

pacto como riesgo natural (Furdada et al., 1995; Furdada y Vilaplana, 1998).

En lo que se refiere al estudio de las señales sísmicas producidas por aludes de nieve, éste se inició con la obtención involuntaria de un registro de la vibración producida por una avalancha de nieve húmeda en un sismógrafo de la Red Sísmica de Catalunya (SGC) situado en el Centre de Recerca d'Alta Muntanya de la Universitat de Barcelona (Vielha, 1 de Mayo de 1986).

En 1994, el grupo de aludes de la Universitat de Barcelona, inició el análisis de los datos registrados en Varradòs (Vall d'Aràn). De estos análisis se obtuvieron distintos resultados referentes al distinto contenido frecuencial de las señales sísmicas generadas por aludes de nieve frente al de las producidas por otras fuentes sismogénicas (p. ej. terremotos, vehículos en movimiento, etc.), así como una correlación directa entre la aparición de estos registros y el crecimiento de las temperaturas y precipitaciones en forma de nieve (Sabot et al., 1995). Estas observaciones apoyaban la hipótesis de que las señales sísmicas registradas en sismómetros situados en zonas montañosas y de origen desconocido podrían corresponder a aludes de nieve.

Para poder mejorar en el conocimiento del fenómeno, se decidió registrar las

(*) El grup d'allaus de la UB (<http://www.ub.es/allaus/>) esta formado, a parte de los autores por: Gloria Furdada y Joan Manuel Vilaplana. Muchos de los resultados fueron obtenidos gracias a las investigaciones de: Berta Biescas y Françoise Sabot que formaban parte de este grupo en el pasado.

señales sísmicas producidas por avalanchas de nieve desencadenadas artificialmente en lugares especialmente habilitados para ello. El procedimiento experimental seguido fue inspirado en la metodología utilizada para estudiar la estructura interna de la tierra (corteza) (Suriñach, 1980; 1994). Básicamente, consistía en registrar en instrumentos distribuidos en un radio de 1 a 3 km la vibración del suelo producida por las avalanchas de nieve desencadenadas artificialmente en canales experimentales. La distribución geográfica específica de los instrumentos estaba, no obstante, condicionada por las características de cada lugar y de cada alud (p.ej. Figura 1). En un principio, paralelamente, y con base de tiempo común a estas medidas, se obtenían imágenes video del fenómeno. Un papel primordial en estos estudios fue el registro de la señal producida por la explosión generadora del alud, así como una cartografía posterior y estudios de terreno y nivo-meteorológicos. Posteriormente, a estas medidas se añadieron otras procedentes de distintos instrumentos de medida también instalados en los canales experimentales (sensores de presión, radares, sensores fotoeléctricos y optoelectrónicos). Esta información ha sido siempre de gran utilidad para el posterior proceso y análisis de los datos.

Metodología

Nuestros estudios se han realizado en canales que se hallan en estaciones de esquí y en canales experimentales específicamente destinados al estudio de avalanchas de nieve; cada una de las zonas utilizadas con características diferentes (dimensiones, geometría, latitud geográfica...) al igual que los aludes desencadenados en cada uno de estos canales. Debido a esto hemos tenido que adaptar cada experimento a las características del lugar y tipo de alud. Por otro lado, hemos obtenido, una colección de datos rica y variada.

Con el tiempo, los experimentos se han ido sofisticando y ampliando los objetivos del estudio. Además, no solamente estudiamos aludes desencadenados artificialmente, si no que nuestros dispositivos, actualmente, permiten también registrar aludes naturales.

Si en un principio se pretendía identificar aquellas características de la señal sísmica generada por aludes de nieve que nos permitieran identificarlos frente a otras fuentes sismogénicas, en vistas a una detección remota, actualmente nuestros estudios no sólo se centran en esto,

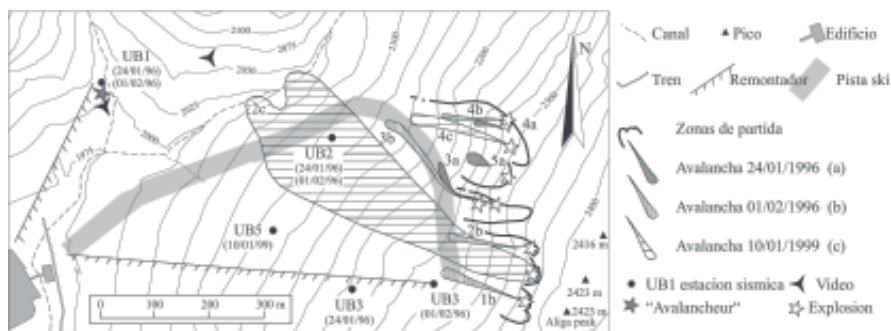


Fig. 1.- Canal experimental en Vall de Núria. Distribución de las estaciones sísmicas para diversos experimentos. Cartografía de los depósitos de 3 avalanchas.

