

## 7 Resultados

En este capítulo se exponen los resultados de la tesis. Estos resultados están basados en la colección de datos presentada en el Anexo. La colección de datos experimentales consta de un total de 95 registros sísmicos correspondientes a 52 aludes de dimensiones y flujos diversos y registrados a distancias y posiciones relativas diferentes. En el Anexo se detalla el razonamiento seguido con cada registro para seleccionarlo como señal sísmica generada por un alud (SSA) o descartarlo. En este capítulo se asume que las señales seleccionadas en las campañas experimentales son generadas por aludes de nieve. La reproducibilidad de las características propias de los registros, observada en la colección de datos, justifica este paso.

Los resultados se presentan estructurados en cuatro apartados. Tal como se explicó en la introducción, esta tesis se realizó con dos objetivos: la caracterización de SSA para el diseño de un sistema de detección y el estudio del fenómeno del alud a partir de las señales sísmicas que genera. El primero, segundo y tercer apartado están relacionados con el primer objetivo y el cuarto está justificado dentro del segundo objetivo.

En el primer apartado se presentan las características de las SSA observadas en el dominio temporal y se cuantifican las máximas amplitudes del movimiento (velocidad) real del suelo y las duraciones temporales de los registros. También se presentan las características obtenidas en el dominio frecuencial a partir de los cálculos de los espectros de Fourier. Finalmente se caracterizan las SSA en el dominio tiempo-frecuencia (espectrograma), describiendo la evolución en el tiempo del contenido frecuencial de la señal.

En el segundo apartado se comparan SSA con señales generadas por otras fuentes (helicóptero, sismo local, sismo regional y telesismo) en los dominios temporal, frecuencial y de tiempo-frecuencia.

Los dos últimos apartados presentan correlaciones de los datos sísmicos con otros dos tipos de datos: imágenes de grabaciones en vídeo y datos de radares FMCW. Las imágenes de vídeo nos proporcionan información sobre la situación del frente del alud en diferentes instantes a lo largo de su evolución, sobre su velocidad y sobre su flujo; y los radares FMCW proporcionan información sobre la altura y las variaciones en el flujo del alud que pasa por encima del radar.

## 7.1 Características de las señales sísmicas generadas por aludes de nieve

En esta sección se describen las características de las señales sísmicas generadas por aludes de nieve (SSA). En el dominio temporal se sintetizan las características observadas de la envolvente de la señal y se presentan datos cuantitativos sobre las amplitudes máximas registradas y la duración temporal de los registros. En el dominio frecuencial se estudia el contenido frecuencial de toda la señal y en el dominio tiempo-frecuencia se estudia la evolución temporal del contenido frecuencial de las señales. En las secciones presentadas a continuación se subrayan las palabras claves para situar el tema que se explica.

Los resultados presentados se basan en una colección de datos experimentales formada por un total de 95 registros sísmicos correspondientes a 52 aludes. La mayoría de registros tienen tres componentes (Z, N-S y E-W). Los casos en los que se detectó alguna anomalía en alguna componente se comentan en el Anexo. Los registros se hicieron desde diferentes distancias y diferentes posiciones relativas alud-sensor. Del total de aludes registrados, 15 fueron registrados en los Pirineos catalanes y 37 fueron registrados en los Alpes suizos. Considerando los aludes de tipo de flujo conocido, esta colección contiene aludes de tres tipos: aludes mixtos (15), aludes de flujo (21) y aludes aerosol puro (2). Otra consideración a tener en cuenta es que los aludes de flujo que generaron SSA diferenciable del ruido de fondo fueron todos ellos aludes de nieve húmeda por lo que los resultados atribuidos a aludes de flujo, deben considerarse para aludes de flujo y nieve húmeda. En el análisis de los resultados se clasifican los aludes en tres dimensiones, los criterios de la clasificación son los siguientes:

- Aludes *grandes*: aludes con volúmenes de zona de salida del orden de  $10^5 \text{ m}^3$  y/o con recorridos  $\sim 2$  km.
- Aludes *medianos*: aludes con volumen de zona de salida del orden de  $10^4 \text{ m}^3$  y/o con recorrido  $\sim 1$  km.
- Aludes *pequeños*: aludes con volumen de zona de salida del orden de  $10^3 \text{ m}^3$  y/o con recorrido menor de 1 km.

Considerando los aludes de dimensiones conocidas, esta colección está formada por 13 aludes *grandes*, 17 *medianos* y 18 *pequeños*.

Los datos experimentales que son analizados en los resultados fueron previamente seleccionados. Los registros que presentaron alguna anomalía técnica (campana Núria 1996/97, 3 registros) fueron descartados quedando la siguiente colección de 92 registros (consultar detalles en Anexo):

### \* Boí Taüll

11/02/1996: 1 alud registrado en 2 emplazamientos

11/02/1996: 1 alud registrado en 1 emplazamiento

### \* Vall de Núria

24/01/1996: 3 aludes registrados en 3 emplazamientos cada uno

1/02/1996: 4 aludes registrados en 3 emplazamientos cada uno

10/01/1999: 2 aludes registrados en 1 emplazamiento cada uno

23/12/2000: 1 alud registrado en 1 emplazamiento

### \* Vallée de La Sionne

15/02/1996: 1 alud registrado en 1 emplazamiento

16/02/1997: 2 aludes registrados en 1 emplazamiento cada uno

30/01/1999: 1 alud registrado en 3 emplazamientos

10/02/1999: 1 alud registrado en 3 emplazamientos

25/02/1999: 1 alud registrado en 3 emplazamientos  
 27/12/1999: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 29/01/2000: 1 alud registrado en 1 emplazamiento  
 10/02/2000: 4 aludes registrados en 1 emplazamiento cada uno  
 20/02/2000: 2 aludes registrados en 1 emplazamiento cada uno y 2 aludes registrados en 3 emplazamientos cada uno  
 5/03/2001: 3 aludes registrados en 1 emplazamiento cada uno  
 29/12/2001: 5 aludes registrados en 2 emplazamiento cada uno  
 13/02/2002: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 21/02/2002: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 22/02/2002: 2 aludes registrados en 2 emplazamientos cada uno  
 13/03/2002: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 20/03/2002: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 22/12/2002: 1 alud registrado en 1 emplazamiento  
 2/01/2003: 1 alud registrado en 2 emplazamientos  
 31/01/2003: 3 aludes registrados en 2 emplazamientos cada uno  
 4/02/2003: 2 aludes registrados en 2 emplazamientos cada uno

Este conjunto de registros simultáneos a aludes siguió un proceso de selección (*Figura 7-1*) con el fin de discernir entre señales que fueran predominantemente ruido de fondo, señales generadas por fuentes ajenas al alud (helicóptero, explosión, sismos, etc) y SSA.

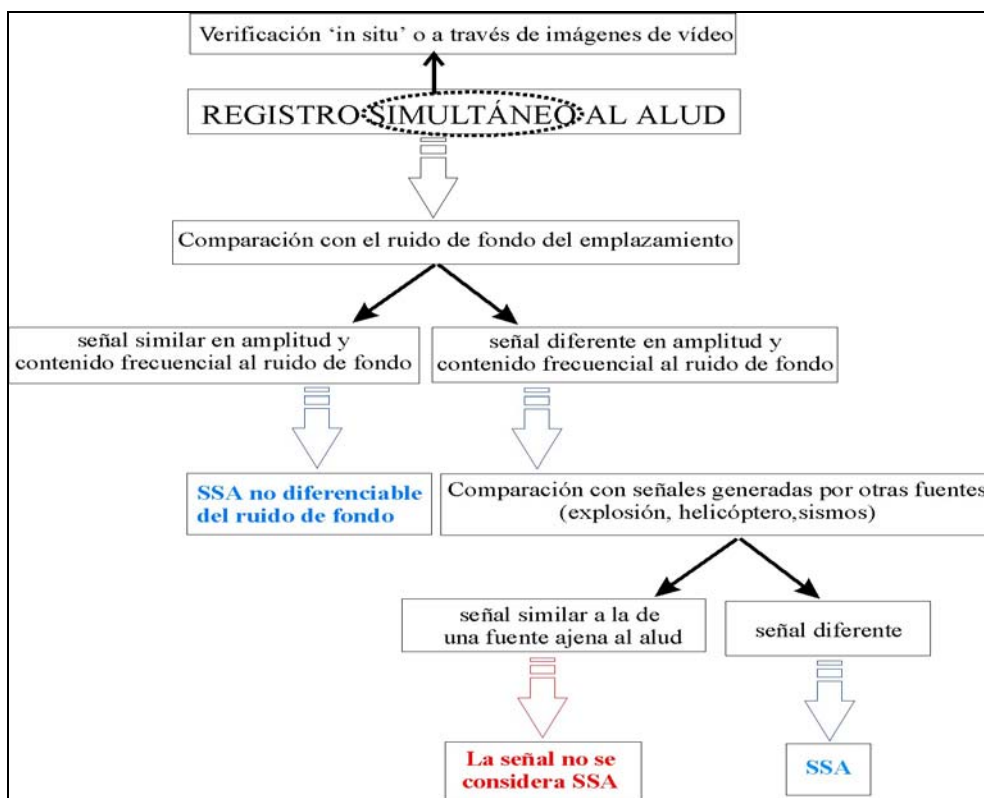


Figura 7-1. Organigrama del razonamiento seguido para seleccionar las SSA de nuestra colección de datos.

### 7.1.1 Características en el dominio temporal

Los paquetes de ondas que forman las envolventes de las SSA dependen del lugar en el que son registradas, del tipo de flujo del alud, de su dimensión y del canal por el que se desarrolla. La dependencia de la envolvente con el canal del alud fue observada también en los trabajos de Bonnet (1980), Nishimura e Izumi (1997) y Firstov y otros (1991). A pesar de esta variabilidad se observa una reproducibilidad, es decir se observan envolventes similares en aludes del mismo tipo de flujo y dimensión y con trayectorias similares (Suriñach y otros, 2000). Un ejemplo de esta característica puede apreciarse en las SSA (Anexo) correspondientes a los dos aludes *medianos* mixtos registrados el 22 de febrero de 2002 (1º alud) y el 31 de enero de 2003 (2º alud) en el emplazamiento B de Vallée de la Sionne. Otro ejemplo son las SSA (Anexo) generadas por los aludes *medianos* de flujo del 13 de febrero de 2002 y 13 de marzo de 2002 en los emplazamientos B y C de Vallée de La Sionne. En estos ejemplos se puede observar la similitud de las envolventes en aludes registrados en el mismo emplazamiento, de similar tipo de flujo y dimensión y desarrollados en el mismo canal.

Tal y como se comentó previamente las SSA dependen del lugar en el que son registradas. SSA generadas por un mismo alud varían significativamente en amplitud y en forma de su envolvente según donde se registren, dependiendo de las siguientes características:

- Posición relativa entre el alud y el sensor. Las SSA de nuestra colección se caracterizan por tener una envolvente cuyas amplitudes aumentan progresivamente en el inicio (*Figura 7-2*). No obstante hay que tener en cuenta que todos nuestros aludes se aproximaban al sensor, al menos durante los primeros instantes de su trayectoria. Esta característica también fue observada por Bonnet (1980) y Lafeuille (1985). En el que caso en que el sensor se encontrara instalado por encima de la zona de salida del alud (Imanishi y otros, 2003) cabría esperar una SSA con amplitudes máximas en el inicio y posteriormente una progresiva disminución, es decir, una envolvente opuesta a las SSA de nuestra colección. Algunos ejemplos claros de esta dependencia se presentan en la *Figura 7-3*. Los registros generados por un mismo alud en un sensor situado a una altura media del canal de alud (emplazamiento B de Vallée de La Sionne) y en otro situado al final del canal (emplazamiento C de Vallée de La Sionne) pueden tener envolventes con formas simétricas.
- Distancia entre el alud y el sensor. Cuando la distancia aumenta las amplitudes de las SSA disminuyen. Un ejemplo de esta característica puede comprobarse en los registros del alud del 20 de marzo de 2002 (Anexo). Este alud pasó por encima del emplazamiento B y frenó a  $\sim 200$  m del emplazamiento C. En el emplazamiento B los registros presentaron máximas amplitudes del orden de  $10^{-3}$  m/s y en el emplazamiento C las máximas amplitudes del registros fueron de  $10^{-5}$  m/s.
- Características sísmicas del emplazamiento del sensor (efectos de sitio, efectos topográficos, ruido de fondo). Nuestros sensores fueron instalados sobre roca en todos los experimentos a excepción del emplazamiento utilizado en las campañas del 1997 al 2001 en Vall de Núria. En este caso se aplicó la técnica de Nakamura, los resultados no detectaron ningún efecto de sitio. No obstante, nuestros sensores fueron instalados en todos los experimentos en emplazamientos situados en grandes pendientes por lo que los efectos topográficos (Spudich y otros, 1996) no deberían descartarse.

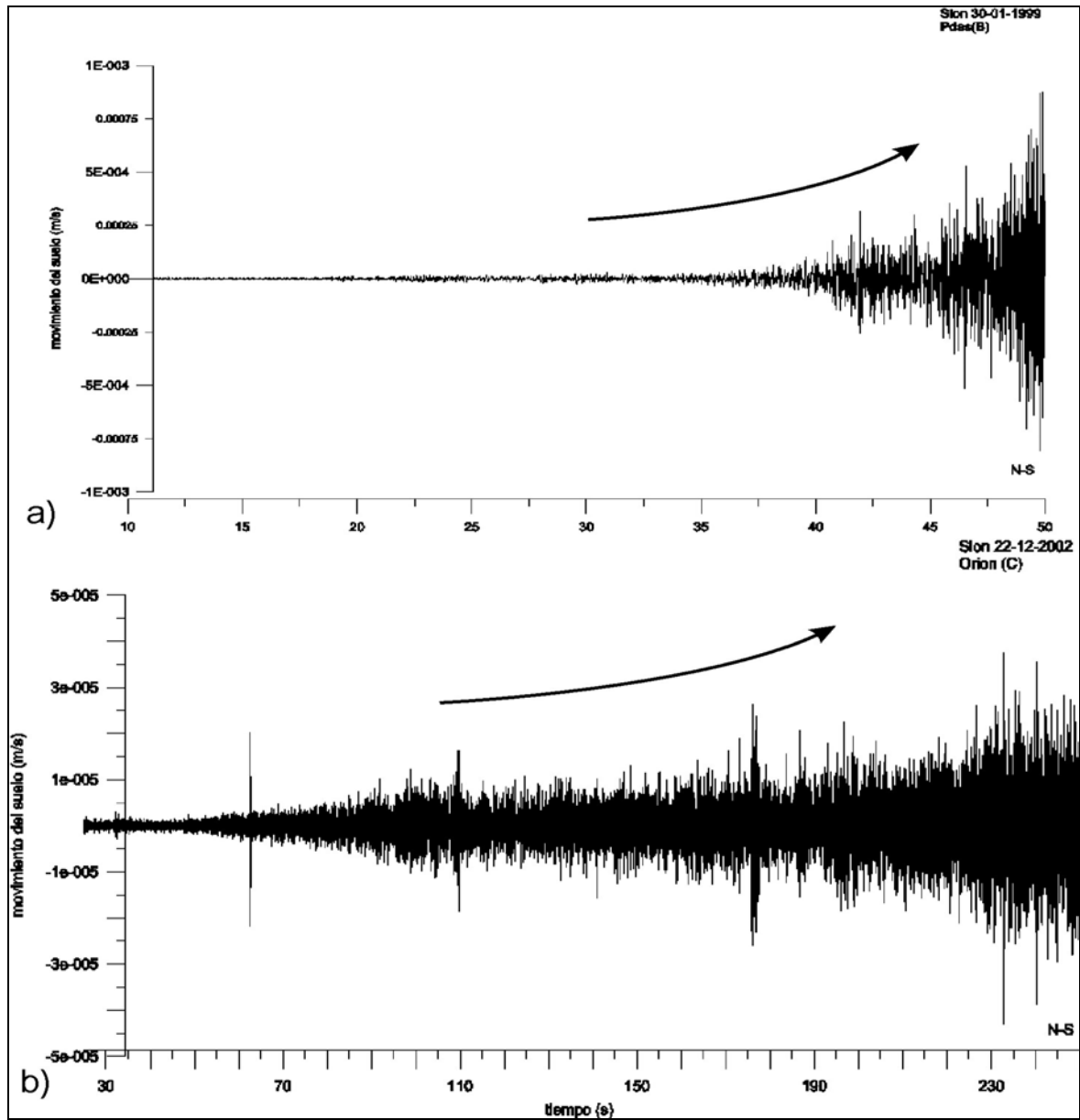


Figura 7-2. Parte inicial de dos SSA. Las flechas indican las tendencias de las amplitudes. (a) Registro (N-S) del alud del 30 de enero de 1999 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. (b) Registro (N-S) del alud del 22 de diciembre de 2002 en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

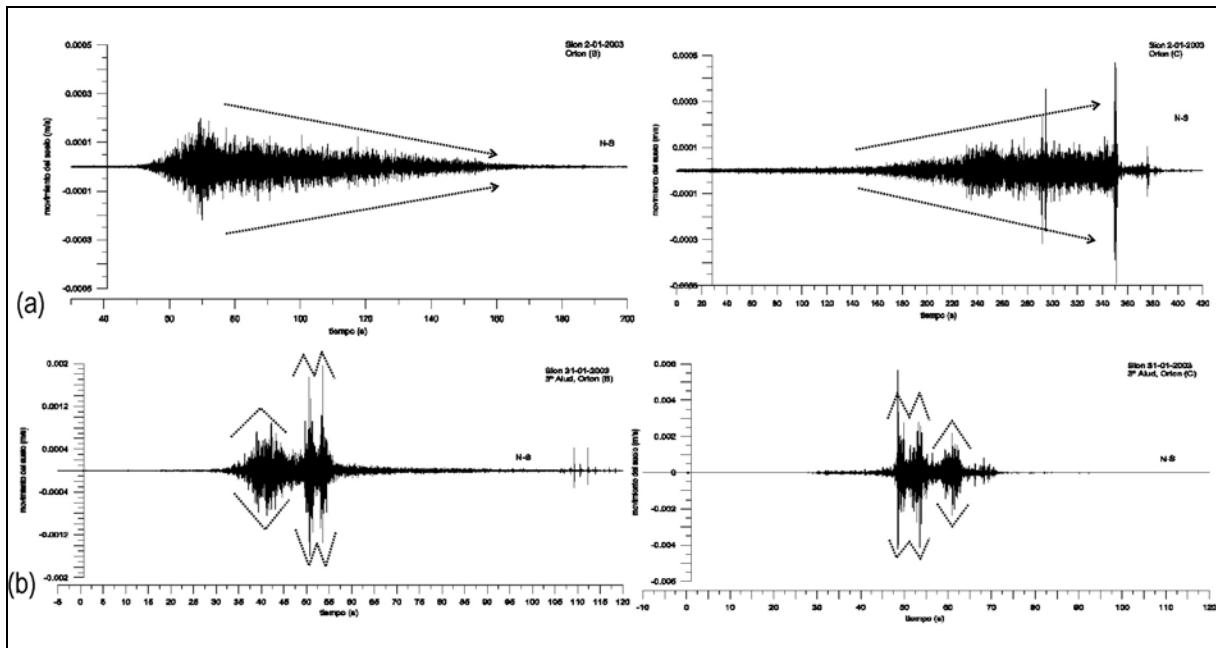


Figura 7-3. Dependencia de la forma de la envolvente de la SSA con la posición relativa entre el sensor y el alud. (a) Alud de flujo registrado el 2 de enero de 2003 en los emplazamientos B (izquierda) y C (derecha) de Vallée de La Sionne. (b) Alud mixto registrado el 31 de enero de 2003 en los emplazamientos B (izquierda) y C (derecha) de Vallée de La Sionne. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

La dependencia de las SSA con el tipo de flujo del alud queda reflejada en los resultados sobre las máximas amplitudes y la duración temporal que se presentan a continuación. Adicionalmente se observa una característica común en los registros de aludes de flujo y aludes mixto de nuestra colección, que no se observa en los registros de aludes aerosol, ésta consiste en el aumento repentino de amplitudes en la parte final de las SSA (Figura 7-4) y que se asocia a la fase de detención del alud en la que los depósitos chocan entre sí y se acumulan progresivamente hasta detenerse.