Fig. 1.-Vall de Núria experimental site. Seismic stations distribution for different experiments. Cartography of the deposits of 3 avalanches.

sino que también pretendemos determinar aquellos parámetros físicos que nos permitan describir la dinámica interna y externa del fenómeno (velocidad, localización, tipo de nieve...).

A continuación indicamos una relación de los emplazamientos utilizados en nuestros estudios, así como algunas de sus características.

Estació d'esquí Boí - Taüll Resort (Pirineo oriental). Fue la primera estación que colaboró en nuestros estudios. Durante el período 1995 -1996 se registraron dos avalanchas (Cervi del Durro y Raspes Roies)(Sabot et al., 1997).

Estació d'esquí Vall de Núria, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (Pirineo oriental). La colaboración se inició en 1996 y aún continúa. Las características de este emplazamiento se pueden encontrar en Suriñach et al., (1999) y Suriñach (2004).

Vallée de La Sionne. Zona experimental para el estudio de las avalanchas de nieve (Alpes suizos). Durante el periodo 1996

- 2003 colaboramos con el Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF, Davos, Suíssa). Las características del emplazamiento y los resultados obtenidos se pueden encontrar en Issler (1999), Biescas (2003) y en Biescas et al., (2003).

Ryggfonn. Es un canal experimental para el estudio de avalanchas de nieve situado en Noruega. Desde 2003 y hasta la actualidad estamos llevando a cabo nuestros experimentos en este canal. Estos estudios se hallan en el marco del proyecto europeo SATSIE. Las características de este emplazamiento y los resultados mas recientes de nuestro grupo se pueden encontrar en <http://www.leeds.ac.uk/satsie/>, en Lied et al., (2002) y en Vilajosana et al., (2006). Un detalle del perfil del canal se puede observar en la Figura 2.

A partir de los experimentos realizados durante los últimos años en los distintos canales experimentales hemos obtenido registros sísmicos de más de 50 avalanchas de nieve que posteriormente hemos analizado. En todos los casos la metodología seguida ha estado basada en

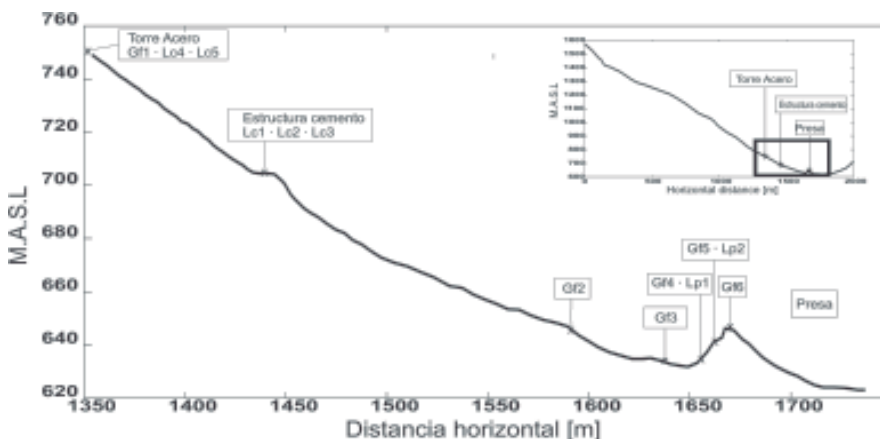
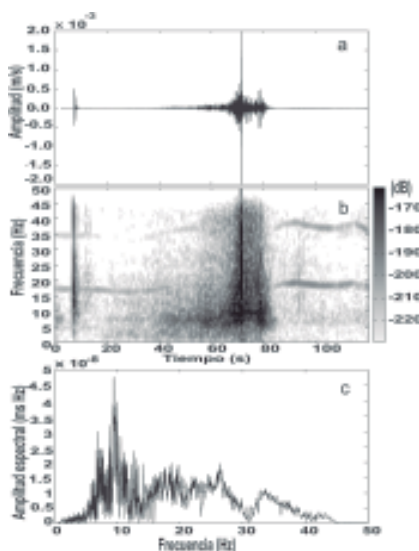


Fig. 2.- Detalle del perfil topográfico del canal experimental de Ryggfonn y localización de los diversos sensores utilizados.