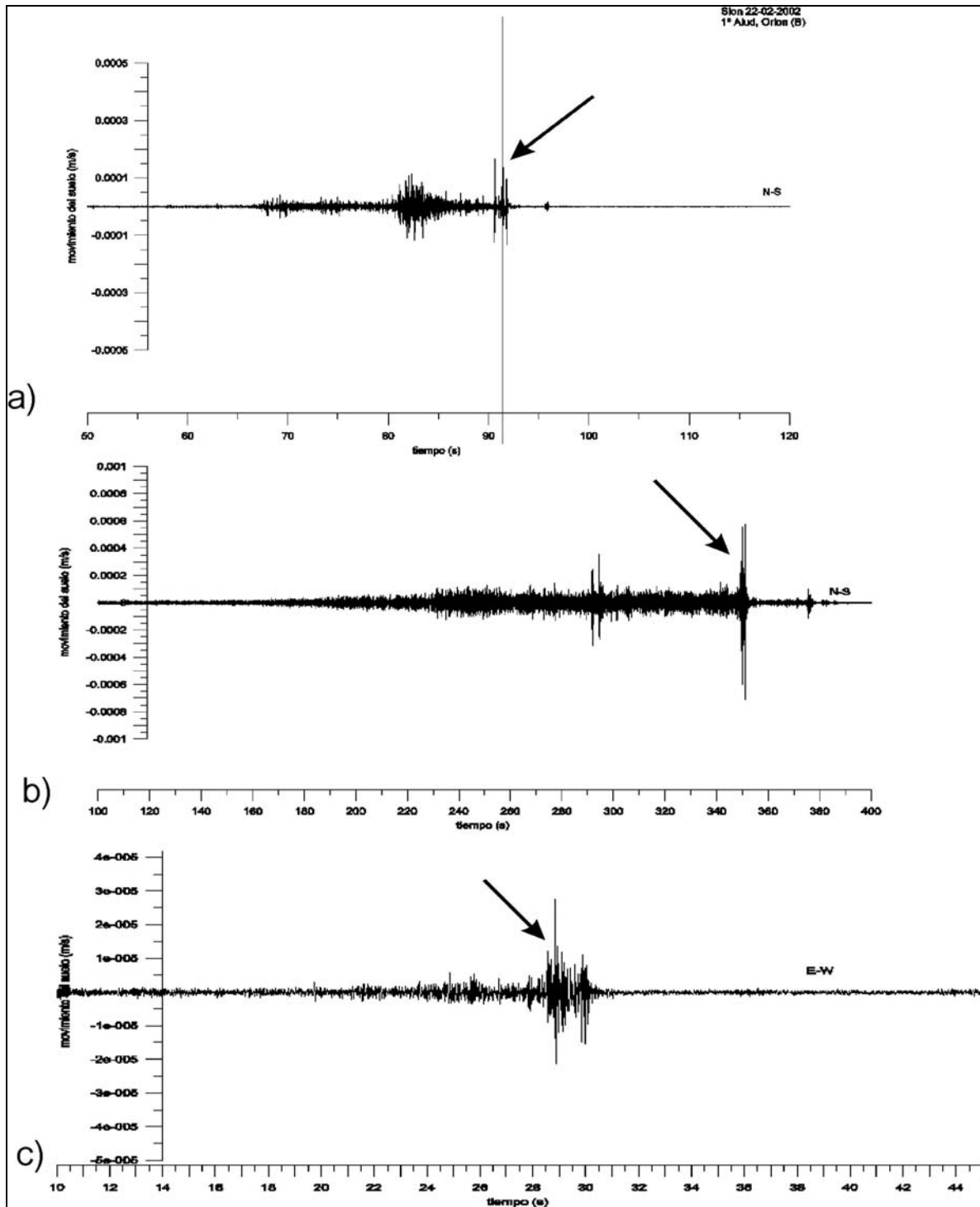


Figura 7-4. SSA en las que se observa un aumento de las amplitudes en la fase de detención del alud. Las flechas indican el aumento de amplitudes. (a) Registro (N-S) del alud del 22 de febrero de 2002 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. (b) Registro (N-S) del alud del 2 de enero de 2003 en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. (c) Registro (E-W) del alud del 1° alud del 1 de febrero de 1996 en el emplazamiento UB3 de Vall de Núria. Consultar detalles de las señales en el Anexo.

Las características del dominio temporal que se han podido cuantificar son dos: la máxima amplitud registrada y la longitud del registro. A continuación se hace una relación de los factores que pueden influir en estas características y se comenta su estado de conocimiento:

- Masa involucrada en el alud: en nuestros experimentos, como en la gran mayoría de los experimentos llevados a cabo sobre este fenómeno, se desconoce la masa involucrada en el alud. Se sabe que hay grandes variaciones entre la masa inicial y la masa del depósito debido a la incorporación de nieve durante el recorrido del alud pero, hasta el momento, no se tienen datos numéricos. Tampoco tenemos datos sobre la densidad de la nieve en la zona de salida, tan solo tenemos datos sobre las fracturas lo cual nos permite dar estimaciones de los volúmenes de salida, en el caso de aludes de placa.
- Tipo de flujo del alud: este dato es conocido para la mayoría de nuestros aludes y se obtiene mediante observaciones de campo e imágenes de vídeo.
- Velocidad del alud: en la mayoría de nuestros experimentos la velocidad del alud no pudo ser cuantificada. Las únicas excepciones fueron tres aludes registrados en la campaña de 1998/99 y dos registrados en la campaña de 2001/02 en el de Vallée de La Sionne cuyas grabaciones en vídeo fueron de buena calidad y permitieron estimar la velocidad del frente del alud (*Tabla 7-1*). La velocidad del alud del 10 de febrero de 1999 de Vallée de La Sionne también fue estudiado por Rammer y otros (2003) mediante radares Doppler.
- Recorrido del alud: este dato es conocido para la mayoría de nuestros aludes y se obtiene mediante observaciones de campo e imágenes de vídeo.
- Distancia del sensor al alud: este dato es calculado a partir de las cartografías de los aludes obtenidas mediante observaciones de campo e imágenes de vídeo.
- Atenuación de las ondas sísmicas con la distancia: en esta tesis no se han realizado estudios de atenuación.

Los resultados de máximas amplitudes y de duración temporal se clasifican según la dimensión del alud (*grande, mediano y pequeño*) estimada a partir del volumen de la zona de salida y/o el recorrido del alud, el tipo de flujo del alud y la distancia mínima a la que fueron registrados. Las caracterizaciones de SSA que realizaron otros investigadores (Navarre y Danielou 1987, Leprettre, 1996 y Leprettre y otros, 1998) no distinguieron el tipo de alud que las generó, ni la distancia a la que fueron registradas, asignando las mismas características a todas las SSA. A continuación veremos como las SSA varían según estos parámetros.

En nuestra colección de registros no hay ninguno realizado a una distancia mayor de 2 km entre la zona de detención del alud y el sensor. En estos resultados también se destaca el hecho de que hay varias combinaciones de estas tres características (volumen de salida, tipo de flujo y distancia de registro) de las cuales no se tienen datos, esto es importante que quede claro a la hora de interpretar los resultados y a la hora de ser conscientes de la necesidad futura de completar el catálogo de datos.

En algunos registros obtenidos a lo largo de nuestras campañas experimentales se observaron diferencias entre las tres componentes (Z, N-S y E-W). Por ejemplo, en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne las componentes horizontales tuvieron registros de mayor amplitud que la componente vertical (*Anexo*). Dado que en estos casos los registros de ruido de fondo también presentaron las mismas diferencias, estas características no se atribuyeron a las SSA. Consecuentemente los resultados no se diferencian y son válidos para las tres componentes.

El equipo instrumental suizo coincidía con uno de nuestros equipos en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Un estudio comparativo exhaustivo de los registros proporcionados por el equipo suizo y nuestras señales y el estudio del ruido de fondo de los registros suizos nos llevó a concluir que las amplitudes de los equipos suizos no eran fiables. Dado que fueron equipos que no pudieron ser controlados por nosotros las amplitudes de estos registros no se tuvieron en cuenta en este estudio.



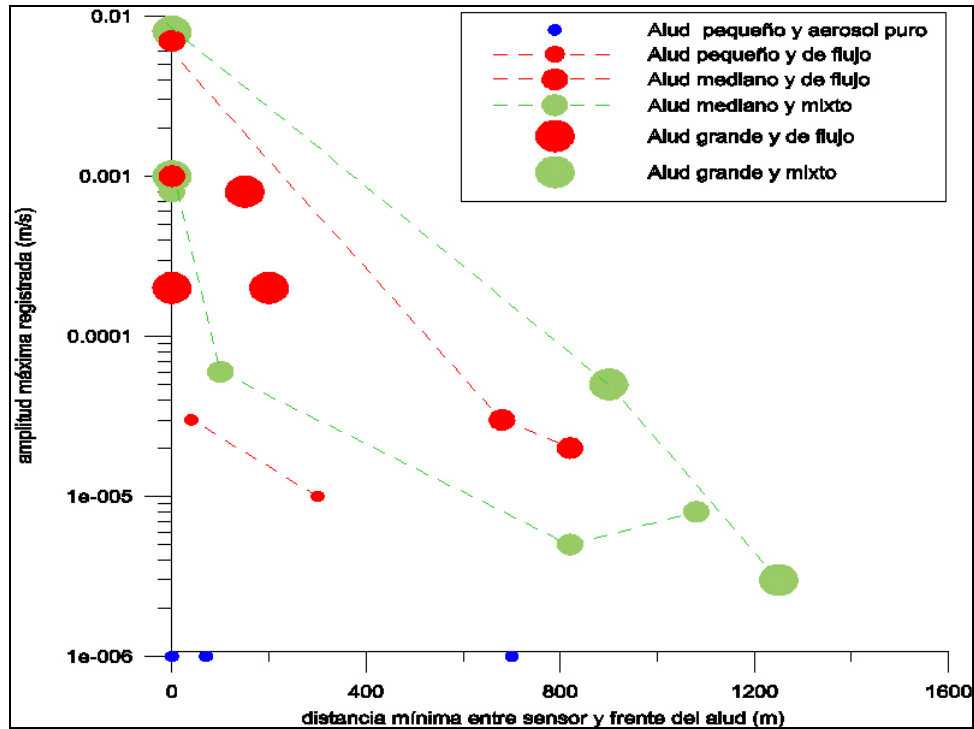


Figura 7-5. Amplitudes máximas de las SSA según la distancia a la que fueron registradas, el tipo de flujo del alud y su dimensión.

En la *Figura 7-5* se sintetizan las amplitudes máximas registradas según las distancias alud-sensor, el tipo de flujo y la dimensión del alud. Los resultados pueden resumirse en estos puntos:

- Las amplitudes disminuyen con el aumento de las distancias entre el sensor y el alud, por consiguiente los aludes que pasan sobre el emplazamiento del sensor son los que generan las máximas amplitudes.
- Las amplitudes aumentan al aumentar las dimensiones del alud.
- Para mismas distancias y mismas dimensiones, los aludes de flujo generan mayores amplitudes que los mixtos.
- Para aludes que pasan por encima del emplazamiento del sensor los registros varían entre  $10^{-6}$  m/s para aludes de aerosol puro hasta  $8 \cdot 10^{-3}$  m/s generadas por aludes mixtos *grandes*.
- Para distancias similares los aludes de flujo *medianos* generan amplitudes similares que los aludes mixtos *grandes*.
- Los aludes de flujo *medianos* pueden generar señales del mismo orden de magnitud que los aludes mixtos *grandes*.
- Los aludes aerosol son los aludes que generan menores amplitudes.
- Dentro de una misma clasificación también se observan variaciones en los resultados. Así para aludes de flujo *medianos* que pasan sobre el sensor observamos SSA con amplitudes máximas que varían entre  $7 \cdot 10^{-3}$  m/s y  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

En nuestra colección hay aludes mixtos *pequeños* registrados a distancias mayores de 1 km y aludes de flujo *pequeños* registrados a distancias menores de 1 km, pero éstos generaron una señal de amplitud semejante a la del ruido de fondo por lo que no se pueden discernir.

A pesar de las limitaciones de detección de las SSA con la distancia, que revelan nuestros resultados, hay que citar los aludes, con volúmenes entre  $10^5$  y  $10^6$  m<sup>3</sup> y con piedras y hielo involucrado en el flujo, detectados a 67 km de distancia por Norris (1994).

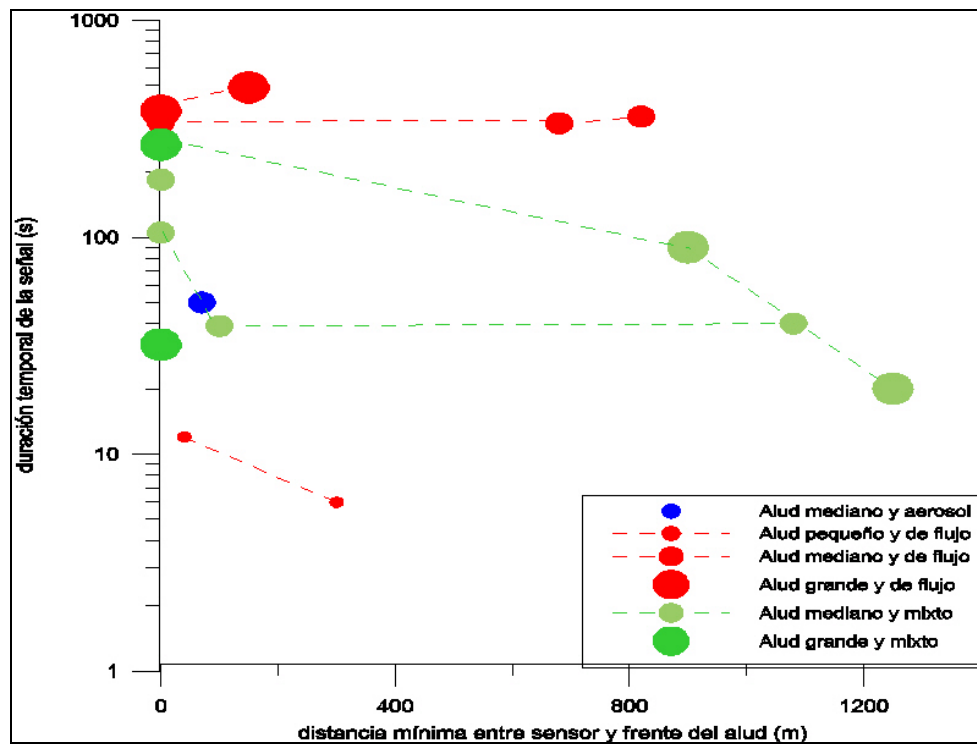


Figura 7-6. Duración temporal de las SSA según la distancia a la que fueron registradas, el tipo de flujo del alud y su dimensión.

La Figura 7-6 sintetiza los resultados observados sobre la duración temporal de las SSA. La duración temporal de las SSA se calcula a partir de los segundos en los que las amplitudes de la SSA superan el nivel medio de ruido en un 10 %. Los registros con alto nivel de ruido no contribuyeron en este análisis. Los resultados pueden resumirse en estos puntos:

- Los aludes de flujo *grandes* y *medianos* generan las SSA de mayor duración temporal.
- Para aludes mixtos de una similar dimensión la duración temporal de las SSA es inversamente proporcional a la distancia alud-sensor.
- Aludes de flujo de similar dimensión presentan SSA de similar duración independientemente de la distancia alud-sensor.
- Para misma distancia y misma dimensión los aludes mixtos presentan SSA de menor duración que los aludes de flujo.
- Dentro de una misma clasificación también se observan variaciones en los resultados. Por ejemplo se observa SSA de aludes mixtos *grandes* que pasaron sobre el emplazamiento del sensor de duraciones temporales entre 15 s y 300 s.

Si comparamos los resultados de las Figura 7-5 y Figura 7-6 podemos observar que las amplitudes de las SSA presentan una mayor dependencia con la distancia que su duración temporal. La duración temporal de las SSA es más fuertemente dependiente del tipo de flujo del alud. Una posible explicación es que la duración de las SSA esté determinada por la velocidad del alud. Las imágenes de vídeo (apartado 7.3) nos muestran que los aludes de flujo presentan menores velocidades que los aludes mixtos lo cual sería coherente con el hecho de que las SSA de los aludes de flujo son más largas en el tiempo que las otras.