Fig. 2.- Ryggfonn experimental site path profile and position of installed sensors.

las técnicas de análisis de datos normalmente empleadas en sismología para el estudio de las señales sísmicas producidas por los terremotos. Un análisis estándar de los datos podría perfectamente resumirse como se indica en la Figura 3. En primer lugar se procede al análisis de la serie temporal para determinar la duración del registro, la amplitud de la señal, así como la forma y duración de los paquetes de ondas que forman el registro completo (Figura 3a). Posteriormente se procede a analizar el contenido de frecuencias de la señal sísmica. Para ello se utiliza la Fast Fourier Transform (FFT) (Figura 3c). A partir del espectro total de la señal se determina la frecuencia predominante de ésta, así como los posibles efectos de emplazamiento. Finalmente se procede con el análisis de la señal sísmica en la representación tiempo-frecuencia. En este caso se utiliza el Running Spectrum (RS) basado en la Short Time Fast Fourier Transform. En esta representación se obtiene la evolución temporal del contenido en frecuencia de la señal sísmica (Figura 3b). Esto último aporta mucha más información que el análisis del espectro total. Biescas (2003) y Biescas et al., (2003) demostraron que la aplicación del análisis de RS a la señal sísmica puede ser muy exitosa para la identificación de la señal sísmica generada por aludes de nieve. Para complementar la caracterización de la señal sísmica generada por aludes de nieve, el tipo de ondas predominantes en el registro sísmico es determinado a partir del estudio del movimiento de la partícula. Esto es posible cuando existen las tres componentes del movimiento del suelo (N-S, E-O, Z) (Figura 4). Nótese el nivel de detalle utilizado para el análisis de la señal temporal (Figura 4).



Resultados

A continuación presentamos una relación de los resultados obtenidos del análisis de la señal sísmica producida por aludes de nieve.

Los estudios realizados con los métodos y técnicas descritos más arriba nos permitieron caracterizar la señal sísmica producida por avalanchas de nieve, caracterización que puede ser útil para la identificación y detección de avalanchas de forma remota y automática utilizando instrumentación sísmica (Suriñach et al., 2000; Suriñach et al., 2001; Biescas, 2003; Biescas et al., 2003). Previo a la caracterización de la señal sísmica producida por aludes se obtuvo otro resultado importante: las avalanchas de nieve, independientemente de su tipo, siempre producían vibraciones que podían ser registradas por sismómetros debidamente colocados y presentaban reproducibilidad y repetitividad. En condiciones iguales (mismo canal y estación de registro, mismo tipo de alud, etc...) las señales eran similares y/o comparables. Además, para cada emplazamiento se podía determinar un factor de escala y tipo de alud.

Otro resultado obtenido es que distintos tipos de aludes de nieve presentan se-

ñales sísmicas con distinta forma temporal y contenido total de frecuencias. Este hecho refleja una dinámica interna del alud distinta especialmente relacionada con distintos mecanismos de disipación de energía y fricción para aludes de distinto tipo. En la Figura 5, se pueden observar los registros sísmicos correspondientes a dos aludes de nieve: alud de nieve polvo/flujo mixto en Figura 5, arriba y alud de nieve húmeda/flujo denso a la abajo. La comparación de los registros sísmicos de un alud con los datos obtenidos en un FMWC radar (Gubler and Hiller, 1984), situados ambos instrumentos contiguamente, permitieron identificar que los mecanismos principales de producción de señal sísmica están relacionados con la fricción/erosión producida por la base del alud en contacto con el suelo/ nieve depositada y la incorporación de nieve (Biescas et al., 2002).

Recientemente hemos podido determinar la velocidad de propagación de un alud dada una configuración específica de sensores sísmicos. Este estudio se ha realizado en Ryggfonn. Para ello se utilizó una red de 6 geófonos situados colinealmente a lo largo del canal (Figura 2). El método utilizado allí está presentado en detalle en Vilajosana et al., (2006). Básicamente, a

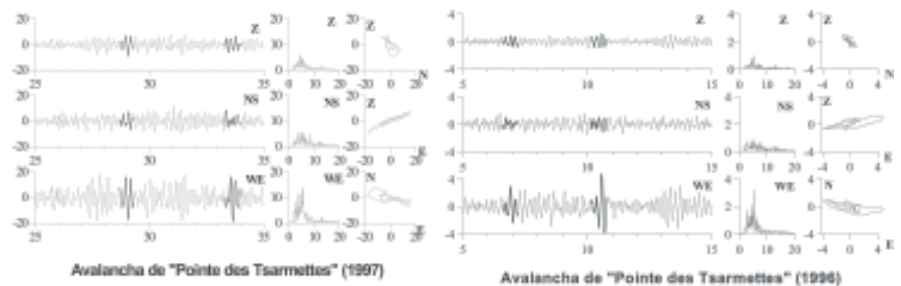


Fig. 4.- Detalle de la señal sísmica (mm/s), espectro total y movimiento de la partícula del registro de las avalanchas de Pointe de Tsarmettes, 1997 (izquierda) y Pointe de Tsarmettes, 1996 (derecha). De arriba abajo: Componentes de la señal sísmica (mm/s) Z , N-S y W-E. Movimiento de la partícula representado en plano Vertical/Norte (Z, N), Vertical/Este (Z, E) y plano horizontal (N, E).

Fig. 4.- Detail of the seismic time series (mm/s), total spectra, and particle motion of the avalanches released in Pointe de Tsarmettes (1997) left and Pointe de Tsarmettes (1996) Right. From top to bottom components of the seismic signal Z , N-S y W-E. Particle motion is represented in Vertical/North plane (Z, N), Vertical/East plane (Z, E) and horizontal plane (N, E).

Fig. 3.- a) Componente E-W del sismograma (100 mps) de la avalancha de nieve polvo/flujo mixto artificialmente desencadenada en La Sionne (Suiza) el 20/02/2000, 9:40 h UTC. b) Running spectra with a 128-sample window and 50% solapamiento. c) Espectro total.

Fig. 3.- a) E-W component seismogram (100 sps) of La Sionne (Switzerland) artificially released dry/mixed avalanche on the 20/02/2000, 9:40 h b) Running spectra with a 128-sample window and 50% overlap. c) Total spectrum.

parte del método clásico de caracterización de la señal sísmica presentado más arriba, se utiliza la correlación cruzada de las señales sísmicas detectadas en geófonos adyacentes. La diferencia de tiempo entre la llegada del frente del alud a cada uno de los sensores y la distancia entre sensores nos permite obtener la velocidad media del frente en el punto intermedio entre ambos sensores. La determinación del tiempo de llegada no es inmediata a partir de un «picking», sino que es nece-

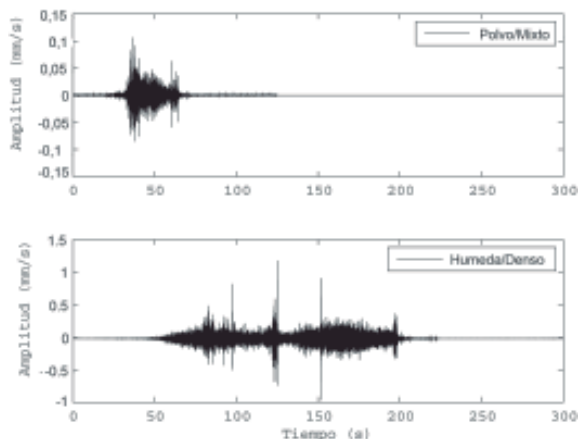


Fig. 5.- Componente vertical de la señal sísmica registrada en Ryggfonn. Arriba: Nieve polvo/flujo mixto. Abajo: Nieve húmeda/flujo denso

Fig. 5.- Vertical component of the seismic signals registered at Ryggfonn. Top: dry mixed, bottom wet/dense avalanche.

sario utilizar el espectrograma (RS) para determinar el intervalo en que el alud pasa por encima el sensor. Esto es debido a la complejidad que presenta la señal, ya que ésta está producida por distintas fuentes móviles que se aproximan al sensor (Suriñach et al., 2005). Este método fue aplicado a 12 aludes de distinto tipo y los valores de velocidad obtenidos fueron comparados con medidas independientes de velocidad obtenidas a partir de otros instrumentos también instalados en el canal (Vilajosana et al., 2006). La distinta evolución de las velocidades de aludes de nieve de distinto tipo (Figura 6) observada indica, nuevamente, que la dinámica interna de los aludes de flujo denso y flujo mixto es distinta.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por los proyectos estatales AMB93-0837, IN-96-0233, AMB97 - 0374, ACES98-47-S, REN 2000-0518/RIES, REN2002-12779-E, CGL2005-02250, CGL2006-06596 y ECSD2006-00041; Proyectos europeos: CHRX-CT93-0307, ENV4-CT96-0258, EVG1-CT2002-00059; Proyectos de la Generalitat de Catalunya 1995SGR-00198, 999SGR00065 i 2001SGR00081 (RISKMAT).