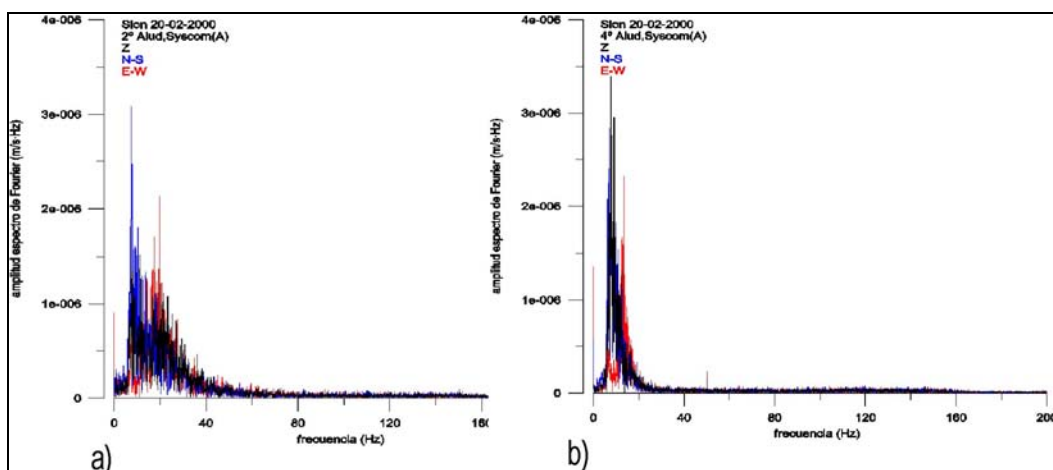
A diferencia de las señales producidas por terremotos en las SSA no se observan las llegadas P y S diferenciadas. Tal como se explicó en el capítulo 1, el alud de nieve puede considerarse como un conjunto de múltiples fuentes sísmicas móviles repartidas en una superficie que varía a lo largo del desarrollo del alud. A partir de este modelo se piensa que el sensor sísmico recibe continuamente las múltiples fases generadas por todo el conjunto de fuentes. Además dada la corta distancia a la que se registran (en nuestra colección no hay ningún registro a más de 2 km de distancia) las diferentes fases llegan prácticamente simultáneas. Se realizó el estudio del movimiento de la partícula en registros de diferentes emplazamientos con el fin de identificar fases. El resultado reflejó una falta de polarización constante en la señal y no se pudieron diferenciar con claridad las fases. Este resultado general tuvo como excepción los registros realizados en las campañas de 1995/96 y 1996/97 en Vallée de La Sionne. En estos registros se observó una polarización elíptica (Suriñach, 2000) a lo largo de todo el registro. Sin embargo esta característica podría ser atribuible a un efecto de sitio o efecto topográfico ya que sólo fue observada en los registros de este emplazamiento. A pesar de los resultados comentados, este estudio se considera preliminar por lo que sería interesante realizar en el futuro un estudio en profundidad de la polarización de las SSA con el fin de averiguar los tipos de ondas que las componen. La diferencia de coherencia entre fases de las señales de sismos y las SSA fue observada por Lafeuille (1980). A lo largo de los años de investigación sobre SSA algunos autores como Lepretre (1996) se plantearon la posibilidad de localizar los aludes a partir de la señal sísmica generada. Los métodos de cálculo de acimut utilizados en señales de terremotos (por ejemplo Plesinger y otros, 1986 y Vidale, 1986) se basan en el previo conocimiento de la fase analizada. Por este motivo se considera imprescindible conocer previamente la fase antes de aplicar los métodos de cálculo de acimut. Actualmente las localizaciones de eventos sísmicos generados en volcanes se hace mediante antenas sísmicas (Almendros, 2002). Estos eventos se caracterizan por no tener una clara diferenciación de fases y por perder coherencia con la distancia, por ello el uso de las técnicas habituales de una red sísmica no da resultados buenos. Sin embargo, el uso de antenas sísmicas permite una buena localización de estos eventos. Un método interesante para la localización de aludes a partir de las SSA, tanto en el caso de que se confirmase la imposibilidad de diferenciar las fases como en el caso contrario, sería el uso de antenas sísmicas.

### 7.1.2 Características en el dominio frecuencial

En los cálculos de los espectros de Fourier de toda la señal se ha observado que las SSA son señales de banda limitada:

- Frecuencia superior: nuestros equipos registraron las señales con un muestreo de 100 m.p.s. por lo que no podemos detectar frecuencias superiores a 50 Hz que es la frecuencia de Nyquist correspondiente (Newland, 1975). Sin embargo, los equipos suizos registraron con un muestreo de 400 m.p.s. lo que nos permitió analizar un espectro de frecuencias más amplio (frecuencia de Nyquist de 200 Hz). En los espectros de Fourier (*Figura 7-7*) de los registros, sin filtrar, obtenidos en el emplazamiento A (*Figura 5.8*) se observa que cuando los aludes pasaron por encima del emplazamiento del sensor (*Figura 7-7 a*) se obtuvieron señales con frecuencias hasta 45 Hz. En los casos en los que los aludes no pasaron por encima del emplazamiento del sensor (*Figura 7-7 b*) las señales tuvieron como frecuencia superior 20 Hz. Este resultado nos asegura la buena elección del muestreo con el que trabajaron nuestros equipos y del filtrado que se aplica a nuestros datos (capítulo 7). Estos resultados se observaron en todos los registros de nuestra colección (Anexo).
- Frecuencia inferior: todos los equipos utilizados tienen frecuencias propias iguales o superiores a 0.2 Hz por lo que no se estudió el contenido frecuencial inferior a 0.2 Hz. No obstante en la mayoría de los espectros de Fourier calculados el contenido frecuencial decrece significativamente a partir de frecuencias inferiores a 2 Hz. Este resultado se deduce de los espectros calculados previamente al filtrado de las señales.

El estudio del contenido frecuencial total corrobora la dependencia de las SSA con el emplazamiento en el que se registran ya que las frecuencias de las señales dependen significativamente de la distancia a las que son registradas. Sin embargo, en nuestros registros la dependencia del contenido frecuencial total con el tipo de flujo del alud y con su dimensión no es significativa. Los resultados obtenidos por Bonnet (1980), Lafeuille (1985) y Leprettre (1996) sobre el contenido frecuencial están comprendidos dentro de los límites de estos resultados.



*Figura 7-7. Espectros de Fourier de dos SSA obtenidas por equipos suizos en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Registros sin filtrar. a) Espectro de Fourier de una SSA generada por un alud que pasó por encima del emplazamiento del sensor. b) Espectro de Fourier de una SSA generada por un alud que no pasó por encima del emplazamiento del sensor. Consultar detalles sobre los aludes en el Anexo.*

### 7.1.3 Características en el dominio tiempo-frecuencia

El estudio de la variación del contenido frecuencial en el tiempo se hizo a partir de los espectros corridos (EC) o espectrogramas (capítulo 6). Los resultados de los EC se representan en esta tesis con gráficas 3-D (*Figura 7-8*). En el eje de abscisas X se representa el tiempo, en el eje de ordenadas Y se representa la frecuencia y las amplitudes del espectro de Fourier se representan con la escala de colores. En cada gráfica se ha utilizado la escala de colores que permitía la mejor visualización de la evolución frecuencial. Los valores de estas gráficas se representan con cuadrados centrados en el valor de tiempo y frecuencia, con una altura de 0.78 Hz y una anchura de 1.28 s (capítulo 6). Los EC que se presentan a continuación tienen escalas diferentes con el fin de conseguir la visualización de la evolución frecuencial más óptima. Los EC nos dan la información temporal y frecuencial de la señal conjuntamente, lo cual nos permite comprender mejor las señales. Como ejemplo se presenta (*Figura 7-8*) el EC del 2º alud registrado en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne el 20 de febrero de 2000. Este alud mixto *grande* fue provocado de forma artificial mediante explosivos lanzados desde un helicóptero. La primera señal de la explosión se observa a 0 s, corresponde a la onda sísmica producida por la explosión que se propaga por el suelo y presenta amplitudes máximas entre [5-15] Hz. Posteriormente llega la señal sonora de la explosión cuyo contenido frecuencial abarca todo el espectro. Entre los segundos 20 y 85 se observa la señal del alud, esta señal presenta un aumento gradual del contenido en altas frecuencias a medida que el alud se acerca al sensor. Simultáneamente a estas señales en el EC aparecen dos bandas a ~18 Hz y ~35 Hz correspondientes a las señales generadas por el sonido del helicóptero que sobrevolaba la zona durante todo el experimento. La señal del helicóptero aparece en todos nuestros registros de aludes provocados artificialmente en Vallée de La Sionne.

Chritin y Rossi (1997) registraron la señal acústica de aludes artificiales a 1 km de distancia en Vallée de La Sionne. Los registros acústicos del alud mostraban señales dentro del rango de frecuencias de [0-15] Hz. En sus registros también detectaron las dos bandas atribuidas al sonido del helicóptero en las mismas frecuencias que en nuestros registros sísmicos. Consecuentemente cabe esperar que nuestros registros sísmicos contengan la señal sísmica generada por el sonido del alud que ellos detectaron. Para poder discernir dentro de la SSA el contenido de origen sísmico propiamente y el de origen sonoro del alud serían necesarios más estudios comparativos entre señales sísmicas y acústicas.

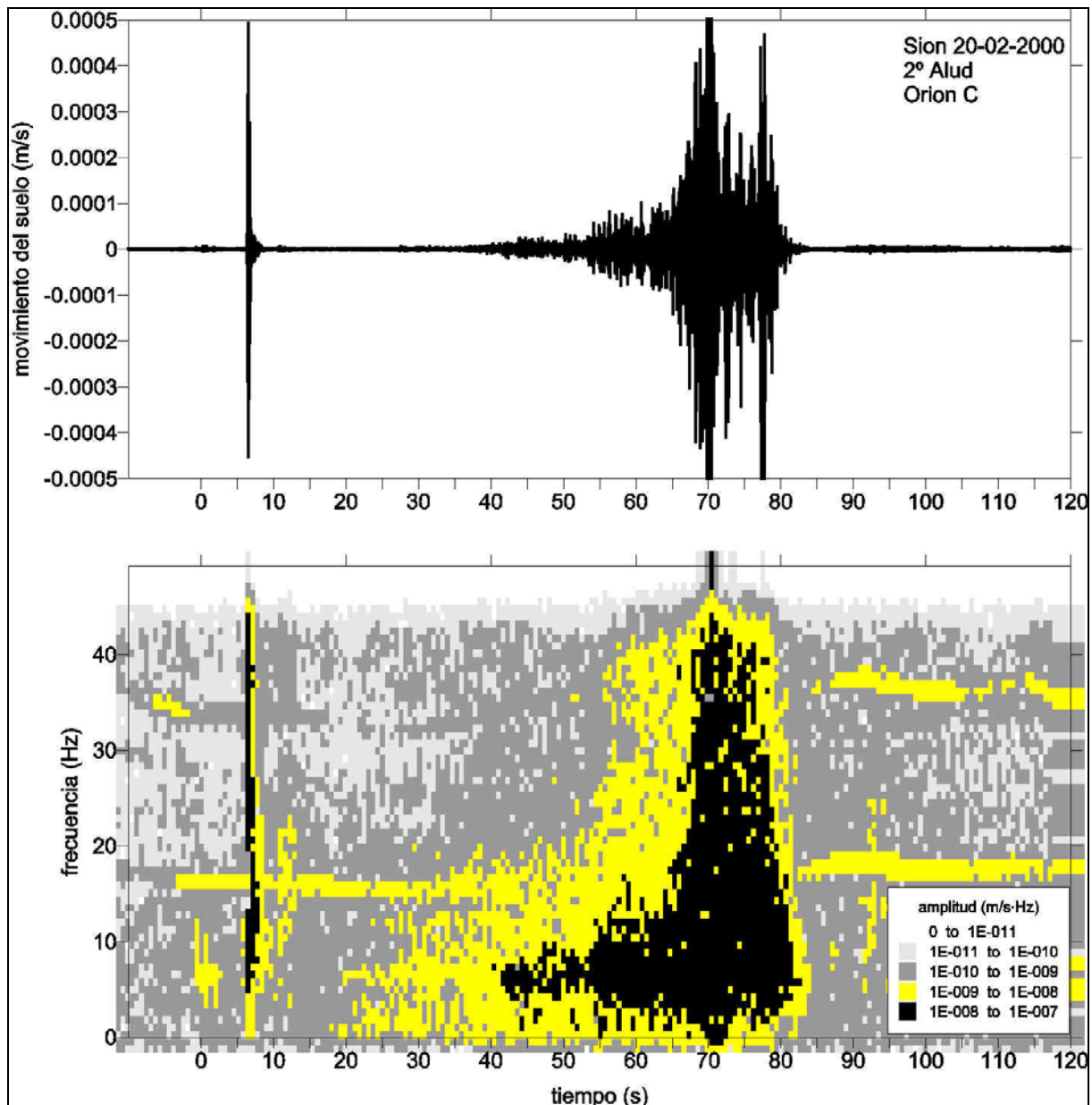


Figura 7-8. Sismograma y EC del 2º alud provocado en Vallée de La Sionne el 20 de febrero de 2000. El registro fue obtenido en el emplazamiento C. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

A lo largo de esta tesis hemos interpretado el alud como un conjunto de múltiples fuentes sísmicas en movimiento. La variación de la distancia fuentes-sensor a lo largo del registro genera una señal cuyo contenido frecuencial no es constante si no que tiene una evolución característica (Biescas y otros, 2002 a y Biescas y otros, 2002 c). A medida que el alud se aproxima al sensor el contenido en altas frecuencias aumenta y se hace máximo a su paso sobre el emplazamiento del sensor. Esta evolución es debida a que la atenuación espacial de las señales sísmicas es proporcional a su frecuencia, es decir como más altas son las frecuencias más se atenúan espacialmente (Lay y Wallace, 1995). El aumento de la frecuencia de máxima amplitud de la SSA al aproximarse el alud al sensor también fue observado en los trabajos de Lepretre (1996) y Nishimura e Izumi (1997).

Otra posible contribución al aumento del contenido en altas frecuencias podría atribuirse al efecto Doppler. Este efecto consiste en la variación de la frecuencia de la señal recibida

respecto a la frecuencia emitida debido a la velocidad relativa entre emisor y receptor. La expresión que relaciona estas frecuencias es (Ec. 8-1) (ver i.e.Tipler, 1994):

$$f_{receptor} = \frac{v_{señal} - v_{receptor}}{v_{señal} - v_{emisor}} f_{emisor}$$

Ec. 8-1

Donde:

$f_{receptor}$  : frecuencia de la señal recibida por el observador

$f_{emisor}$  : frecuencia de la señal emitida por el emisor

$v_{señal}$  : velocidad de propagación de la señal

$v_{receptor}$  : velocidad de traslación del receptor

$v_{emisor}$  : velocidad de traslación del emisor

En los EC observamos que la señal recibida experimenta un aumento en el contenido de altas frecuencias a medida que el alud se acerca al sensor. Por otra parte estudios realizados sobre la velocidad del alud a partir de imágenes de vídeo y radares Doppler (Rammer y otros, 2003) muestran como la velocidad del alud aumenta a medida que se desarrolla. La Ec. 8-1 muestra como al aumentar la velocidad del emisor y la frecuencia recibida debe aumentar, considerando el resto de variables constantes. Consecuentemente debemos considerar la posibilidad de que la evolución de los EC se deba al efecto Doppler. Para considerar esta posibilidad aplicaremos valores numéricos realistas a la ecuación del efecto Doppler (Ec. 8-1) con el fin de calcular los órdenes de variación en la frecuencia debidos a las variaciones en las velocidades del emisor (alud de nieve). Representaremos estos valores en función de la velocidad de la onda sísmica puesto que en nuestros estudios no hemos hecho cálculos sobre esta magnitud. En nuestro caso podemos considerar los siguientes valores:

$v_{receptor}$  esta velocidad es nula (el sensor sísmico está fijo).

$v_{emisor}$  aplicamos valores extremales basados en los estudios de radar Doppler hechos por el equipo austríaco (Rammer y otros, 2003). En estos estudios se observa como la velocidad del alud varía entre 1 m/s y 80 m/s aproximadamente, desde su inicio hasta el final de su evolución, antes de alcanzar la zona de frenado.

$$\% \Delta f_{receptor} = \frac{\frac{v_{señal}}{v_{señal} - 80 \text{ m/s}} - \frac{v_{señal}}{v_{señal} - 1 \text{ m/s}}}{\frac{v_{señal}}{v_{señal} - 1 \text{ m/s}}} \times 100$$

Ec. 8-2

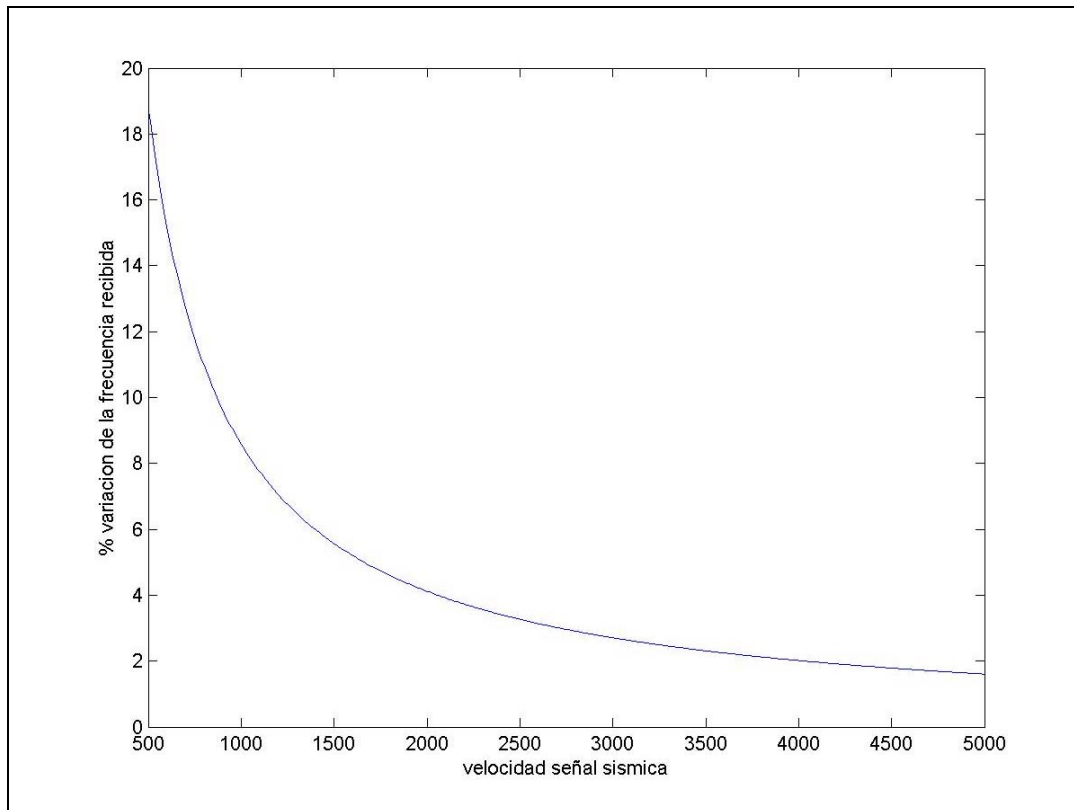


Figura 7-9 Variación de la frecuencia recibida debida al aumento de velocidad de la fuente desde 1 m/s hasta 80 m/s (efecto Doppler).

La variación en las frecuencias durante la evolución del alud debida al afecto Doppler sería en cualquier caso menor de un 20% (Figura 7-9). En los EC observamos que inicialmente la señal tiene un pico frecuencial predominante sobre los 10 Hz y a medida que el alud se acerca al sensor el pico frecuencial se traslada sobre los 30-35 Hz, es decir que hay un aumento en las frecuencias predominantes del 250%. Dado este resultado podemos concluir que la evolución frecuencial observada en los EC no es debida al efecto Doppler. Este estudio además nos demuestra que el efecto Doppler es despreciable en el estudio de las señales sísmicas producidas por aludes de nieve debido a que la velocidad de las ondas sísmicas es mucho mayor, dos órdenes de magnitud mayor, que la velocidad de traslación del alud de nieve.

El EC proporciona información temporal y frecuencial simultánea lo cual presenta ventajas importantes a la hora de analizar las SSA. En el caso de aludes provocados artificialmente (explosivos), la aparición de señales de baja amplitud posteriores a la explosión presenta problemas a la hora de saber si son SSA o provienen de otra fuente (ecos de la explosión, el helicóptero que lanza los explosivos, etc). Para ejemplificar esta idea comparamos el registro de una explosión que provocó un alud (Figura 7-10 a) con el registro de una explosión que no provocó alud (Figura 7-10 b). Ambos registros fueron obtenidos en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. El alud provocado fue un alud mixto *mediano* cuyo frente se detuvo a ~820 m del sensor. En el dominio temporal se observa una señal de baja amplitud posterior a la de la explosión en ambos casos, lo cual induciría a pensar que ambas explosiones provocaron aludes. Los EC nos dan la información frecuencial de ambas señales lo cual nos permite discernir cuando se produjo el alud. En el primer registro aparece una SSA (señal entre 20 s y 90 s con frecuencias entre 5 Hz y 15 Hz) junto con la señal del helicóptero (bandas a 15-20 Hz y 35 Hz). En el segundo registro se observa que la señal posterior a la



explosión pertenece al helicóptero (bandas a 15-20 Hz y 35 Hz) y que no hubo ningún alud. Otro resultado de este ejemplo es que a la hora de interpretar nuestros registros hay que considerar que las señales del helicóptero quedaron superpuestas en SSA de aludes artificiales de La Sionne y que estas señales son de similares amplitudes a las de aludes *medianos* mixtos por lo que la superposición no es despreciable.

Los aludes provocados son uno de los métodos de protección activa temporal del peligro de aludes que se utiliza en las estaciones de esquí. Las vertientes en las que hay acumulación de nieve, suficiente como para representar peligro de alud, se intentan purgar mediante explosivos. Las purgas son generalmente aludes de *pequeñas* dimensiones. Dado que los EC pueden ayudar a la hora de detectar SSA de pequeña amplitud se quiso comprobar su utilidad a la hora de verificar purgas, este método fue probado en la estación de Vall de Núria. Se aplicó este estudio a las 14 purgas registradas en los emplazamientos UB1 y UB3 de Vall de Núria durante los días 24 de enero y 1 de febrero de 1996. Los aludes provocados fueron aludes de flujo *pequeños* (consultar detalles de los aludes en el Anexo). El emplazamiento UB1 estaba situado a ~1 km de la zona de salida y el emplazamiento UB3 estaba situado a ~200 m de la zona de salida. A continuación se sintetizan los resultados hallados:

- i) No se detectó ninguna purga en el emplazamiento UB1 (*Figura 7-11 a y b*). Todas los aludes frenaron a una distancia mínima de 580 m respecto al emplazamiento UB1.
- ii) En el emplazamiento UB3 tan solo se detectaron aquellas purgas cuya zona de frenado quedó a menos de 300 m del sensor (*Figura 7-11 c, d*). Las purgas que frenaron a mayor distancia no se detectaron (*Figura 7-11 e*).

En la *Figura 7-11 f* también se presenta el EC del alud de aerosol puro registrado el 10 de enero de 1999. Este alud también fue detectado y pasó a 70 m del emplazamiento UB3.

La aplicación de los EC para la detección de purgas en Vall de Núria mostró la imposibilidad de detectar purgas a más de 300 m. Estos resultados indican una clara limitación del método sísmico a la hora de ser utilizado para la detección de aludes *pequeños*. Obviamente la utilidad de este sistema dependería de la dimensión de las purgas que se quisieran detectar. En el caso de que se quisiera asegurar la detección de purgas de cualquier dimensión se deberían instalar varios sensores de modo que las vertientes quedaran controladas por sensores próximos (a menos de 300 m de distancia). A la hora de considerar estos resultados hay que tener en cuenta que los emplazamientos utilizados en Vall de Núria tenían un alto nivel de ruido de fondo (Anexo), esta característica dificultó la detección de SSA de baja amplitud. Una propuesta de futuro sería realizar este estudio instalando el sensor en un emplazamiento de mejor calidad.

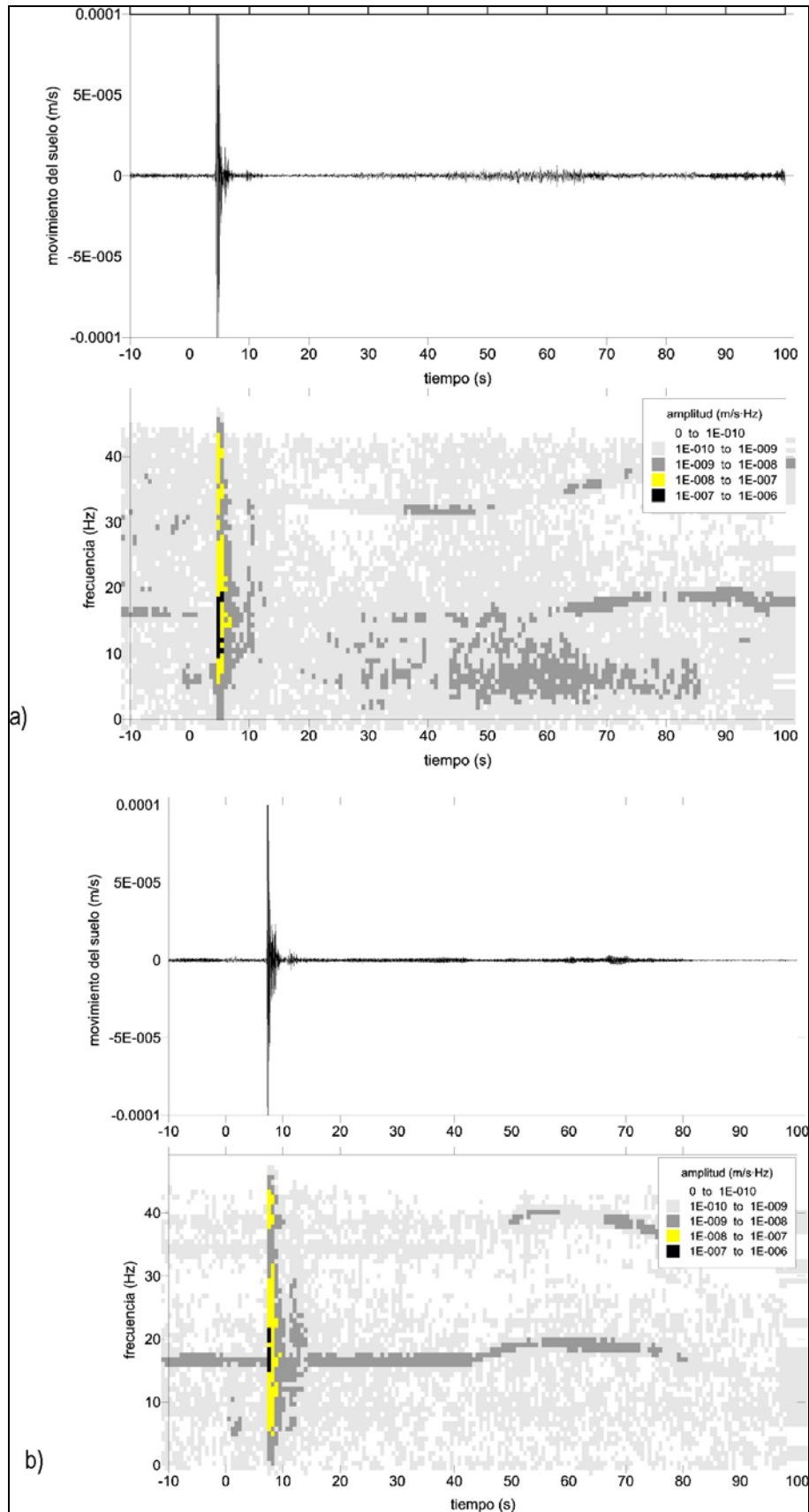


Figura 7-10. Verificación de aludes provocados por explosiones mediante EC en Vallée de La Sionne . (a) Sismograma y EC del 2º alud provocado artificialmente el 10 de febrero de 2000 en Vallée de La Sionne. (b) Sismograma y EC de la 3ª explosión provocada el 22 de enero de 2002 en Vallée de La Sionne, esta explosión no provocó ningún alud. Registros del emplazamiento C. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

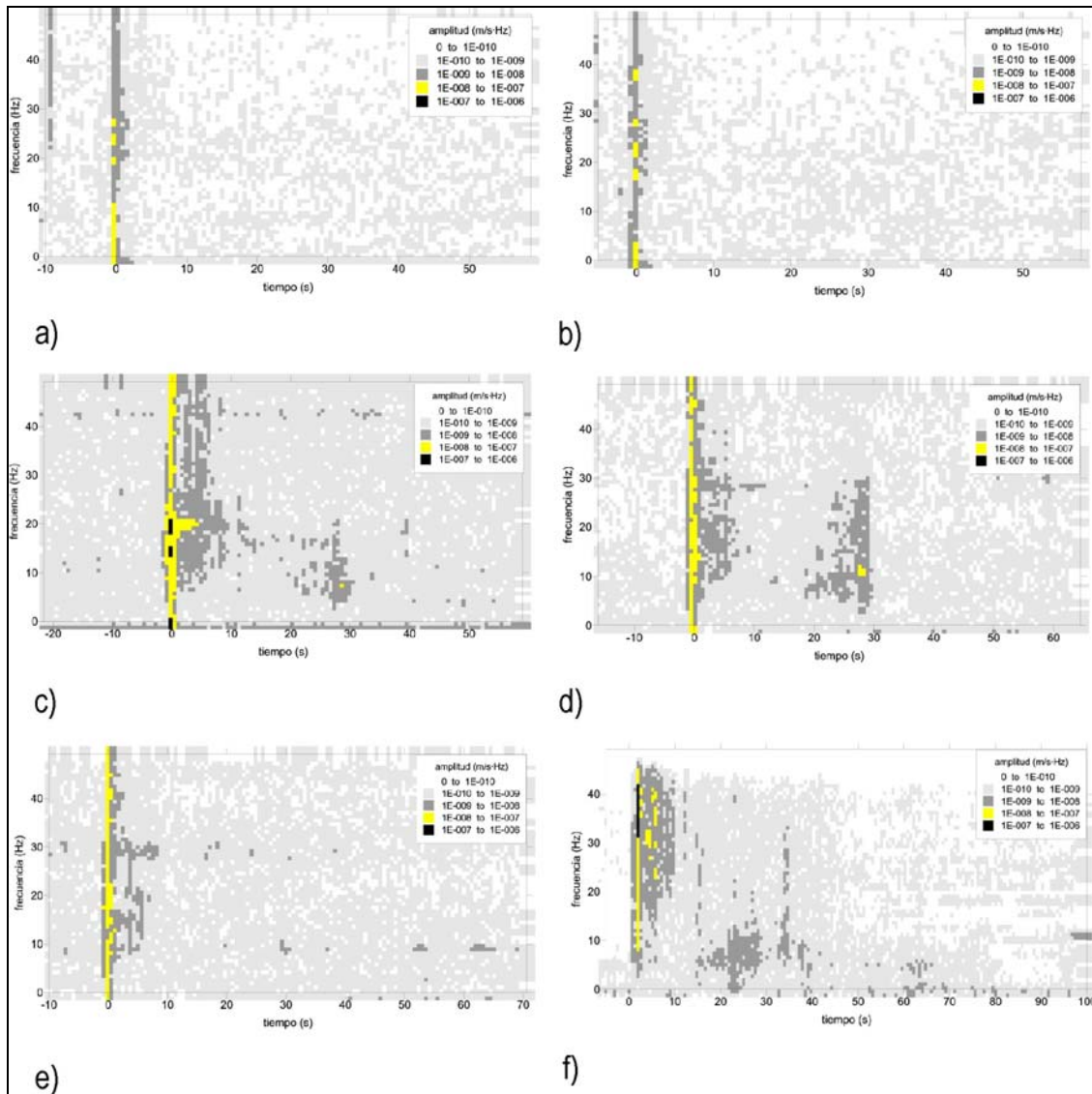


Figura 7-11. Detección de SSA de baja amplitud mediante EC en Vall de Núria. (a) EC de la SSA del 2º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB1. (b) EC de la SSA del 3º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB1. (c) EC del 1º alud provocado el día 24 de enero de 1996 en Vall de Núria, UB3. (d) EC de la SSA del 1º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB3. (e) EC del 2º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB3. (f) EC del 1º alud provocado el día 10 de enero de 1999 en Vall de Núria. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

Los EC reflejan características relacionadas con el tipo de flujo del alud. Si comparamos los EC (Figura 7-12) de tres aludes que pasaron por encima del emplazamiento del sensor B, observamos que el EC del alud de flujo mixto (Figura 7-12 a) presenta una forma triangular en su inicio debida al aumento del contenido en altas frecuencias a medida que el alud se aproxima al sensor. Después presenta una banda con máximas amplitudes en todas las frecuencias y una coda en la que se mantienen las altas frecuencias mientras las bajas disminuyen.

Las características del EC de alud de flujo (Figura 7-12 b) son muy similares al anterior pero la coda es significativamente más larga (~120 s más larga). Este tipo de onda coda de altas frecuencias [20-45] Hz sólo ha sido observada en este emplazamiento, para registros de aludes mixtos y de flujo que pasaron por encima del emplazamiento. Hasta el momento no se ha encontrado una explicación satisfactoria aunque una posibilidad a tener en cuenta sería un

posible efecto de vibración de las compuertas que tapan la caverna donde se encuentra el sensor sísmico.

El EC del alud aerosol (*Figura 7-12 c*) presenta una corta duración, ~50 s y amplitudes relativamente bajas, en el inicio las frecuencias aumentan hasta los 15 Hz pero decrecen rápidamente.

Si comparamos estos mismos tres aludes registrados en el emplazamiento C las diferencias son mayores (*Figura 7-13*). El EC del alud mixto (*Figura 7-13 a*) presenta un inicio con la forma triangular característica y un final con un decrecimiento rápido en todas las frecuencias. El EC del alud de flujo (*Figura 7-13 b*) es largo pero con un límite superior de las frecuencias de 15 Hz. Hay que tener en cuenta que el alud de flujo se detuvo a 820 m del sensor C, en cambio el alud de flujo mixto llegó hasta el emplazamiento C (Anexo). El EC del alud aerosol (*Figura 7-13 c*) es prácticamente idéntico al EC del registro de este mismo alud en el emplazamiento B. Las amplitudes son relativamente bajas y la duración es corta, de ~ 50 s, la señal queda limitada superiormente a 15 Hz. Este alud se detuvo a 700 m del emplazamiento.

Los EC también varían en función de la distancia a la que se registra el alud. Comparamos (*Figura 7-14*) ahora tres aludes mixtos que se registraron a diferentes distancias del emplazamiento C. El alud mixto *pequeño* se quedó a 1705 m del sensor C, en el EC (*Figura 7-14 a*) no se detecta la SSA de este alud. El EC (*Figura 7-14 b*) del alud mixto *mediano* que se detuvo a 815 m del sensor presenta una evolución en frecuencias entre [5-20] Hz. El EC (*Figura 7-14 c*) del alud mixto *grande* que llegó hasta el emplazamiento del sensor presenta un aumento del contenido en las altas frecuencia a medida que el alud se acerca al sensor y una banda de máximas amplitudes en todas las frecuencias cuando el alud llega al emplazamiento. En esta comparación hay que tener en cuenta que además de variar la distancia entre sensor y alud también se ha variado la dimensión del alud, ya que el alud detectado a mayor distancia es el alud de menor tamaño, el detectado a media distancia es el de dimensión mediana y el mayor alud es el que llega al sensor. Esta limitación se debe a la falta de más datos que permitan una mejor comparación.