Referencias

Biescas, B., B. Sovilla, E. Suriñach, F. Tiefenbacher, F. Dufour y G. Furdada, (2002). EGS XXVII General Assembly, 4, Abstract EGS02-A-00879.

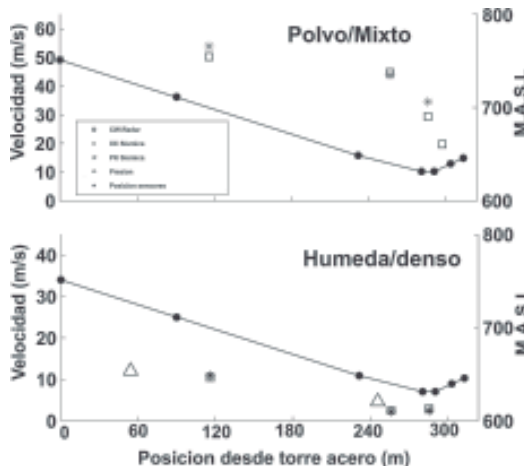


Fig. 6.- Speed measurements from distinct instruments installed at Ryggfonn for the avalanches released 17/02/2000 and 07/01/2005. Top: dry/mixed. Bottom: wet/dense avalanche. Triangles: speeds from pressure measurements. Asterisk: speeds from seismic data. Squares: speeds from seismic data. Continuous line: path profile. Dots: sensors location.

Biescas, B., (2003). *Aplicación de la sismología al estudio y detección de los aludes de nieve*. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain (ISBN: B. 46927-2003 / 84-688-3758-X), 1-130 pp. <http://www.tdx.cesca.es/TDX-1010103-084042> .

Biescas, B., Dufour, F., Furdada, G., Khazaradze, G. y Suriñach, E., (2003). *Surveys in Geophysics*, 24: 447-464.

Furdada, G. , Martí, G., Oller P., García, C., Mases M., Vilaplana J.M. (1995). *Surveys in Geophysics* 16, 681-693.

Furdada, G., Vilaplana J.M. (1998). *Annals of Glaciology*, 26, 285-288.

Gubler H, Hiller M. (1984). *Cold Regions Science and Technology* 9, 109-119.

Issler, D.,(1999). En *European Avalanche Test Sites. Overview and Analysis in View of Coordinated Experiments*. Issler, D., ed. Mitteilung Nr. 59, Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research, Davos, 35-54.

Issler D. (2003). *Dynamic Response of Granular and Porous Materials Under Large and Catastrophic Deformations*. Hutter K, Kirchner N, (eds). Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics 11, Springer, Berlin, 109-160.

Lied K., Moe A., Kristensen K., and Issler D. (2002) Ryggfonn: Full scale avalanche test site and the effect of the catching dam. En *NGI Report 581200-35, Vol. 581200-35*. Norwegian Geotechnical Institute.

Sabot, F., Martínez, P., Suriñach, E., Olivera, C. and Gavalda, J., (1995). *Les apports de la recherche scientifique à*

la sécurité neige, glace et avalanches. Editions ANENA-CEMAGREF, 19-24.

Sabot, F., Suriñach, E., Martínez, P., Olivera, C., Gavalda, J. (1997). *Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del territorio*. Granada (ESPAÑA). 615-621.

Suriñach, E. (1980). *Métodos de inversión numérica para la interpretación de perfiles sísmicos profundos*. Ed. Universidad Complutense, Tesis nº 163/82. Universidad Complutense de Madrid.

Suriñach, E. (1994). *Revista de Física*, 6, 4 -14.

Suriñach, E.; Sabot, F.; Furdada, G. (1999). En: *European Avalanche test sites- Overview and Analysis in View of Coordinated Experiments*. (Ed. D.Issler) Mitteilung SFISAR, Davos. 59, 70- 75.

Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G. and Vilaplana, J.M., (2000). *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(9), 721-727.

Suriñach, E., Furdada, G., Sabot, F., Biescas, B. y Vilaplana, J.M., (2001). *Annals of Glaciology*, 32, 268-274.

Suriñach, E., (2004). En: *Snow and Avalanche Naaim M, Naaim-Bouvet (ed.)*. Test Sites, Cemagref, 71-183.

Suriñach, E., I. Vilajosana, G. Khazaradze, B. Biescas, G. Furdada y J.M. Vilaplana. (2005). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 791-798; SRef-ID: 1684-9981/nhess/2005-5-791.

Vilajosana, I., Khazaradze, G., Suriñach, E., Lied, E., Kristensen, K. (2006). Accepted in *ColdRegions Science and Technology*.