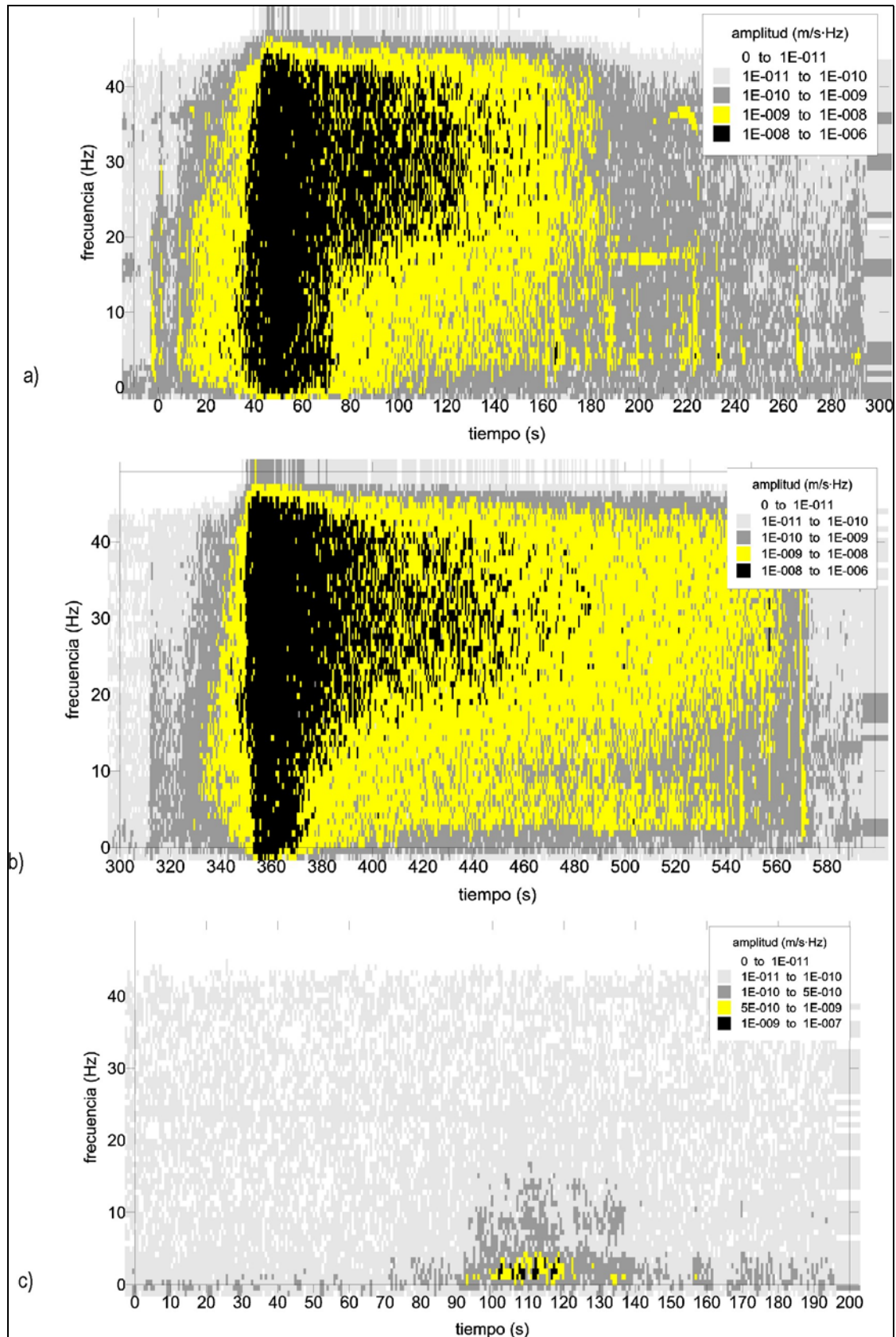


Figura 7-12. Comparación de EC de aludes de diferente tipo de flujo registrados en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. a) EC del alud de flujo mixto registrado el 30 de enero de 1999. b) EC del alud de flujo registrado el 13 de febrero de 2002. c) EC del alud aerosol registrado el 29 de febrero de 2001. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

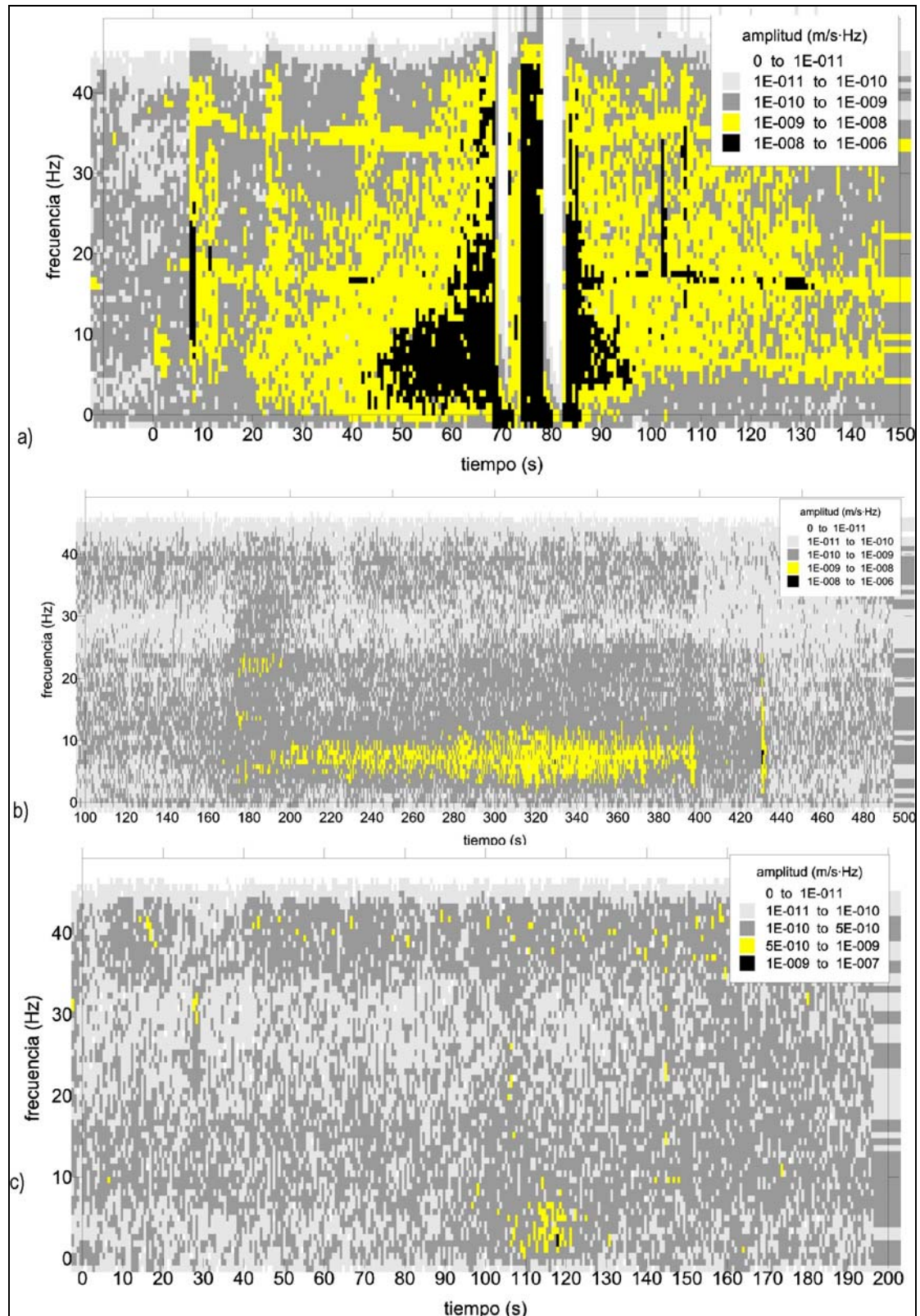


Figura 7-13 Comparación de EC de alud de diferente tipo de flujo registrados en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. a) EC del alud de flujo mixto registrado el 30 de enero de 1999, este registro presenta problemas de saturación. b) EC del alud de flujo denso registrado el 13 de febrero de 2002. c) EC del alud aerosol registrado el 29 de febrero de 2001. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

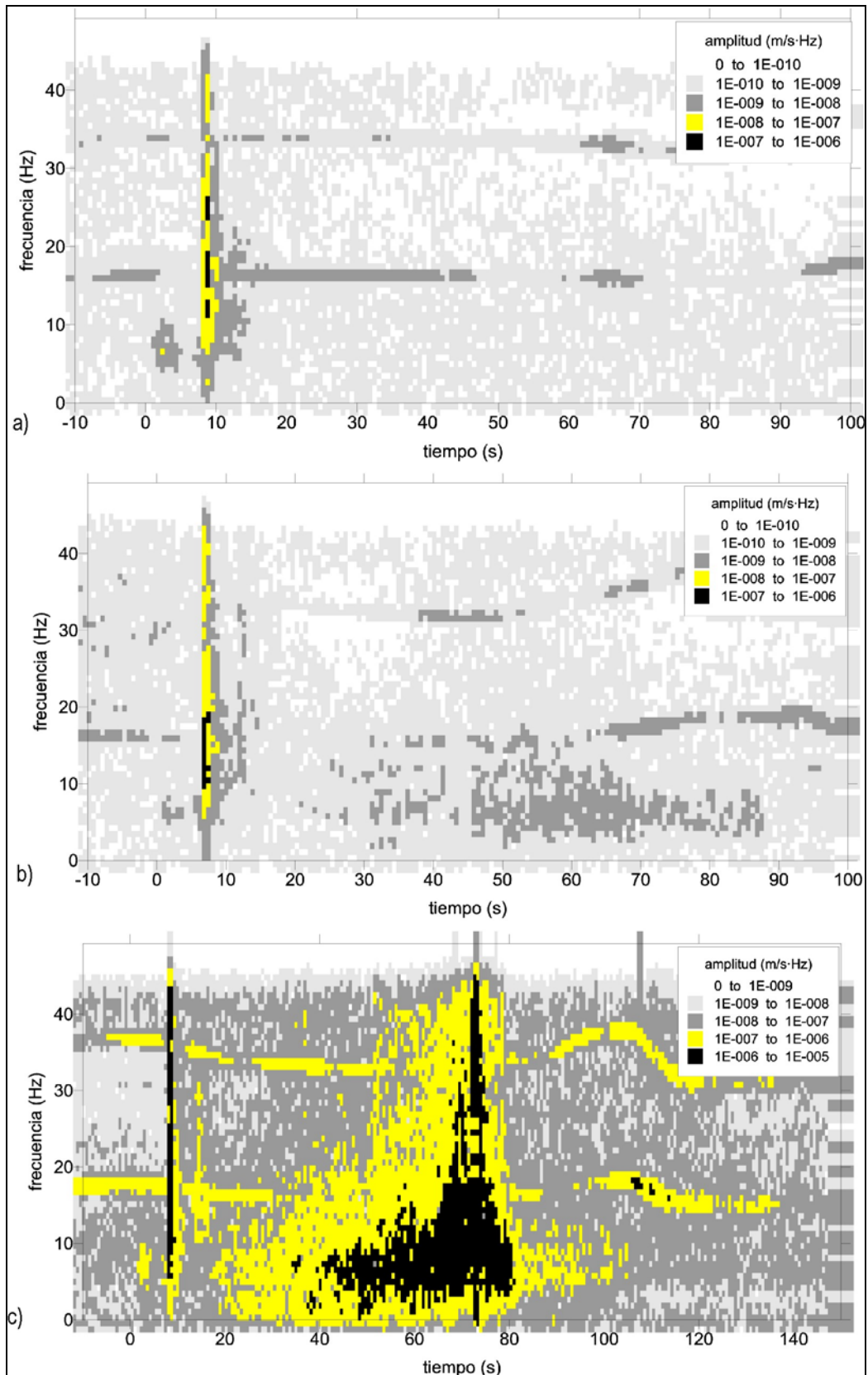


Figura 7-14. Comparación de EC de aludes de diferentes dimensiones registrados en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. a) EC del 3° alud de flujo mixto registrado el 10 de febrero de 2000. b) EC del 2° alud de flujo mixto registrado el 10 de febrero de 2000. c) EC del 4° alud de flujo mixto registrado el 20 de febrero de 2000. Consultar detalles de estas señales en el Anexo.

## 7.2 Comparación entre señales sísmicas generadas por aludes de nieve y señales sísmicas generadas por otras fuentes

La discriminación entre señales sísmicas generadas por aludes de nieve (SSA) y señales sísmicas generadas por otros fenómenos es imprescindible para el uso de la sísmica como método de detección de aludes. Dado que en las últimas campañas experimentales en Vallée de La Sionne las estaciones sísmicas estuvieron registrando en continuo pudimos obtener señales de sismos locales, regionales y telesismos. A continuación se presentan las comparaciones en el dominio temporal, frecuencial y de tiempo frecuencia de las SSA con señales generadas por sismos y por otras dos fuentes diferentes registradas en nuestros experimentos, una explosión y un helicóptero.

### 7.2.1 Comparación entre SSA y señales de terremotos

Se registraron los siguientes terremotos en la estación del emplazamiento B de Vallée de La Sionne (datos proporcionados por el Swiss Seismological Service, [www.seismo.ethz.ch](http://www.seismo.ethz.ch)):

- Sismo local del 10 de abril de 2002  
 UTC: 13:16:29.2  
 Epicentro: 46.0 N-7.9 E (Zermatt, Suiza), profundidad: 3m  
 Magnitud: ML = 2
- Sismo regional del 11 de abril de 2003  
 UTC: 09:26:57.6  
 Epicentro: 44.7 N- 9.2 E (Norte de Italia), profundidad: 10m  
 Magnitud: ML = 5.1
- Telesismo del 17 de abril de 2003  
 UTC: 00:48:46.8  
 Epicentro: 38.6 N- 95.7 E (Qinghai, China), profundidad: 10m  
 Magnitud: Ms = 6.7



Las distancias epicentro-emplazamiento B de los sismos se calcularon con el programa elipso (1985) (comunicación personal de E. Suriñach):

Sismo local: 52.8 km

Sismo regional: 228.2 km

Telesismo: 6931.6 km

En el dominio temporal (*Figura 7-15 a*, *Figura 7-16 a* y *Figura 7-17 a*) los sismos se caracterizan por tener una primera llegada en la que la amplitud aumenta bruscamente. Por el contrario las SSA presentan un aumento progresivo en las amplitudes iniciales (*Figura 7-2*). Otra característica de las envolventes de los sismos son sus fases típicas (P,S, coda) que no se observan en las envolventes de las SSA.

En el dominio tiempo-frecuencia (*Figura 7-15 b*, *Figura 7-16 b* y *Figura 7-17 b*) las diferencias entre las SSA y las señales de terremotos son claras. Los EC de los sismos local y regional presentan un inicio de la señal con todas las frecuencias entre [1-40] Hz y progresivamente se atenúan. El EC del telesismo tiene una forma similar pero con frecuencias menores, limitadas en los 5 Hz. Esta forma inicial (  ) se diferencia de la forma inicial característica de los EC de SSA (  ) cuyo contenido en altas frecuencias aumenta a medida que el alud se aproxima al sensor. El contenido frecuencial de la coda es, en general, similar para ambos tipos de fuentes.



En el dominio frecuencial (*Figura 7-15 c*, *Figura 7-16 c* y *Figura 7-17 c*) las señales de los sismos, en este emplazamiento, tienen espectros totales con frecuencias inferiores a 5 Hz. Como se vio en la sección anterior, en el caso de SSA registradas en sensores situados dentro del trayecto del alud las frecuencias dominantes se centran en [2-45] Hz (*Figura 7-7 a*) y en el caso de SSA registradas en emplazamientos alejados del alud las frecuencias dominantes se centran en [2-20] Hz (*Figura 7-7 b*). Las frecuencias predominantes de los sismos son por tanto menores que las SSA. No obstante, la discriminación entre sismos y SSA registradas a distancia a partir del contenido frecuencial total puede generar problemas debido a que las bandas frecuenciales se solapan.

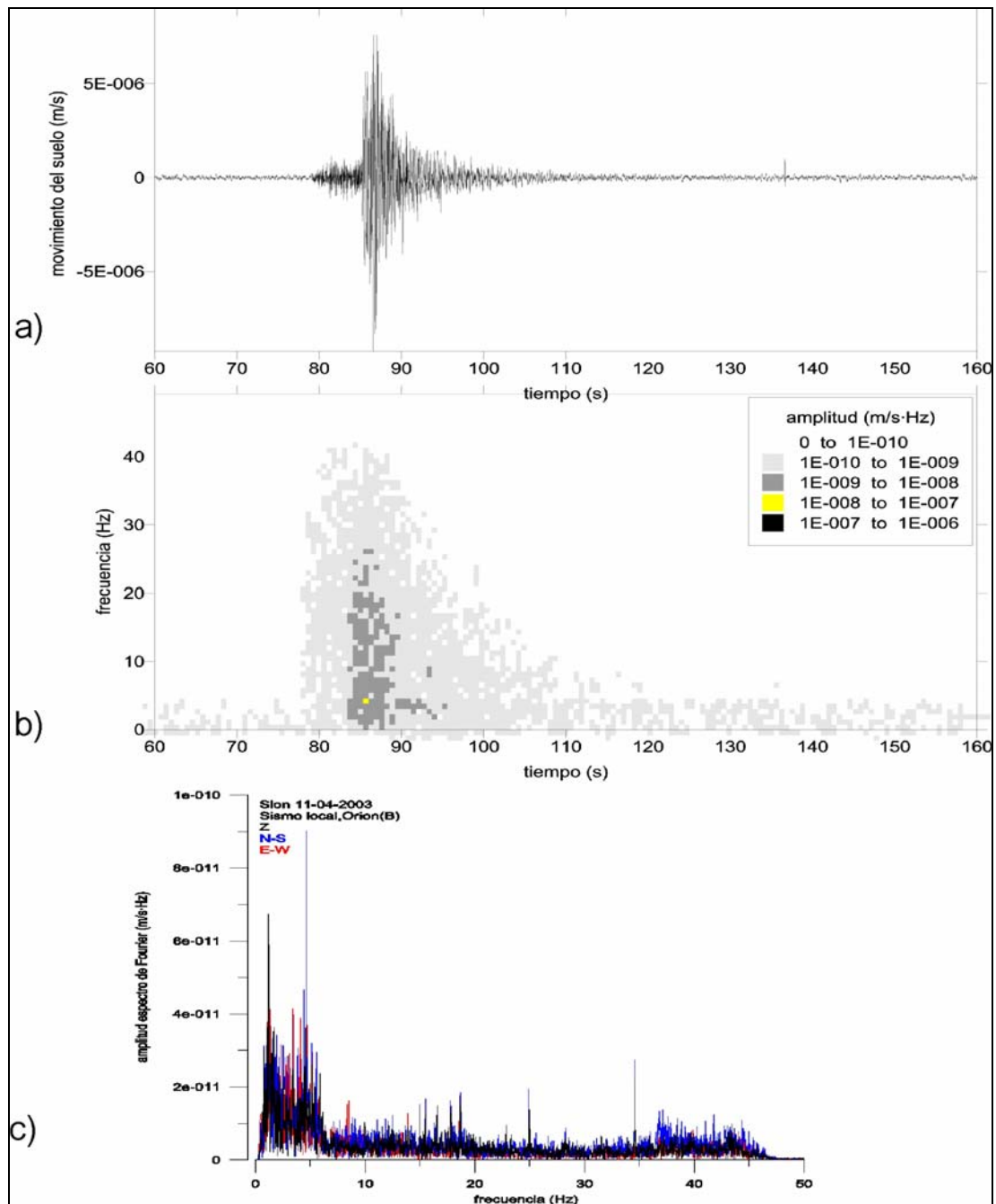


Figura 7-15. Sismo local registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier.

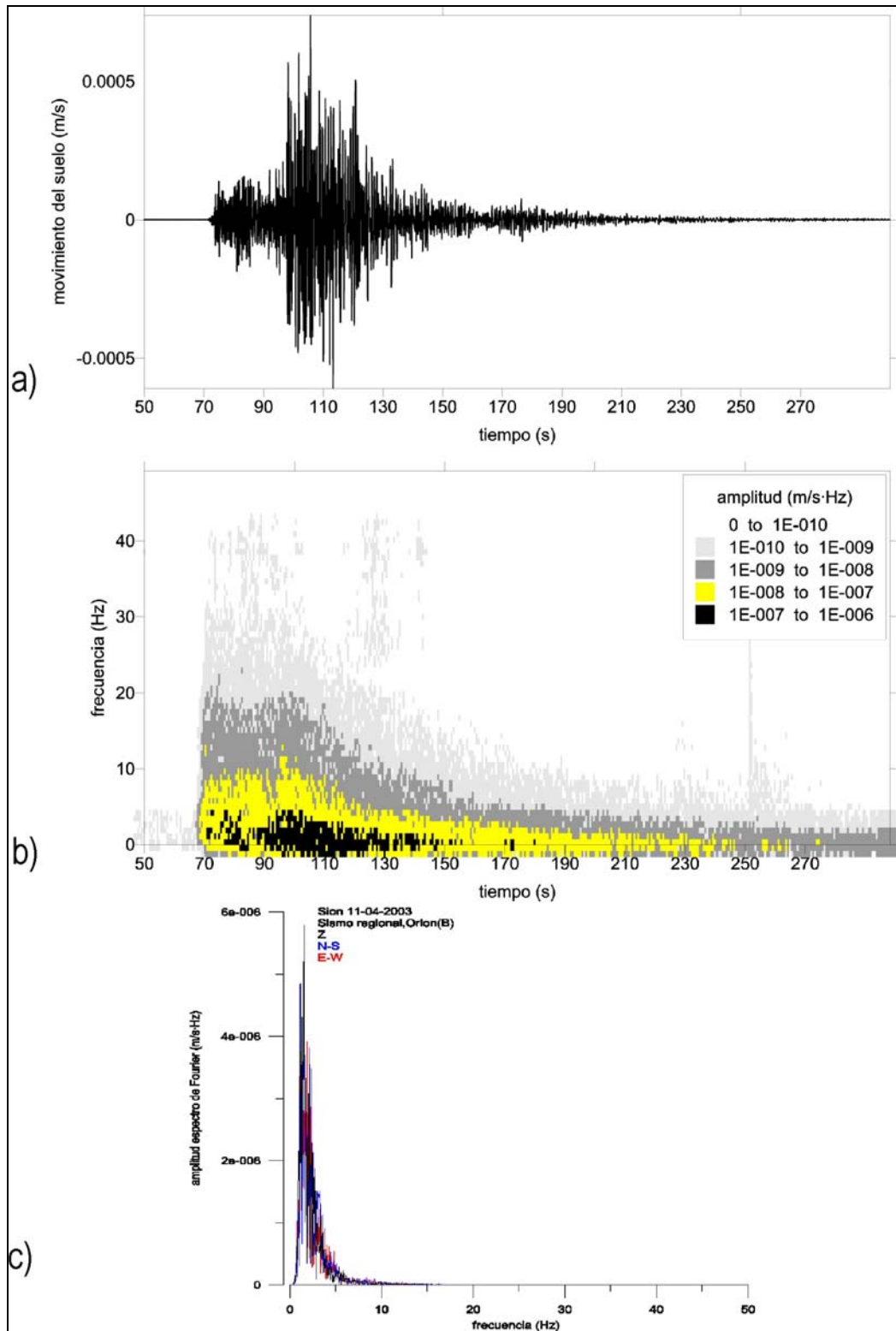


Figura 7-16. Sismo regional registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier.

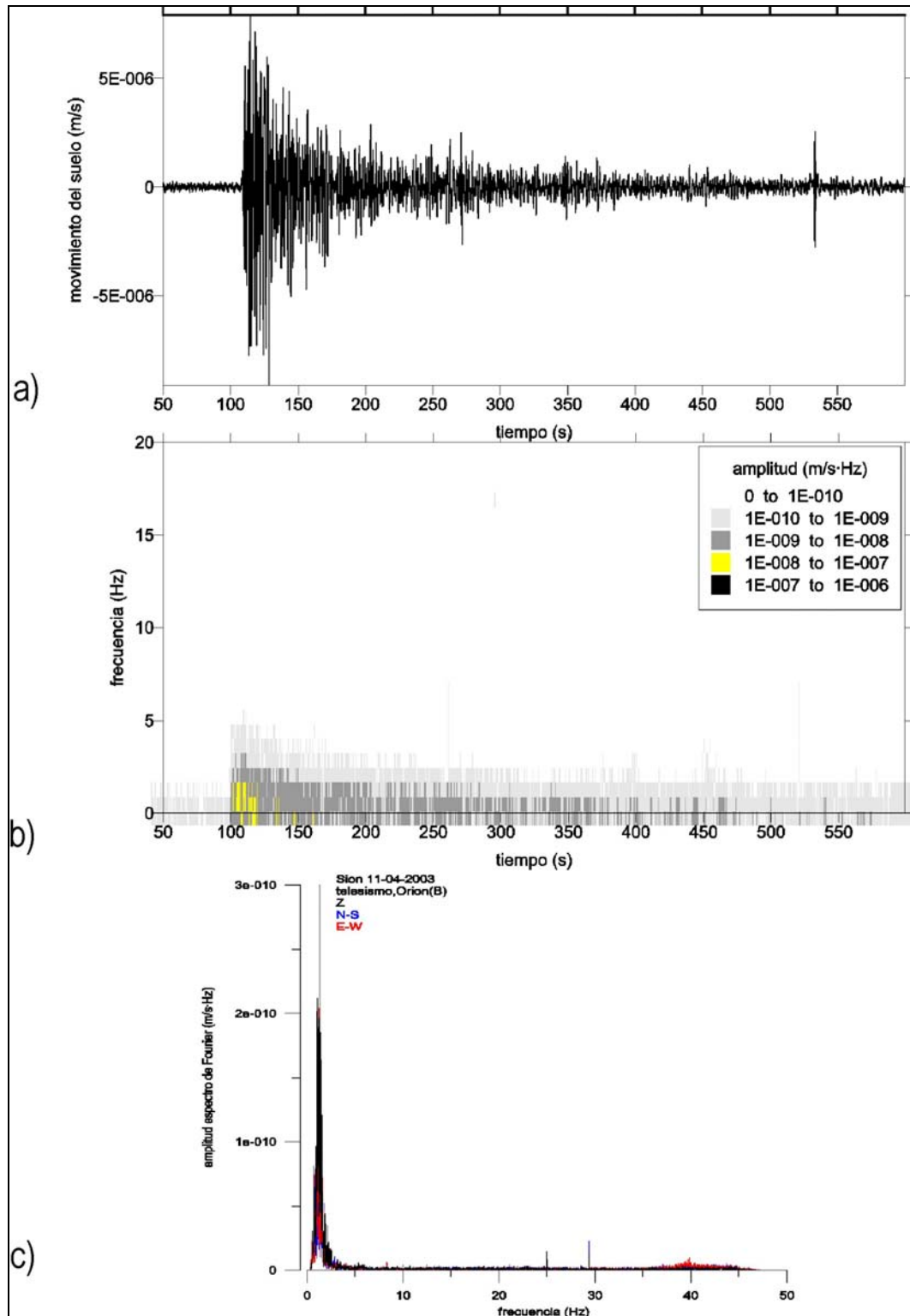


Figura 7-17. Telesismo registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier.


### 7.2.2 Comparación entre SSA y señal de una explosión y un helicóptero

La mayoría de aludes artificiales de nuestra colección de datos fueron provocados mediante explosivos lanzados desde un helicóptero. En la *Figura 7-18* se presenta el registro de una explosión que no provocó ningún alud. Simultáneamente sobrevolaba la zona un helicóptero desde el cual se lanzaron los explosivos.

En el dominio temporal (*Figura 7-18 a*) las señales de explosiones se diferencian de las SSA por ser señales de muy corta duración y gran amplitud. En el dominio tiempo-frecuencia (*Figura 7-18 b*), las señales de las explosiones presentan una primera llegada de la onda sísmica que viaja por el suelo con frecuencias entre [1-10] Hz y una segunda llegada de la onda sonora acoplada con frecuencias en [1-40] Hz. En el dominio frecuencial (*Figura 7-18 c*) la señal de la explosión presenta varios picos a lo largo del espectro. En ambos dominios esta señal se diferencia de las SSA.

Las señales generadas por un helicóptero (*Figura 7-18 a*) son señales de baja amplitud que pueden confundirse con SSA de aludes de *pequeña* o *mediana* dimensión registrados a distancias de  $\sim 1$  km. En el dominio tiempo-frecuencia (*Figura 7-18 b*), la señal generada por un helicóptero tiene dos bandas, una a [15-20] Hz y otra a [35-40] Hz. En el dominio frecuencial (*Figura 7-18 c*) la señal del helicóptero se concentra en dos picos centrados a 20 Hz y 40 Hz, lo cual las diferencia con claridad de las SSA.

Un resultado de estas cuatro comparaciones es que los EC son una buena herramienta a la hora de discriminar entre señales generadas por diferentes tipos de fuentes sísmicas. Los EC ponen en evidencia de forma clara las diferencias entre las señales.

En los trabajos de control de actividades volcánicas mediante sísmica se estudian también los eventos volcánicos sismogénicos en el dominio tiempo-frecuencia (Almedros, 2002). Los eventos volcánicos presentan una evolución temporal del contenido frecuencial similar a los de los terremotos (  ). En los volcanes con laderas nevadas también pueden producirse aludes. Los EC permitirían, en estos casos, diferenciar los posibles aludes de los demás eventos y mejorar así las técnicas de control de la actividad volcánica.

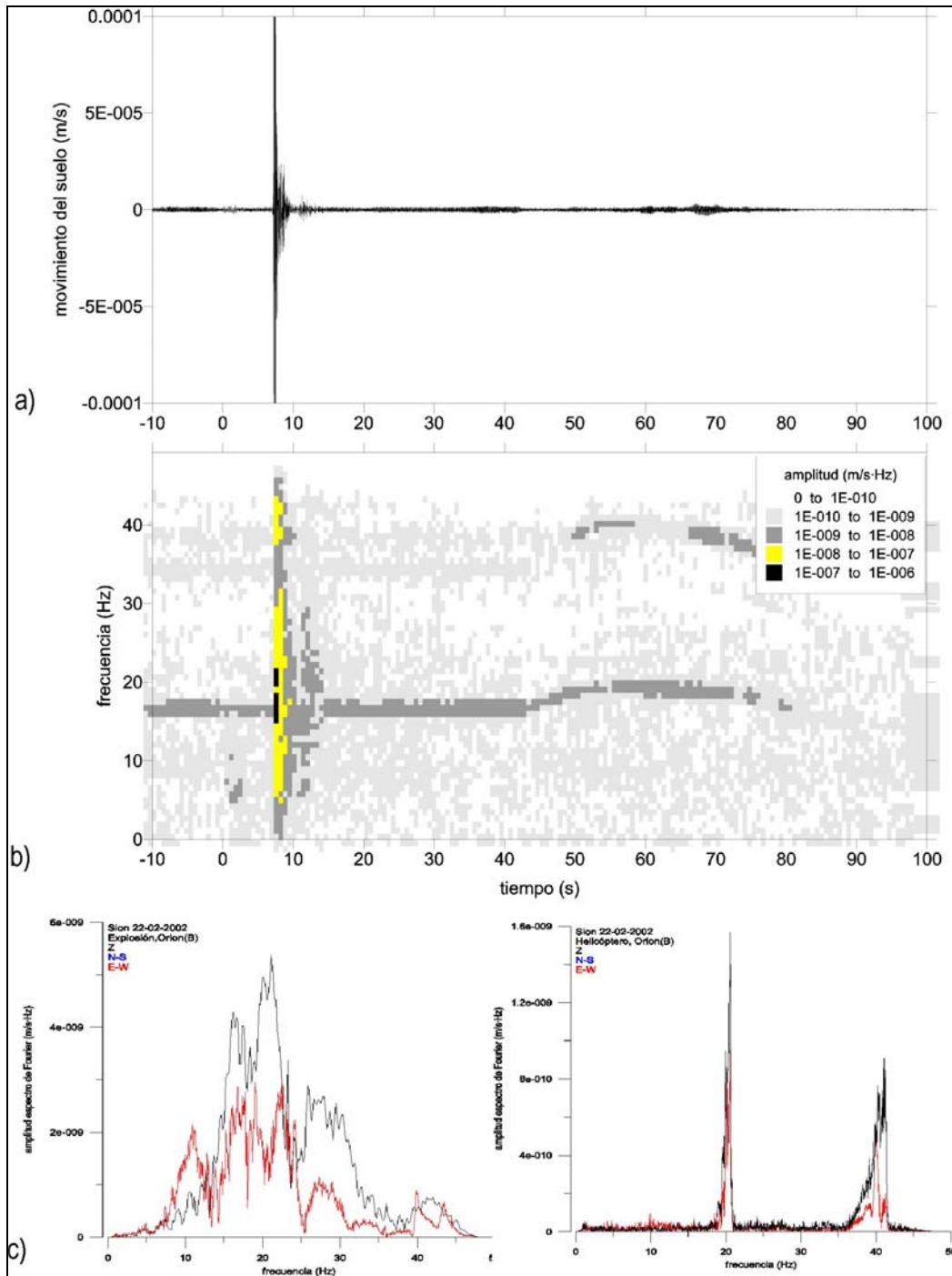


Figura 7-18. Registro de la señal de una explosión y la de un helicóptero en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier de la explosión (izquierda) y de la señal de helicóptero (derecha).

### 7.3 Correlación entre señales sísmicas e imágenes de aludes

Las diferentes técnicas utilizadas para el estudio de aludes de nieve proporcionan información diversa sobre este fenómeno. En algunos casos la correlación de la información proporcionada por dos técnicas diferentes permite obtener resultados interesantes. Este es el caso de las grabaciones en vídeo y los registros sísmicos.

A lo largo de nuestras campañas experimentales comprobamos el interés de comparar los registros sísmicos generados por aludes (SSA) con las imágenes de vídeo. La correlación entre SSA e imágenes de vídeo permite relacionar las diferentes partes y características de las SSA con los estados del alud a lo largo de su evolución. Para realizar la correlación entre estas dos técnicas es necesario establecer un sistema temporal de referencia común. Para ello se escogió la señal de la explosión. Dadas las distancias relativamente cortas entre alud y sensor (siempre menores a 2 km) y entre alud y cámaras de vídeo (siempre menores a 4 km) podemos suponer que la primera llegada de la señal sísmica (velocidad ondas P) de la explosión y el instante en el que se ve (velocidad de la luz) la explosión en el vídeo son prácticamente simultáneos. Por consiguiente se puede tomar este instante como origen común de tiempo.

No todos los aludes de nuestra colección pudieron ser grabados en vídeo y de las grabaciones de vídeo realizadas no todas tuvieron validez a la hora de poder realizar una correlación con las SSA. En concreto se hicieron estudios comparativos con un alud de Boí Taüll (1995/96) y con tres aludes de la campaña de 1998/99 y dos aludes de la campaña de 2001/02 de Vallée de La Sionne. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

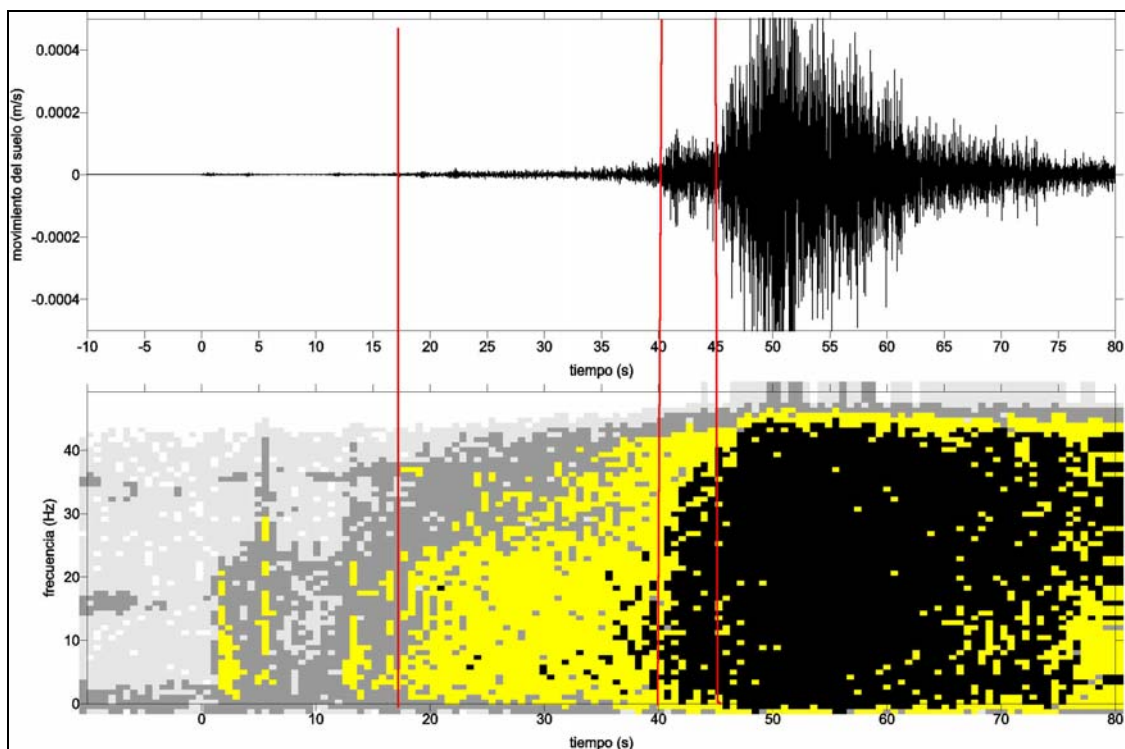
- Las imágenes de los aludes de Cerví de Durro y Raspes Roies (Anexo) en Boí Taüll fueron tratadas con el fin de determinar la localización del frente del alud en el tiempo. El tratamiento de imágenes de aludes fue objeto de la tesis de F. Granada (2001). Con el fin de localizar el frente del alud las imágenes se digitalizan y posteriormente se aplica sobre ellas un algoritmo de extracción de contorno basado en el hecho de que el contorno del alud es la parte más energética de la imagen. En la correlación de las imágenes de los aludes y las SSA de Boí Taüll (Anexo) se llega a los siguientes resultados (Sabot y otros, 1997 y Sabot y otros, 1998):
  - Las máximas amplitudes de la SSA corresponden a instantes en los que el frente del alud pasa por cambios en la pendiente, estos instantes coinciden con la formación de aerosol.
  - También aparecen máximas amplitudes en la SSA cuando el alud interacciona con obstáculos. En este caso en concreto los obstáculos fueron los postes de un telesilla de la estación de esquí.
  - En la fase de detención del alud se aprecia aumentos en las amplitudes de la SSA.
- En Vallée de La Sionne se registraron con vídeo todos los aludes, tanto los artificiales como los naturales. Las imágenes registradas durante las dos primeras campañas (1995-1997) no tuvieron la calidad suficiente como para poder realizar una buena correlación. Los tres aludes de la campaña del 1998/99 (Anexo) se registraron con tres cámaras de vídeo situadas en diferentes posiciones (2 posiciones fijas y una cámara en el helicóptero). Las imágenes de estos tres aludes fueron tratadas por el equipo suizo (Dufour y otros, 2003). Los frentes de los aludes se detectaron en los fotogramas y se proyectaron sobre la cartografía 2D del valle experimental. El equipo suizo nos cedió los resultados de estas cartografías así como las imágenes de vídeo originales para poder realizar la correlación con las SSA. Algunos registros de esta campaña (1998/99) tuvieron problemas de

saturación. Por este motivo las correlaciones sólo se hicieron a partir de la parte inicial de estas señales, previa a la saturación.

Para ejemplificar los resultados de una correlación se presenta el estudio del alud del 30 de enero de 1999. A partir de la grabación en vídeo se realiza la cartografía del frente del alud a lo largo de su evolución. En la *Figura 7-19* se han situado los instantes de tiempo que se quieren estudiar sobre la SSA y el EC del registro obtenido en el emplazamiento B. En la cartografía se observa como 18 s después de la explosión el frente del alud alcanza los escarpes del canal de Crêta Besse situados sobre los 2500 m s.n.m., en esos instantes la SSA empieza a distinguirse; 40 s después el frente alcanza el cambio de pendiente situado a 2000 m s.n.m., en esos instantes también se observa un aumento en la amplitud de la SSA. Después de 45 s el frente alcanza el emplazamiento del sensor B, en esos instantes aparecen máximas amplitudes en [1-45] Hz.

A partir de las correlaciones de los tres aludes de esta campaña se obtienen los siguientes resultados (Suriñach y otros, 2001):

- Las amplitudes de las SSA aumentan cuando al alud llega a zonas en las que la pendiente aumenta y el alud salta.
  - A medida que el alud se aproxima al sensor el contenido en altas frecuencias aumenta.
- Cuando el frente del alud llega al emplazamiento del sensor se observa un aumento de amplitudes en la banda de frecuencias [1-45] Hz.



*Figura 7-19. SSA y EC del alud registrado el 30 de enero de 1999 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas determinan los instantes (15 s y 40 s) en los que el frente del alud pasó por cambios de pendiente y cuando llegó al emplazamiento del sensor (45 s).*

En las campañas posteriores (1999-2003) se dejó instalada una única cámara de vídeo dentro del centro de control situado en el fondo del valle. Debido a la humedad, la lluvia, la nieve y la niebla, la mayoría de imágenes grabadas a través del cristal de la ventana fueron de mala calidad. El equipo suizo realizó la cartografía de dos aludes naturales a partir de los fotogramas grabados del alud del 13 de febrero de 2002 (*Figura 7-20*) y del alud del 13 de marzo de 2002 (*Figura 7-21*). Los aludes naturales no se han podido correlacionar con las SSA debido a la falta de referencia temporal de la explosión. No obstante, a partir de estas cartografías se estimaron las velocidades medias de los frentes de alud. Ambos aludes fueron aludes de flujo y nieve húmeda y las velocidades medias del frente son relativamente bajas. Estos aludes generaron unas SSA de larga duración. La larga duración de estas SSA podría atribuirse a la lenta velocidad de estos aludes. Se presenta a continuación la comparación de las velocidades medias de estos aludes y la duración de sus SSA registradas en el emplazamiento C con los mismos datos de los tres aludes mixtos de la campaña del 1998/99:

Alud	Duración de la SSA registrada en el sensor C	Velocidad media del frente del alud
25/02/1999	173 s	46 m/s
10/02/1999	137 s	45 m/s
30/01/1999	230 s	36 m/s
13/03/2002	335 s	4 m/s
13/02/2002	360 s	2 m/s

*Tabla 7-1 Comparación entre velocidades medias del frente del alud y duración de SSA registradas en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne.*

Estos datos (*Tabla 7-1*) muestran una proporcionalidad inversa entre la velocidad media del frente del alud y la duración de la SSA. Evidentemente del análisis de cinco datos no se pueden extraer conclusiones, sin embargo estos resultados indican una línea interesante de trabajo en el futuro.



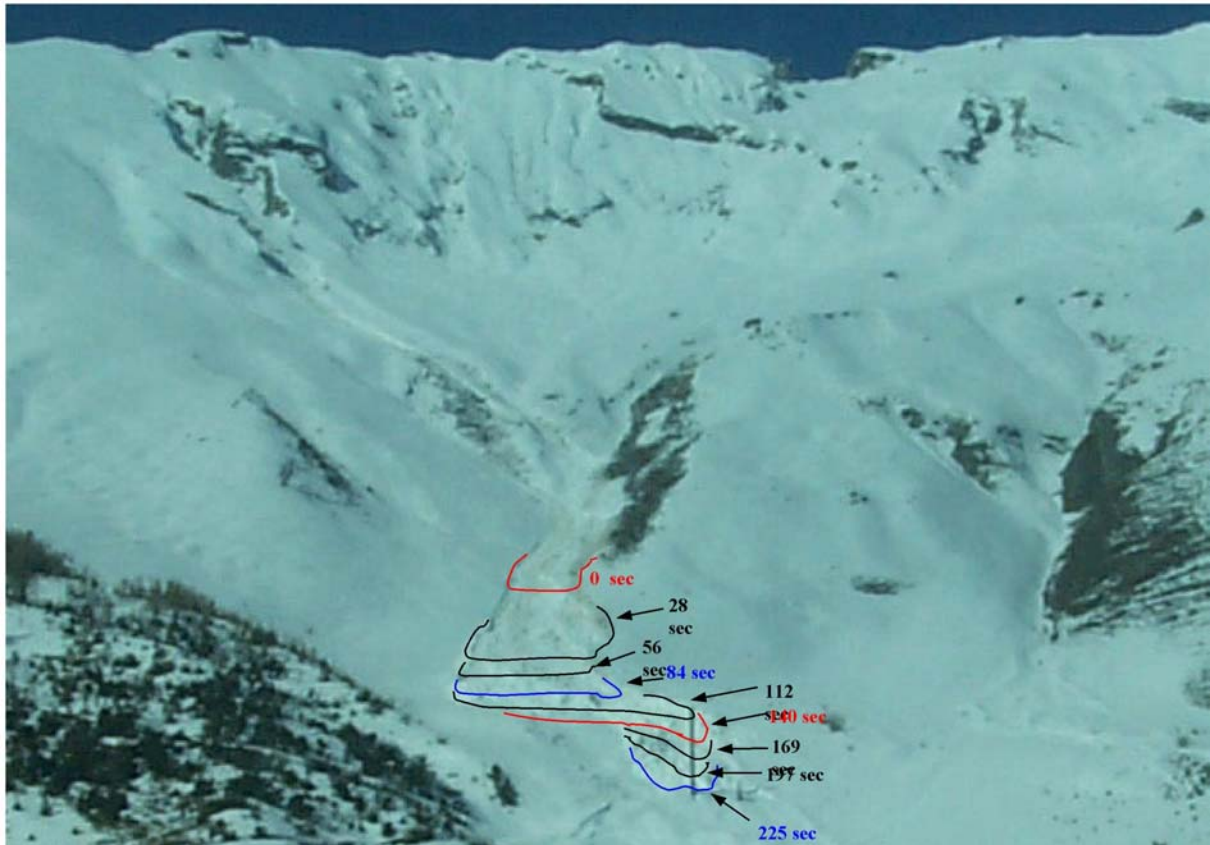


Figura 7-20. Posición del frente del alud cartografiada en varios instantes de la evolución del alud del 13 de febrero de 2002 en Vallée de La Sionne. Cartografía cedida por François Dufour (SLF).

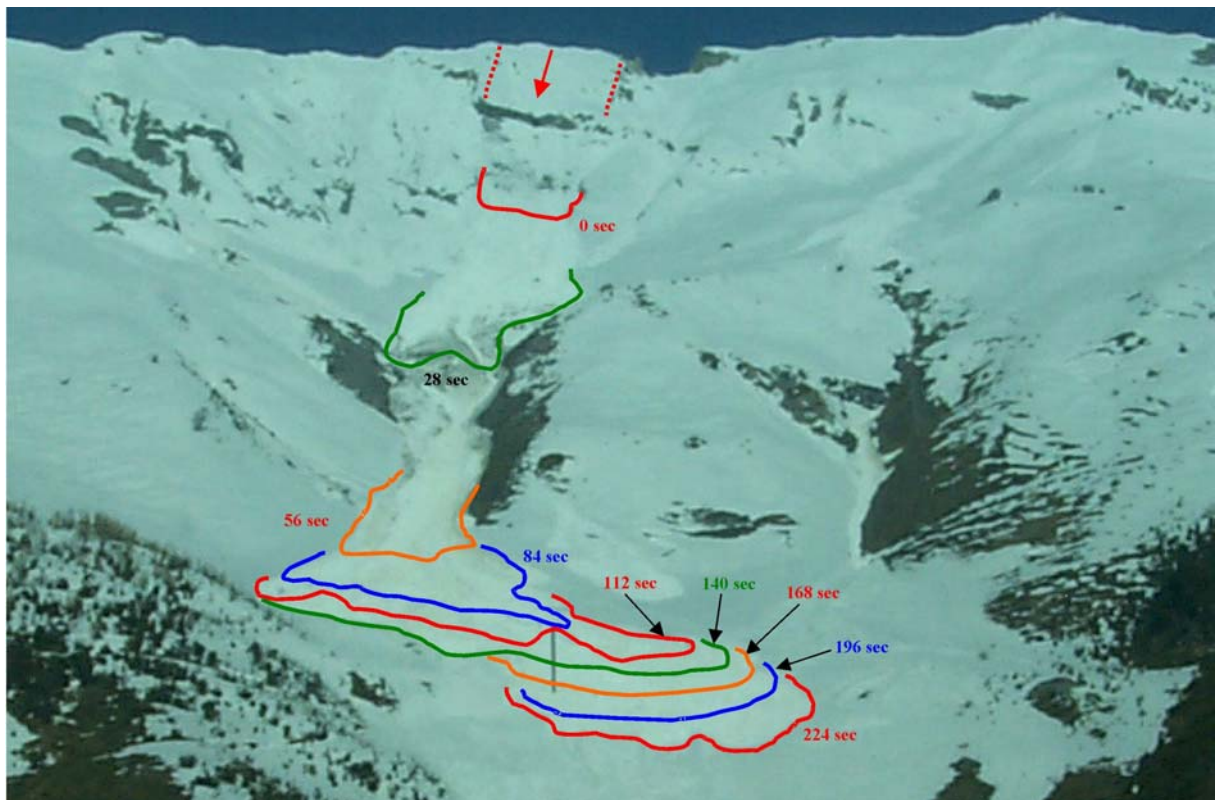


Figura 7-21. Posición del frente del alud cartografiada en varios instantes de la evolución del alud del 13 de marzo de 2002 en Vallée de La Sionne. Cartografía cedida por François Dufour (SLF).

## 7.4 Correlación entre señales sísmicas y señales de radar FMCW

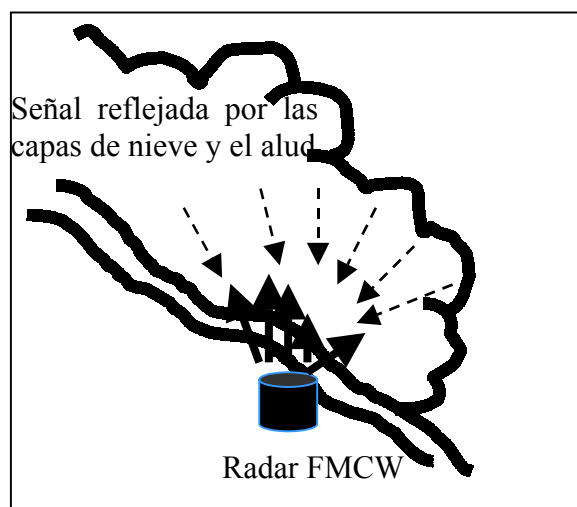
Uno de los objetivos de esta tesis es la contribución al conocimiento del alud de nieve a través de la señal sísmica que genera (SSA). A pesar de que la sísmica debe ser considerada como un método indirecto de estudio de este fenómeno natural, puede aportar información sobre su dinámica. En el valle experimental de La Sionne (capítulo 5) hay radares FMCW (frequency modulated continuous wave) (Gubler y Hiller, 1984; Holmgren y otros, 1998) instalados en dos emplazamientos cercanos a los emplazamientos de sensores sísmicos. Los radares FMCWA proporcionan información sobre la variación de la altura y algunas características del flujo del alud que pasa sobre el radar. A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir del cruce de la información dinámica obtenida mediante la SSA con los datos proporcionados por la técnica del radar FMCW. Estos resultados fueron presentados en Biescas y otros (2002 b).

La zona experimental de Vallée de La Sionne (capítulo 5) tiene dos emplazamientos (A: 2275 m s.n.m. y B: 1900 m s.n.m) en los que están instalados un sensor sísmico y un radar FMCW), con una separación horizontal de ~ 50 m (capítulo 5).

Los radares FMCW están instalados en el suelo. Estos radares emiten radiación continua en frecuencia modulada. Cuando un alud pasa sobre el radar las ondas emitidas son reflejadas por las estructuras internas del alud (*Figura 7-22*). La diferencia de tiempo entre la emisión y la recepción es proporcional a la distancia óptica entre el radar y el reflector, lo cual proporciona información sobre las alturas a las que se encuentran las diferentes estructuras reflectoras del alud. La intensidad de la señal reflejada depende de las siguientes propiedades de los reflectores:

- Densidad de reflectores
- Tamaño de los reflectores
- Estructura de los reflectores

En la actualidad las diferentes contribuciones de estas propiedades a la intensidad de la señal no pueden discernirse. No obstante, a partir de esta técnica podemos extraer información sobre la variación de la altura y las variaciones de la estructura interna del alud a lo largo de su paso sobre el radar. Los datos proporcionados por esta técnica son gráficas tridimensionales en las que se expresa la altura del flujo (eje vertical), la intensidad de la reflexión (escala de colores) y la evolución en el tiempo (eje horizontal).



*Figura 7-22. Esquema del funcionamiento de un radar FMCW al paso de un alud.*

Las señales del radar proporcionan información sobre el corte transversal del flujo del alud que está pasando sobre del radar. Las SSA en cambio, son señales generadas por todo el conjunto del alud. Tal y como se explicó en la sección anterior de los resultados (7.3), a partir de la comparación entre imágenes de vídeo y SSA se observa que cuando el frente del alud llega al emplazamiento del sensor las amplitudes en las altas frecuencias se hacen máximas. Basándonos en este hecho y en que la atenuación espacial es proporcional a la frecuencia se realiza la siguiente hipótesis: las frecuencias más altas de las SSA contienen información de la parte del alud más próxima al emplazamiento. Trabajando a partir de esta hipótesis se filtran las SSA con un paso-banda de [30-50] Hz y se correlacionan las señales filtradas con las señales de radar. Las correlaciones se hacen a partir del módulo de las señales filtradas para resaltar las variaciones de las amplitudes de las SSA. Se toma como origen común a los dos tipos de señales el momento en que el frente del alud llega al radar (éste recibe la primera señal) y el momento en que el frente del alud llega al sensor sísmico (aumento de las amplitudes de máximas frecuencias).

El estudio de la correlación entre estas dos técnicas se hizo en colaboración con el equipo suizo. Esta colaboración fue fruto de una estancia de dos meses en el Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF). El equipo de investigadores suizo (SLF) nos proporcionó los resultados de las señales de radar procesadas hasta el momento, es decir los datos de un total de cuatro aludes. En las correlaciones realizadas se señalan los instantes en los que se observan cambios en la señal del radar y estos mismos instantes se indican en las SSA tratadas. A continuación se describen las correlaciones estudiadas:

- La correlación (*Figura 7-23*) de las señales generadas por el alud del 25 de febrero de 1999 (Anexo) en el emplazamiento A, muestra como las mayores amplitudes de la señal sísmica corresponden a los instantes en que se producen las rupturas de las capas de nieve (instantes 1,2 y 3). El flujo de alta intensidad observado en la señal del radar (instante 4) en cambio, genera una respuesta sísmica de baja amplitud.
- La segunda correlación presentada (*Figura 7-24*) corresponde a las señales generadas por el alud del 27 de diciembre de 1999 (Anexo) en el emplazamiento A. Este alud erosionó todas las capas de nieve hasta llegar al suelo. En la correlación se observa como la ruptura de las capas de nieve genera altas amplitudes en la SSA (1 hasta 2). Este alud y el del 25 de febrero de 1999 fueron aludes mixtos de grandes dimensiones (Anexo). Obsérvese que las señales del radar muestran que el alud del 27 de diciembre (*Figura 7-24*) erosionó todas las capas hasta llegar al suelo, en cambio el alud del 25 de febrero (*Figura 7-23*) pasó sobre una capa de 2.5 m de nieve sobre el sensor. A pesar de esta capa de nieve la señal del alud del 25 de febrero es un orden de magnitud superior a la otra lo que indicaría que la capa de nieve sobre el sensor no atenúa significativamente la señal sísmica.
- La correlación (*Figura 7-25*) entre las señales generadas por el alud del 21 de febrero de 2000 en el emplazamiento A tiene como origen común el instante en el que el frente del alud alcanza la posición del sensor sísmico y del radar (instante 1). Después de 14 s (instante 2) se observa la llegada de otro frente con flujo de mayor altura, en ese instante la señal sísmica aumenta al tiempo que se producen las primeras rupturas de las capas de nieve. A 9 s (instante 3) aparece el flujo que produce mayor intensidad en la señal del radar, a partir de entonces la señal sísmica se atenúa.
- La cuarta correlación (*Figura 7-26*) es la realizada a partir de las señales generadas por el alud del 29 de diciembre de 2001 en el emplazamiento B. En el instante 1 el frente del alud llega a la altura del sensor sísmico y del radar, se producen las primeras rupturas de capas de nieve y la señal sísmica presenta un aumento en sus amplitudes. Se observa un segundo incremento en la señal sísmica 4 s después (instante 2), en ese mismo instante la

señal del radar muestra la llegada de un segundo frente y nuevas rupturas de capas. La señal del radar presenta un aumento en la intensidad 18 s después (instante 3) y la señal sísmica a partir de ese instante presenta amplitudes bajas.

A la hora de interpretar los resultados hay que considerar su estado preliminar ya que tan solo se basan en cuatro correlaciones. No obstante los buenos resultados obtenidos justifican la presentación de estos resultados y la propuesta de continuar trabajando en esta línea en el futuro. Los resultados que se quieren destacar de estas correlaciones son:

- Existe una correlación temporal entre las señales sísmicas contenidas en la banda frecuencial de [30-50] Hz y las señales de radar FMCW.
- Las altas amplitudes sísmicas corresponden a rupturas de las capas de nieve del suelo.
- El flujo del alud de mayor intensidad en el radar genera señales sísmicas de menores amplitudes.

Estas correlaciones muestran un frente del alud de baja reflectividad en la señal radar que produce fracturas en las capas de nieve del suelo y genera altas respuestas sísmicas del suelo, estas características podrían explicarse con un flujo poco denso con altas velocidades que generara fuertes impactos en el terreno. En las partes posteriores de las señales se observa un flujo de mayor reflectividad en la señal radar y con una dinámica generadora de bajas amplitudes sísmicas, lo que podría explicarse con un flujo más denso o con partículas de mayor tamaño y de menor velocidad. Estos datos empíricos son coherentes con los modelos teóricos de aludes mixtos sobre los cuales se trabaja en la actualidad (Tunrull y Bartelt, 2002).

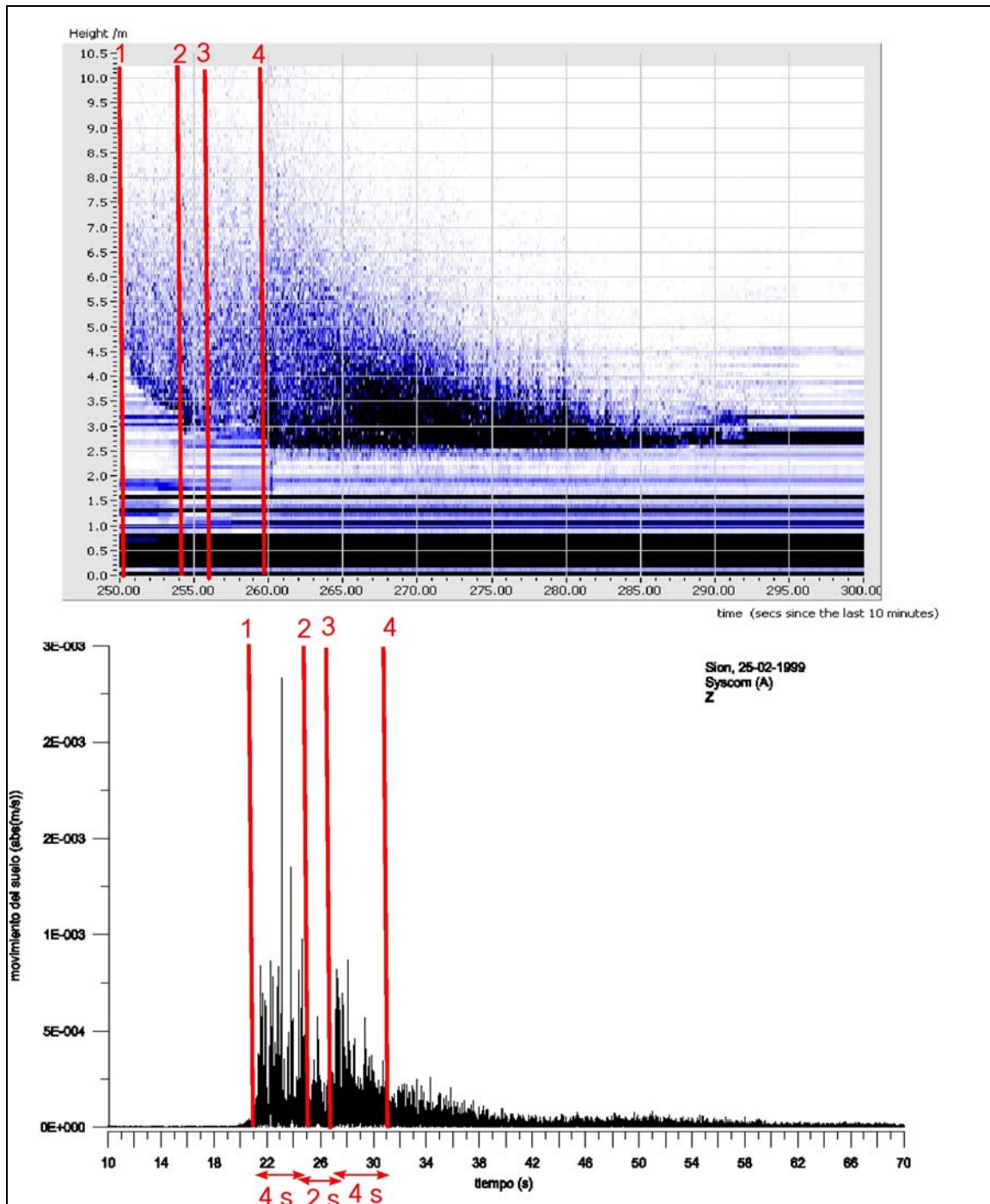


Figura 7-23. Correlación entre la señal de radar FMCW y el módulo de la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 25 de febrero de 1999 en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud.

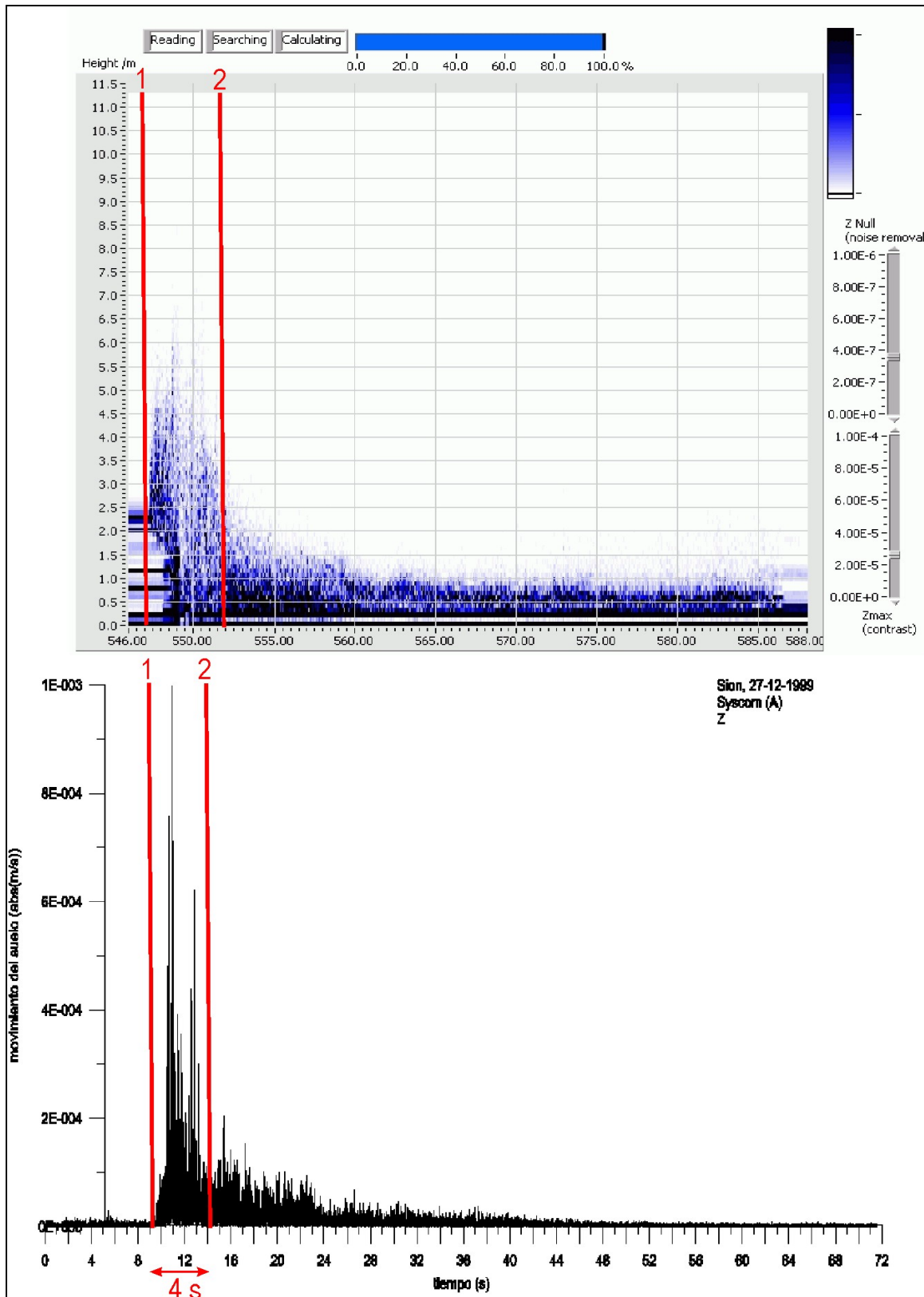


Figura 7-24. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 27 de diciembre de 1999 en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud.

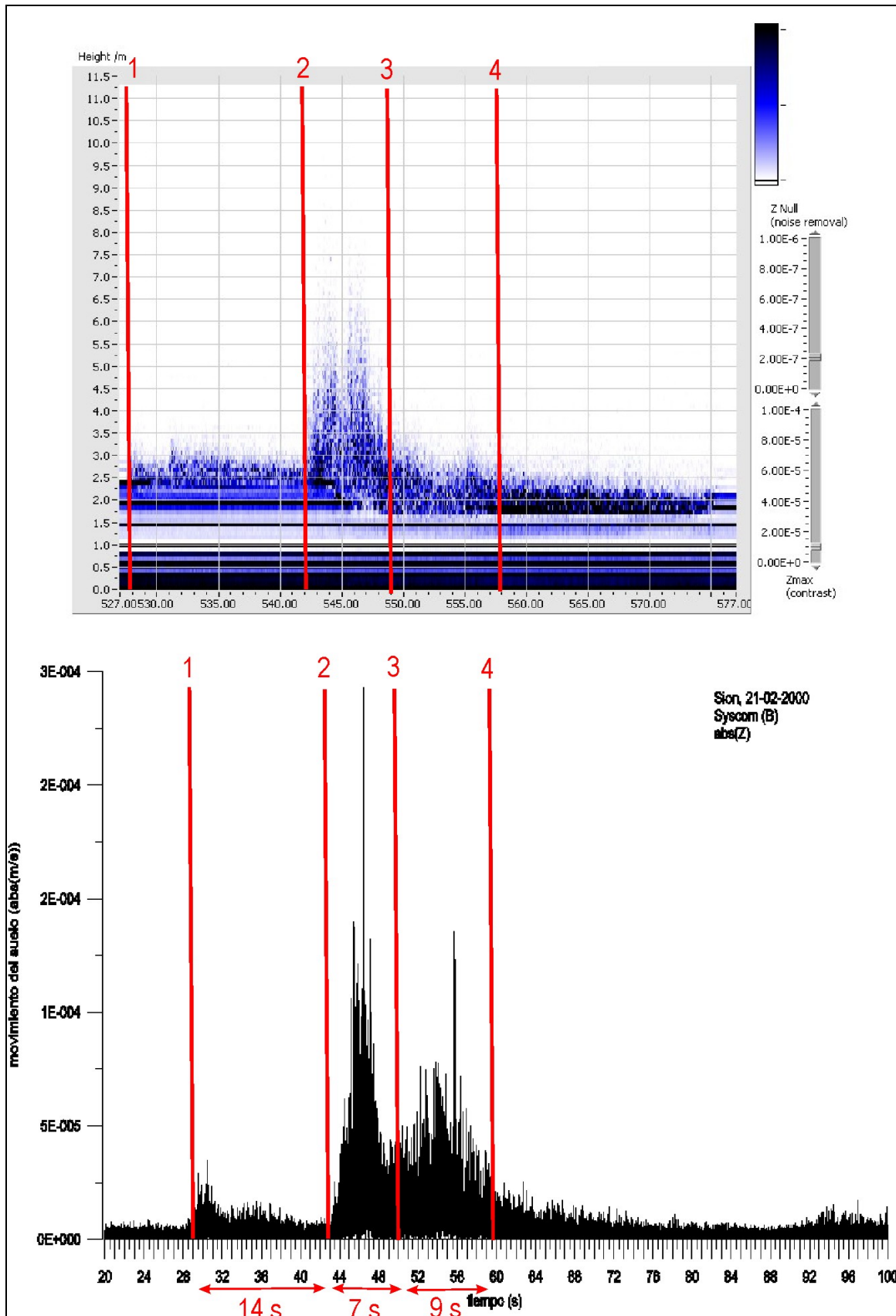


Figura 7-25. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 21 de febrero de 2000 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud

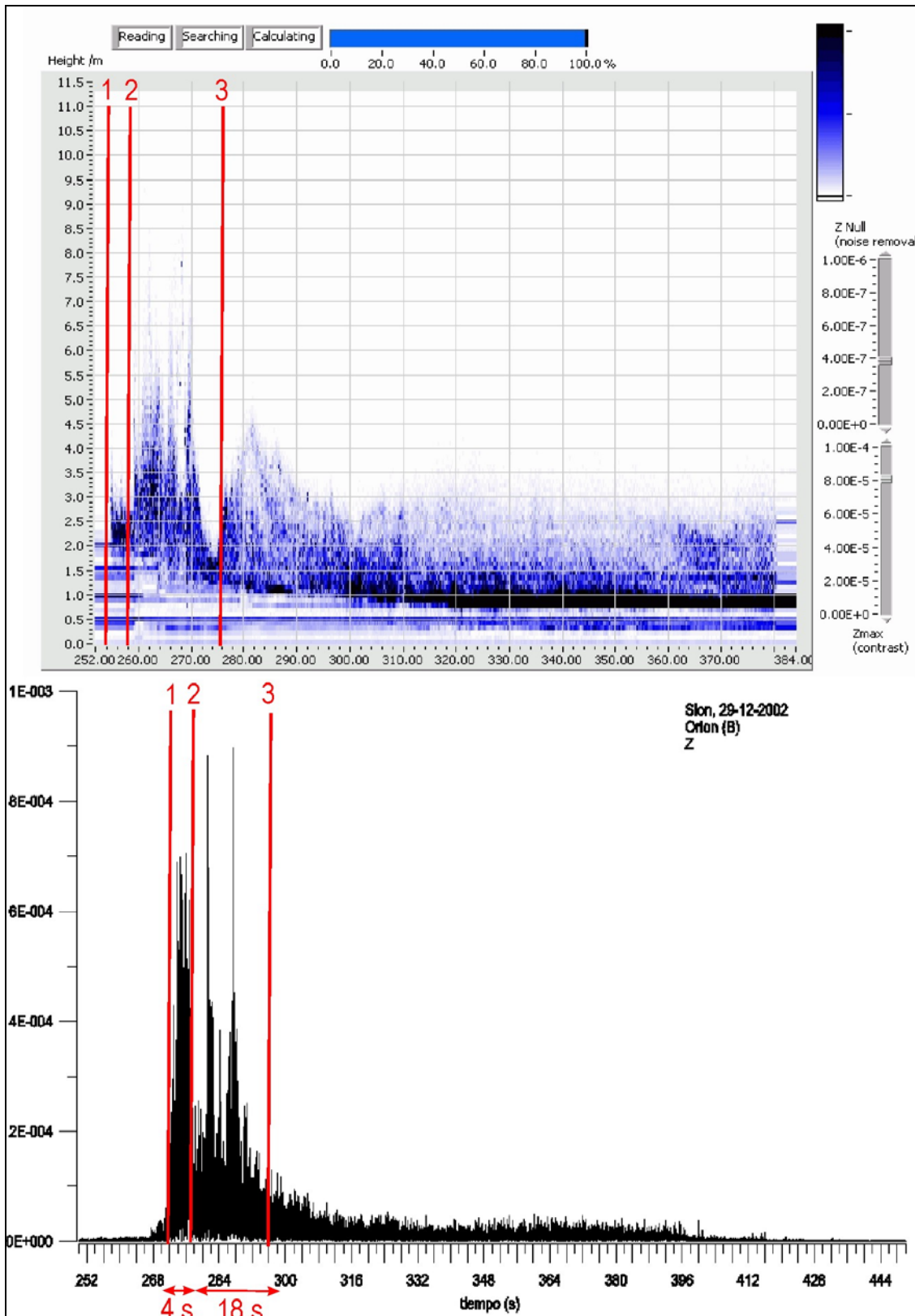


Figura 7-26. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 29 de diciembre de 2001 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud.