

Delimitación de la zona amenazada por aludes, en el área dominada del torrente de Estiviellas (Canfranc-Estación, Huesca)

Fernández-Santos, P.^{1*}, Songini, G.², Hurtado, R.³, Mintegui, J.A.¹

¹ *Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental. ETS de Ingeniería de Montes, Forestales y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid. 28040 MADRID.*

² *Settore Territorio e Risorse. Montana S.p.A. 20143 Milano.*

³ *Ingeniero de Montes, especialista en nivología y aludes.*

*e-mail: pfernandezsantos@gmail.com

Resumen

Se muestra un estudio realizado para estimar el peligro actual por aludes en el cono de sedimentación del torrente de Estiviellas, donde se encuentran la iglesia, la carretera y la Estación Internacional de Ferrocarril en el municipio de Canfranc-Estación (Huesca).

Se ha identificado la zona de salida más probable de aludes de grandes dimensiones y modelando su recorrido con el programa suizo AVAL-1D para periodos de retorno de 30 y 300 años. Con los resultados obtenidos, se han delimitado las zonas con diferentes grados de peligro según la Normativa Suiza (NS). Cada zona de peligro tiene asociadas restricciones de uso del territorio; que en los países alpinos se incorporan a los Planes de Ordenación del Territorio, para limitar la exposición y vulnerabilidad de las personas y sus bienes ante los aludes. Los resultados muestran que según la NS existe riesgo de grandes aludes en el área dominada del torrente de Estiviellas, aunque en el modelado no se ha tenido en cuenta ni el bosque, ni las obras de defensa existentes en el paraje en cuestión, por lo que urge realizar proyectos de defensa contra aludes, para proteger las infraestructuras amenazadas, iniciando por el mantenimiento de los sistemas de defensa existentes.

Palabras clave: AVAL-1D, cartografía de riesgos, manto de nieve, Pirineo.

1. Introducción

El presente estudio aborda la cuestión del riesgo de aludes en Los Arañones, una localización del Pirineo Aragonés donde a partir del primer cuarto del siglo pasado se fue estableciendo la población de Canfranc-Estación, al ubicarse en ella la Estación Internacional de Ferrocarril de Canfranc, inaugurada el 18 de julio de 1928, en un paraje anteriormente despoblado por la amenaza frecuente de aludes.

1.1 Localización

La zona de estudio, concretamente Canfranc-Estación, se encuentra al noroeste de la provincia de Huesca en el valle pirenaico del Alto Aragón, perteneciente a la comarca de La Jacetania, aproximadamente en el centro de un eje en dirección Sur-Norte que enlaza la población de Jaca con la frontera con Francia. El río Aragón discurre por el fondo del valle al que da su nombre. La zona en cuestión está dominada por grandes macizos montañosos a ambos lados, por cuyas laderas escurren siete torrentes hasta desembocar en el citado río. Uno de esos torrentes es el Estiviellas, cuya cuenca es el escenario objeto de este estudio, situado en el término municipal de Canfranc.

1.2 Antecedentes de aludes en Los Arañones

El paraje de Los Arañones es una zona montañosa muy escarpada, que a principios del siglo XX era conocida por los frecuentes aludes que se desprendían en él durante el invierno; pero justamente fue elegido para establecer en él la Estación Internacional de Ferrocarril de Canfranc. Por ello a partir de 1906 D. Benito Ayerbe redactó y dirigió la ejecución de un proyecto para corregir el régimen torrencial de los tres cursos principales del paraje: Cargates, Epifanio y Estiviellas y, a partir de 1919, D. Florentino Azpeitia redactó y dirigió la ejecución del *Proyecto de defensa contra aludes y corrección de su régimen torrencial de las cuencas vertientes a la plataforma de la futura Estación Internacional de Canfranc*, ambos eran ingenieros de la 6ª División Hidrológico-Forestal con sede ejecutiva en la provincia de Huesca. El objetivo de estos proyectos era reducir los riesgos naturales en el paraje en cuestión, que amenazaban la viabilidad de las obras de la Estación Internacional. En el ámbito específico de la defensa contra aludes, se realizaron importantes obras consistentes en diques vacíos (invento que surgió con estos proyectos, Marraco, 1999), banquetas de piedra seca, muretes, redes, piquetes metálicos, pantallas y rastrillos y, junto a todas las estructuras enumeradas y como complemento de las mismas, la reforestación del lugar para asegurar el anclaje de la nieve al terreno.

Se ha comprobado que las obras realizadas, junto con la reforestación, han conseguido controlar las crecidas torrenciales y reducido considerablemente el peligro de aludes; pero sigue latente el peligro de grandes aludes, sobre todo los de tipo aerosol, que amenazan a determinadas zonas del núcleo de Canfranc-Estación.

El torrente que presenta mayores riesgos es el Estiviellas y en él se centra este es-

tudio. Entre los cinco aludes más importantes desprendidos del mismo (*Tab. 1*) destaca el alud del 2-02-1986, que tras derribar el primer dique de los construidos en el torrente (contado desde su cabecera), provocó serios daños en la iglesia del pueblo, ubicada en el cono de sedimentación de dicho torrente. (Muñoz Trigo, 1988; Delgado, 1989).

Tabla 1. Aludes más importantes que han afectado al núcleo de población de Canfranc-Estación desde 1901. Fuente: Leo Ferrando & Cuchí Oterino (2004).

Año	Localidad	Origen	Daños	Víctimas
1901	Arañones	Estiviellas		
24/2/1915	Arañones		Edificios	Un herido
4/3/1916	Arañones	Estiviellas	Edificios	
1954	Arañones		Bosque	
1962	Arañones	Estiviellas	Dique	
1970	Arañones	Epifanio	Vagones	
2/2/1986	Arañones	Estiviellas	Iglesia y Dique	
25/12/1993	Arañones	Estiviellas	Iglesia	

2. Objetivos

El presente estudio tiene dos objetivos directos:

1. Estudiar la situación de peligro de aludes actual en el torrente de Estiviellas, utilizando el modelo suizo AVAL-1D
2. Delimitar las diferentes zonas de peligro por alud en el cono de sedimentación del torrente, aplicando la Normativa Suiza sobre Aludes. Indirectamente plantea la necesidad de establecer en España una metodología para introducir el peligro de aludes en los instrumentos de Ordenación del Territorio.

3. Metodología

La metodología se adecúa a lo planteado por Tecilla & Cordola (2005) y establece los tres apartados siguientes:

1. Descripción física del área de estudio.
2. Análisis de los datos meteorológicos y de la innivación.
3. Aplicación del modelo AVAL-1D.

3.1 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio abarca toda la cuenca del torrente de Estiviellas, en la que se identifican las tres partes de una cuenca torrencial: el área de recepción, la garganta o zona de recorrido y el cono de sedimentación (*Fig. 1*).

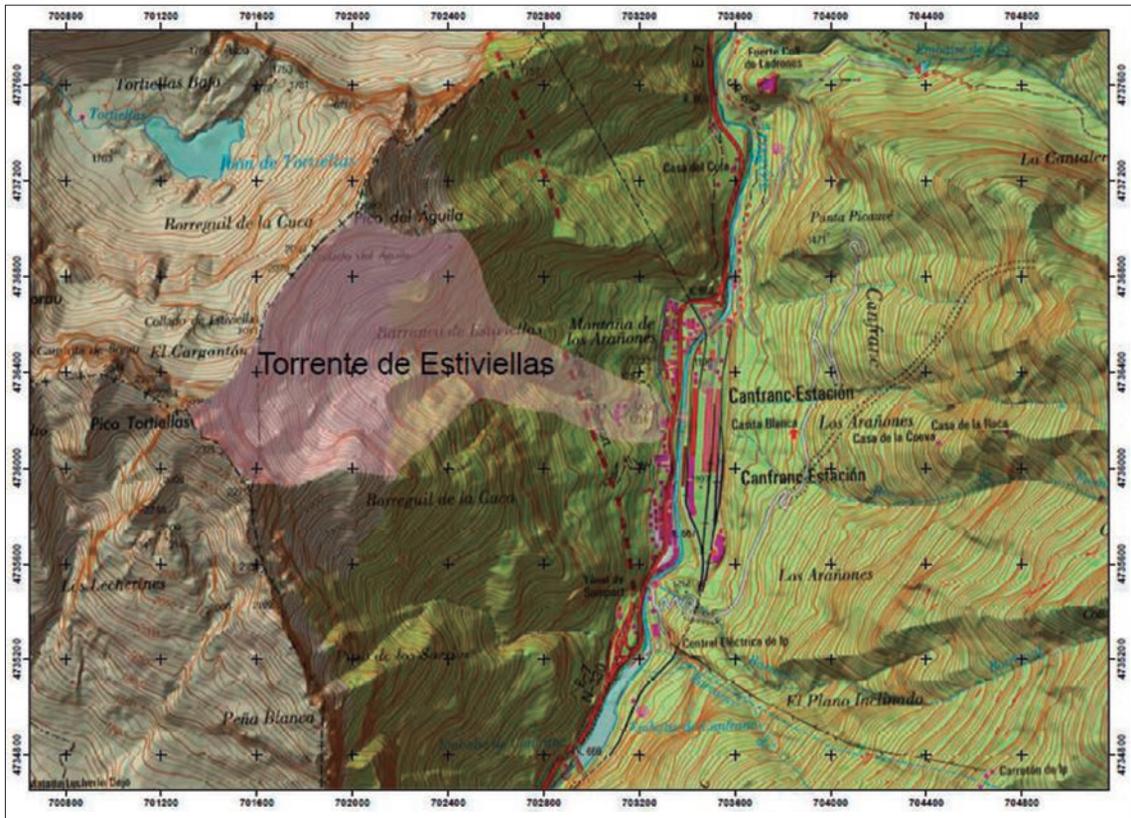


Figura 1. Cuenca vertiente al torrente de Estiviellas.

El área de recepción o zona de salida del alud se ubica en la zona más alta de la cuenca, desde los 2358 msnm del pico Tortiellas hasta el inicio de la garganta a 1690 msnm, donde se encuentran los restos del dique destruido por el alud de 1986. Tiene una forma de semi-embudo orientado al este. Es la zona de mayor acumulación de nieve y desde la que salen los diferentes aludes de la cuenca, canalizándose más abajo en la garganta. Su pendiente media es de $35,9^\circ$. Toda la cuenca está salpicada por diferentes obras de defensa. En años de innivación normal se evita la salida de muchos aludes de pequeñas y medianas dimensiones, pero en años de innivación excepcional, las obras son cubiertas por el manto de nieve y su efecto se reduce de forma importante.

La garganta o zona de recorrido se encuentra ubicada entre la zona de salida y el cono de deyección. Empieza en el dique destruido (1690 msnm) y acaba al inicio del cono de deyección a 1310 msnm aproximadamente. La pendiente media es de $26,5^\circ$. Existen tres grandes diques vacíos en la garganta, que no se han considerado en las modelizaciones. Destaca un gran salto vertical de 90 m al inicio de la garganta, conocido como *Cola de Caballo*.

El cono de deyección o zona de llegada se encuentra en la zona baja de la cuenca. Empieza en el final de la garganta y termina en la confluencia con el río Aragón (1190 msnm). La pendiente media es de $7,1^\circ$. En el cono existen 2 obras defensivas: La primera de ellas se trata de 6 cilindros de hormigón; la segunda, de un dique de

tierra y piedra que actúa como dique de cierre aguas arriba de la iglesia.

Mediante la información recogida en los mapas descriptivos (pendientes, orientaciones, altitudes, vegetación y suelos), ortofotos y las visitas de campo, se dividió el área de recepción en cinco zonas de salida bien diferenciadas (Fig. 2). Las zonas D y E son torrenteras laterales que se incorporan a la garganta a mitad del recorrido; que no se estudiaron, porque los aludes que pueden desprenderse de ellas no se espera que sean de grandes dimensiones. La zona C es de gran acumulación de nieve, con vegetación arbórea de pequeño porte (*Pinus uncinata*) y fuerte pendiente; es un lugar de frecuentes aludes de pequeñas y medianas dimensiones. La zona B es otra zona de elevada pendiente y gran acumulación de nieve, con escasa vegetación leñosa, muy salpicada de obras defensivas. La zona A se considera la más peligrosa por los siguientes motivos: *a*) No hay vegetación en toda la zona de salida. Son rocas que no sujetan la nieve; *b*) Tiene orientación noreste, que es la más desfavorable de las existentes en la cuenca y *c*) La pendiente media es de 33° , continua y sin ningún obstáculo. Aguas arriba de esta zona A se encuentra la cresta de *Los Lecherines*, desde la que caen grandes bloques de piedra y pueden desprenderse grandes cornisas de hielo y nieve, siendo un factor de inestabilidad para el manto de nieve. El alud del 2-02-1986 se desprendió justo desde esta zona. Se trata de la zona donde es más probable que se desencadene un alud de grandes dimensiones y la que se modela en este documento.

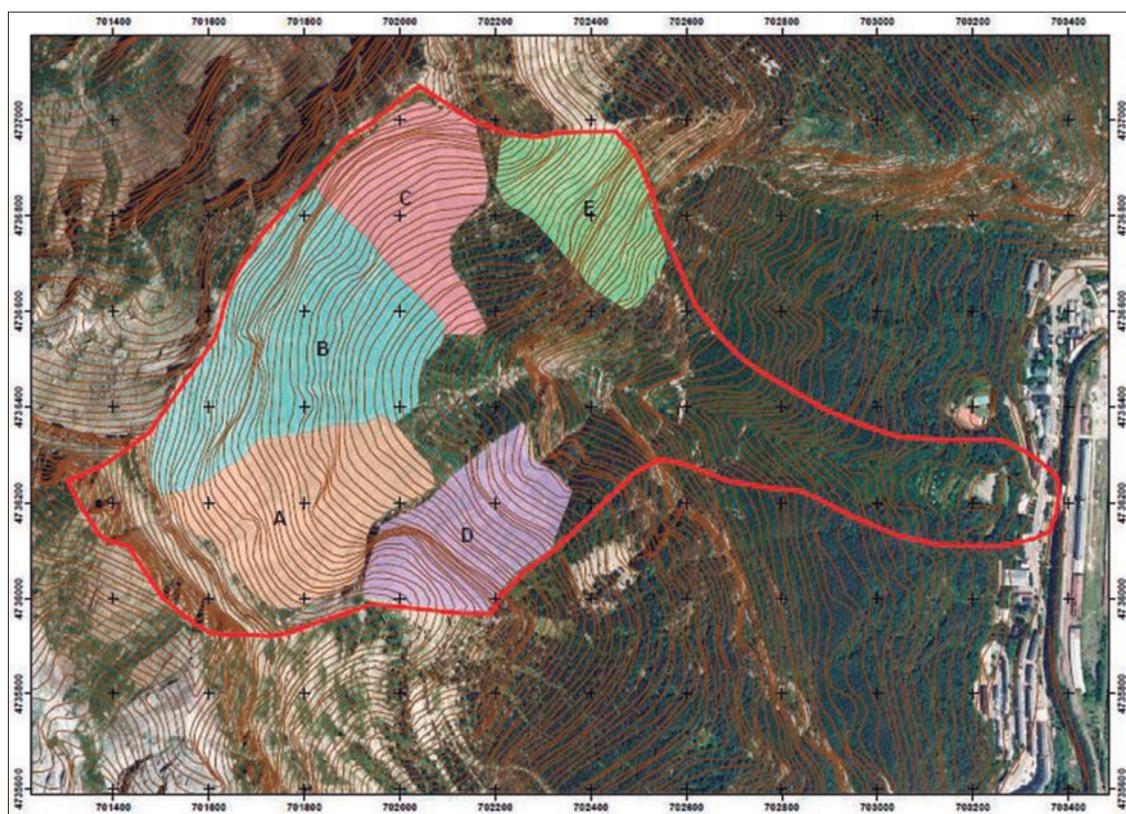


Figura 2. Zonas diferenciadas de posible salida de aludes en la cuenca de Estiviellas.

3.2 Análisis de la innivación en la zona de estudio

Los aludes de dimensiones excepcionales se producen durante las grandes nevadas o unas horas después de ellas. En la modelización de aludes se considera que el espesor de nieve que se pone en movimiento corresponde a la nieve acumulada en las últimas 72 h. El modelo AVAL-1D requiere este dato para periodos de retorno de 30 y 300 años.

Para obtenerlo, a falta de datos nivológicos precisos en el Pirineo Aragonés, se ha recurrido a una conversión de los datos de lluvia en datos de nieve. La transformación de milímetros de agua a centímetros de nieve es función de la densidad de la nieve. En la zona de estudio la densidad media de la nieve se estima en 150 kg/m^3 ; por lo que se estableció una equivalencia de 1 cm de nieve = 1,5 mm de lluvia. García et al. (2006). Atendiendo a lo indicado, para el periodo de retorno de $T=30$ años, la precipitación es $P=201$ mm y el equivalente de nieve 134 cm normal a la horizontal y para $T=300$ años, la $P=274$ mm de agua y el equivalente de nieve 182 cm normal a la horizontal.

Partiendo de los datos anteriores, la metodología de Tecilla & Cordola (2005) para calcular la altura máxima de nieve en 72 h en la normal al plano de la pendiente en la zona de salida, considerando el factor de la pendiente y la acumulación de nieve por viento, se establece mediante la siguiente ecuación:

$$H_o(T, z) = [H_{max72} * \cos \theta + H_v] * f(\theta)$$

Siendo:

$H_o(T, z)$: la altura de nieve máxima en 72 h en la zona de salida normal al plano de la pendiente, con un periodo de retorno T y en una cota z .

H_{max72} : es la altura máxima de nieve en 72 h en la normal al plano horizontal.

θ : es el ángulo medio de la pendiente en la zona de salida.

H_v : es la altura de nieve acumulada por efecto del viento (Föhn, 1980).

$f(\theta)$: es el factor de la pendiente. Cuanto más elevada sea la pendiente, menos nieve se acumula, por efecto de las purgas naturales.

Aplicando la ecuación anterior a los datos del lugar, se obtuvieron los siguientes resultados para la altura del manto de nieve:

$$H_o(30 \text{ años, cota } 2000 \text{ m}) = 127 \text{ cm}$$

$$H_o(300 \text{ años, cota } 2000 \text{ m}) = 159 \text{ cm}$$

3.3 Aplicación del modelo AVAL-1D

El modelo AVAL-1D es un programa desarrollado por el Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF), que plantea un modelo dinámico de aludes para calcular sus distancias en la zona de llegada, sus velocidades y las presiones asociadas a ellas; diferenciando si se trata de aludes de nieve densa o de nieve en polvo. Es un modelo mono-dimensional y contiene dos módulos de trabajo: FL-1D para aludes de nieve densa y SL-1D para los aludes de nieve en polvo. Ambos resuelven

las ecuaciones de continuidad y de la dinámica en un sistema de diferencias finitas, a las que se añaden las condiciones de contorno. El módulo SL-1D está en fase experimental, mientras que el módulo FL-1D está operativo, ha sido calibrado con aludes reales en los Alpes suizos y está diseñado para utilizarlo en condiciones similares a las de dichas montañas; también se ha probado en doce aludes en el Pirineo Catalán con buenos resultados Oller et al. (2009). Por todo lo expuesto, en la modelización de los aludes en el torrente Estiviellas se utilizó el software AVAL-1D, módulo FL-1D.

3.3.1. Especificaciones del modelo AVAL-1D y módulo FL-1D

Se trata de un modelo numérico, continuo, basado en la Mecánica de Fluidos, cuasi unidimensional y que asume las siguientes hipótesis:

- a. La nieve es un fluido continuo y deformable.
- b. El movimiento del alud es de régimen turbulento.
- c. El movimiento del alud cumple con las ecuaciones de continuidad y de la dinámica.
- d. La masa es constante y la densidad es constante.
- e. La altura de nieve en la zona de salida es constante. El modelo tiene su origen en las ecuaciones del modelo dinámico de Voellmy-Salm (Salm et al., 1990) con aportaciones posteriores de Bartelt et al. (1999).

a) Ecuación de conservación de la masa:
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{\text{ganancias}} - q_{\text{pérdidas}}$$

Siendo: x , la distancia longitudinal en la dirección del movimiento y t , el tiempo $A(x, t) = w(x) \cdot h(x, t)$ el área de la sección perpendicular al flujo del alud.

$Q(x, t) = A(x, t) \cdot U(x, t)$ el caudal volumétrico medio.

$w(x)$, la anchura media; $h(x, t)$, la altura media y $U(x, t)$ la velocidad del alud.

$q_{\text{ganancias}}$; $q_{\text{pérdidas}}$ son las variaciones de masa debido a la erosión y la sedimentación.

b) Ecuación de la dinámica (conservación de la cantidad de movimiento):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha(x, t) \frac{Q^2}{A} \right] + \lambda g A \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta = A [g F_0 - g F_r]$$

Siendo: $\alpha(x, t)$ el factor de velocidad (adimensional); λ el coeficiente activo/pasivo de presión (adimensional); $\theta(x)$ el ángulo de la pendiente; F_0 la componente tangencial del peso; F_r la componente de la fuerza de rozamiento

c) El rozamiento se calcula mediante la expresión:
$$F_r = \mu \cos \theta + \frac{U^2}{\xi h}$$

Siendo: μ el coeficiente de rozamiento dinámico (adimensional) y ξ el coeficiente de rozamiento turbulento (ms^{-2}). Ambos coeficientes se ajustan al calibrar el modelo.

3.3.2. Inputs del Modelo

Para manejar AVAL-1D es necesario introducir los siguientes parámetros:

- Topografía: perfil longitudinal del recorrido del alud y su anchura.
- Morfología del terreno en cada tramo del recorrido del alud.
- Zona de salida del alud.
- Altura de nieve máxima normal al plano de la pendiente en 72 horas.
- Periodo de retorno (30 o 300 años)
- Coeficientes de rozamiento (μ y ξ).

3.3.3. *Outputs del modelo* (Christen et al., 2002)

El modelo ofrece los resultados de forma gráfica y numérica. Los outputs son:

- Presiones máximas del alud (kPa).
- Velocidades del alud (m/s).
- Altura máxima del flujo de nieve (m).
- Distancias de la zona de llegada/depósito (m).

El modelo no permite considerar las obras defensivas existentes en el perfil longitudinal de la trayectoria del alud. Sin embargo, en la zona de depósito, donde se reduce la pendiente, el modelo permite detallar más el perfil longitudinal. Por ello, se han realizado:

- a. Dos simulaciones (de T=30 años y T=300 años) sin considerar ningún dique.
- b. Otras dos simulaciones (de T=30 años y T=300 años) considerando únicamente el dique de cierre que existe en el cono de sedimentación, aguas arriba de la iglesia de Canfranc. Previamente a las cuatro simulaciones, se ha comprobado el modelo AVAL-1D con la información del alud desencadenado en el torrente de Estiviellas el 2-02-1986, para determinar los coeficientes μ y ξ (Fig. 3).

4. Resultados

Los resultados de las cuatro simulaciones realizadas con el modelo AVAL-1D en el torrente de Estiviellas para aludes de recurrencia de T=30 años y T=300 años, en las situaciones: a) sin considerar y b) considerando el dique de escollera reforzado de tierra que se sitúa aguas arriba de la iglesia de Canfranc, se muestran en la Tab. 2; que también define los parámetros que aporta el modelo en la sección donde se ubica la iglesia.

5. Discusión de resultados

En la Tab. 2 se observa que el efecto del dique construido aguas arriba de la iglesia de Canfranc modifica sustancialmente los resultados de las distintas simulaciones, especialmente para el alud de periodo de recurrencia T = 30 años; pues la distancia de la zona de alta presión (30 kPa) se reduce 23 m, y la distancia de la zona de baja presión (3 kPa) se reduce 61 m. En el punto monitorizado (la iglesia), se observa que la presión máxima del alud se reduce un 61 %, pasando de 15.2 kPa a 5.9 kPa.

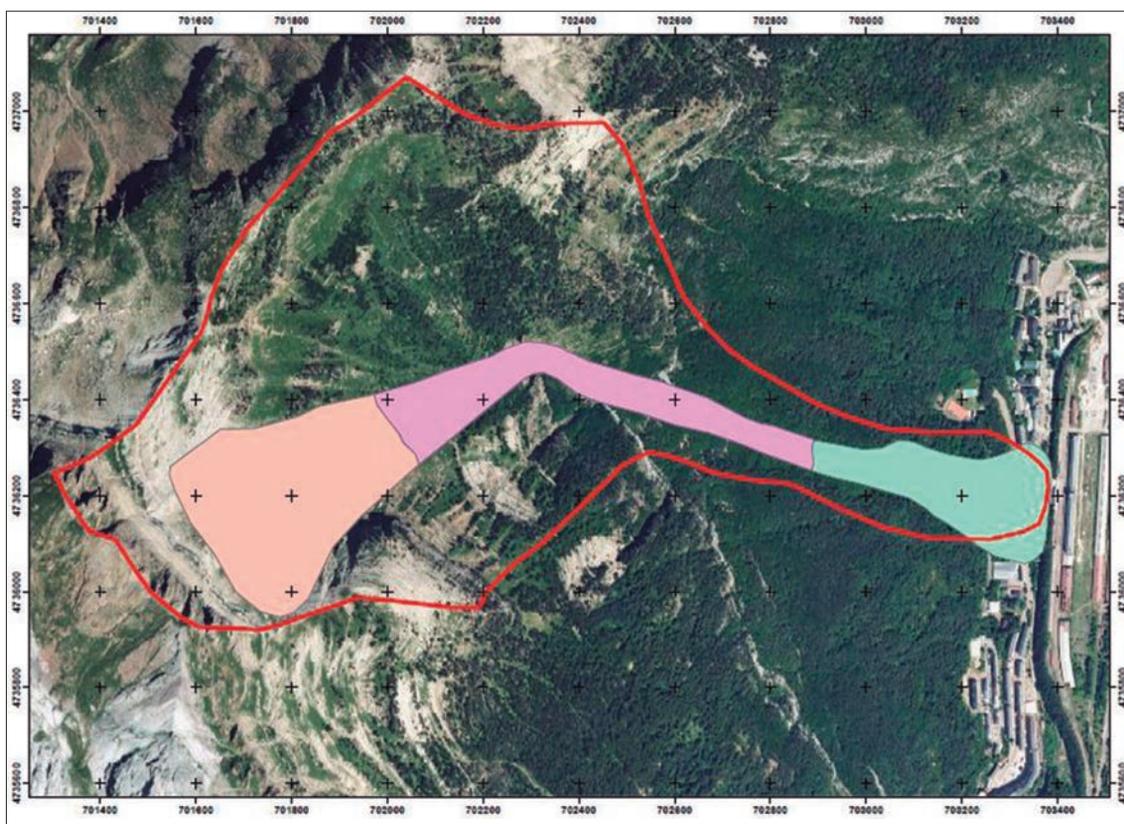


Figura 3. Trayectoria del alud desprendido en el torrente de Estiviellas el 2-02-1986.

Tabla 2. Resultados de la aplicación del modelo AVAL-1D a la cuenca del torrente de Estiviellas, para periodos de retorno de 30 años y 300 años.

Periodo de retorno 30 años		Sin dique	Con dique	Variación
Distancias zona de depósito	Distancia proyectada de la zona con presión = 30 kPa (m)	1756	1733	-1.30 %
	Distancia proyectada de la zona con presión = 3 kPa (m)	1913	1852	-3.18%
Parámetros en la iglesia de Canfranc	Velocidad máxima (m/s)	7.11	4.4	-38.11%
	Altura máxima de nieve (m)	1.08	0.1	-90.74%
	Presión máxima (kPa)	15.2	5.9	-61.18%
Periodo de retorno 300 años		Sin dique	Con dique	Variación
Distancias zona de depósito	Distancia proyectada de la zona con presión = 30 kPa (m)	1933	1929	-0.20%
	Distancia proyectada de la zona con presión = 3 kPa (m)	1993	1988	-0.25%
Parámetros en la iglesia de Canfranc	Velocidad máxima (m/s)	17	16.2	-4.70%
	Altura máxima de nieve (m)	1.74	1.6	-8.04%
	Presión máxima (kPa)	86.3	78.7	-8.80%

A la vista de los resultados, se puede afirmar que el dique en cuestión tiene un efecto reductor importante para el alud de un periodo de retorno de 30 años.

En el caso del alud de $T = 300$ años, el dique construido aguas arriba de la iglesia tiene un efecto limitado. La distancia final de la zona de alta presión solo se reduce en 4 m y la zona de baja presión en 5 m. En la iglesia la presión se reduce tan solo un 8.8%, pasando de 86.3 kPa a 78.7kPa.

La utilización de los periodos de recurrencia de $T=30$ años y $T=300$ años se relaciona con la *Directiva para la consideración del peligro de aludes en las actividades de incidencia territorial* redactada por el **Instituto Federal para el Estudio de la Nieve y las Avalanchas** (1984), de la Confederación Helvética, que fija en el territorio cuatro zonas con diferentes riesgos de aludes, para las que establece los siguientes límites:

- Zona roja (elevado peligro), está sujeta a una de estas dos condiciones:
 - a) $T= 30$ años y $P \geq 3$ kPa
 - b) $T=300$ años; $P \geq 30$ kPa
- Zona azul (moderado peligro), debe cumplir una de estas dos condiciones:
 - a) $T = 30$ años; $P \leq 3$ kPa
 - b) $T = 300$ años; $3 \text{ kPa} \leq P \leq 30 \text{ kPa}$
- Zona amarilla (bajo peligro, zona facultativa) se define por las condiciones: $T= 300$ años; $0.3 \text{ kPa} \leq P \leq 3 \text{ kPa}$
- Zona blanca (zona segura). Se considera que no existe peligro de aludes.

Cada zona de peligro tiene asociada en la normativa suiza una serie de limitaciones de uso del suelo, que son muy restrictivas en la zona roja y se van suavizando en la azul y amarilla.

Para la cuenca del torrente de Estiviellas se han determinado las diferentes zonas de peligro en función de las condiciones de presión y periodo de retorno de los aludes simulados con el modelo AVAL-1D, que se sintetizan en la *Tab. 3*. Para editar el mapa de peligro en el cono de sedimentación del torrente, se han escogido las distancias más restrictivas de cada zona, quedando la zonificación como se define en la *Tab. 4* y se muestra gráficamente en la *Fig. 4* que establece el *mapa de zonas peligro* con las líneas de color rojo y azul para delimitar sus correspondientes zonas, representadas sobre la ortofoto.

Tabla 3. Longitudes de las zonas de peligro de alud en función del periodo de retorno y la presión dinámica.

Zona	Periodo de retorno	Presión	Distancia proyectada
Roja	30	≥ 3 kPa	1913 m
	300	≥ 30 kPa	1933 m
Azul	30	$0 \text{ kPa} \leq P \leq 3 \text{ kPa}$	1923 m
	300	$3 \text{ kPa} \leq P \leq 30 \text{ kPa}$	1993 m
Amarilla	300	$0.3 \text{ kPa} \leq P \leq 3 \text{ kPa}$	1996 m

Tabla 4. Longitud finalmente adoptada para establecer las zonas de peligro.

Zona	Distancia proyectada
Roja	$d \leq 1933$ m
Azul	$1933 \text{ m} \leq d \leq 1993$ m
Amarilla	$1993 \text{ m} \leq d \leq 1996$ m

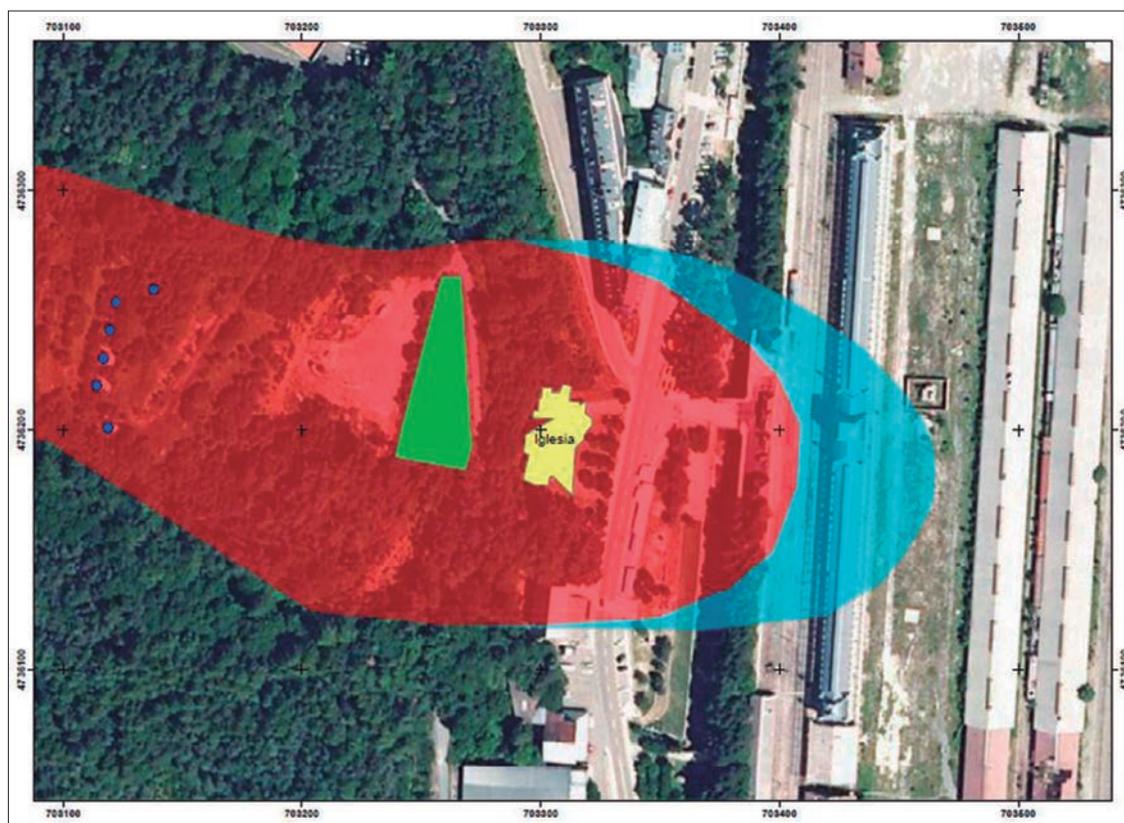


Figura 4. Zonas de peligro en el cono de deyección del torrente de Estiviellas, definidas con el modelo AVAL-1D y la Directiva para la consideración del peligro de aludes en las actividades de incidencia territorial del Instituto Federal para el Estudio de la Nieve y las Avalanchas de la Confederación Helvética. Zona roja indica elevado peligro, zona azul indica moderado peligro. Obras defensivas en el cono de deyección: Cilindros de hormigón (color azul) y dique de cierre (color verde). Edificio de la iglesia en color amarillo.

Analizando la Fig. 4, dentro de la zona roja se encuentra el edificio de la iglesia que, además, está muy alejado de la zona azul (96 m) y justo en el centro de la zona de llegada del alud. La carretera N-330a tiene un tramo de 137 m de longitud dentro de la zona roja, que en la parte central de la zona de llegada está situada a 71 m de la zona azul. El edificio del ayuntamiento de Canfranc está situado de manera parcial en zona roja; así como un bloque de apartamentos. Los resultados obtenidos con el modelo respecto a la presión se refieren al eje central del alud; como el ayuntamiento y el bloque de edificios no están sobre dicho eje, es lógico pensar

que las presiones serán inferiores a las que aporta el modelo.

En la zona azul se encuentra el edificio de la Estación Internacional de Canfranc, a 41 m de la zona blanca (zona segura).

En la zona blanca se encuentran los dos barrios del pueblo de Canfranc-Estación, a ambos lados de la zona de llegada, donde se levantan la mayor parte de los edificios de viviendas, hoteles y restaurantes.

6. Conclusiones

Las simulaciones realizadas con el modelo AVAL-1D establecen que actualmente existe peligro de que un gran alud llegue hasta la iglesia, la carretera N-330a y edificio de la Estación Internacional de Canfranc, si se consideran las instrucciones de la Normativa Suiza de Zonas de Peligro. Pero el procedimiento utilizado no ha tenido en cuenta ni el bosque (que procede de repoblación y está consolidado), ni las obras de defensa contra aludes (específicamente las obras de retención del manto de nieve) existentes en el paraje en cuestión; por lo que se estima que un alud real tenga una longitud y unas presiones menores a las mostradas en la *Figura 4*, en la que se definen las zonas de peligro en la zona dominada del torrente de Estiviellas del lado de la seguridad. Pero tampoco hay que olvidar que los aludes del 2-02-1986 y del 25-12-1993 afectaron a la iglesia de Canfranc y ésta actuó de muro de contención.

La playa de vías de la Estación Internacional se encuentra en una zona segura respecto los aludes provenientes del torrente de Estiviellas; pero puede estar en una zona de peligro respecto de los aludes de los torrentes de Epifanio y Cargates. En un estudio de García *et al.* (2006) sobre el torrente de Epifanio, llegan a la conclusión de que el peligro de que un alud extraordinario alcance la actual playa de las vías de la Estación Internacional de Canfranc sigue presente.

Se propone la realización de un mapa de zonas de peligro, siguiendo la metodología empleada en la cuenca del torrente de Estiviellas, para las cuencas de los torrentes de Epifanio y Cargates, con el objetivo de obtener un plano de peligro de aludes de todo el municipio de Canfranc-Estación.

Debido a que ha sido posible la inclusión en el modelo AVAL-1D del perfil del dique de tierra situado aguas arriba de la iglesia, se ha podido estudiar su efecto. Se ha comprobado que para un periodo de retorno de 30 años, la zona de llegada y las presiones se reducen de forma muy considerables. No ocurre lo mismo para un alud con un periodo de retorno de 300 años. Un motivo posible por lo que el dique de tierra es bastante efectivo, es porque está situado en la zona de depósito, donde la pendiente es muy inferior a otras zonas del recorrido del alud y éste llega con mucha menos velocidad y fuerza; por lo que pequeñas variaciones en el perfil, tienen un efecto notable, como se observa en la *Fig. 5*.

De la información que se dispone de la época, se desprende que los diques destruidos por los aludes de 1962 y 1986 también se trataron de ubicar en zonas donde los aludes tuvieran una pérdida de energía previa (el primero inmediatamente aguas abajo de *La Cola de Caballo*, al inicio de la garganta; y el segundo encima de *La*

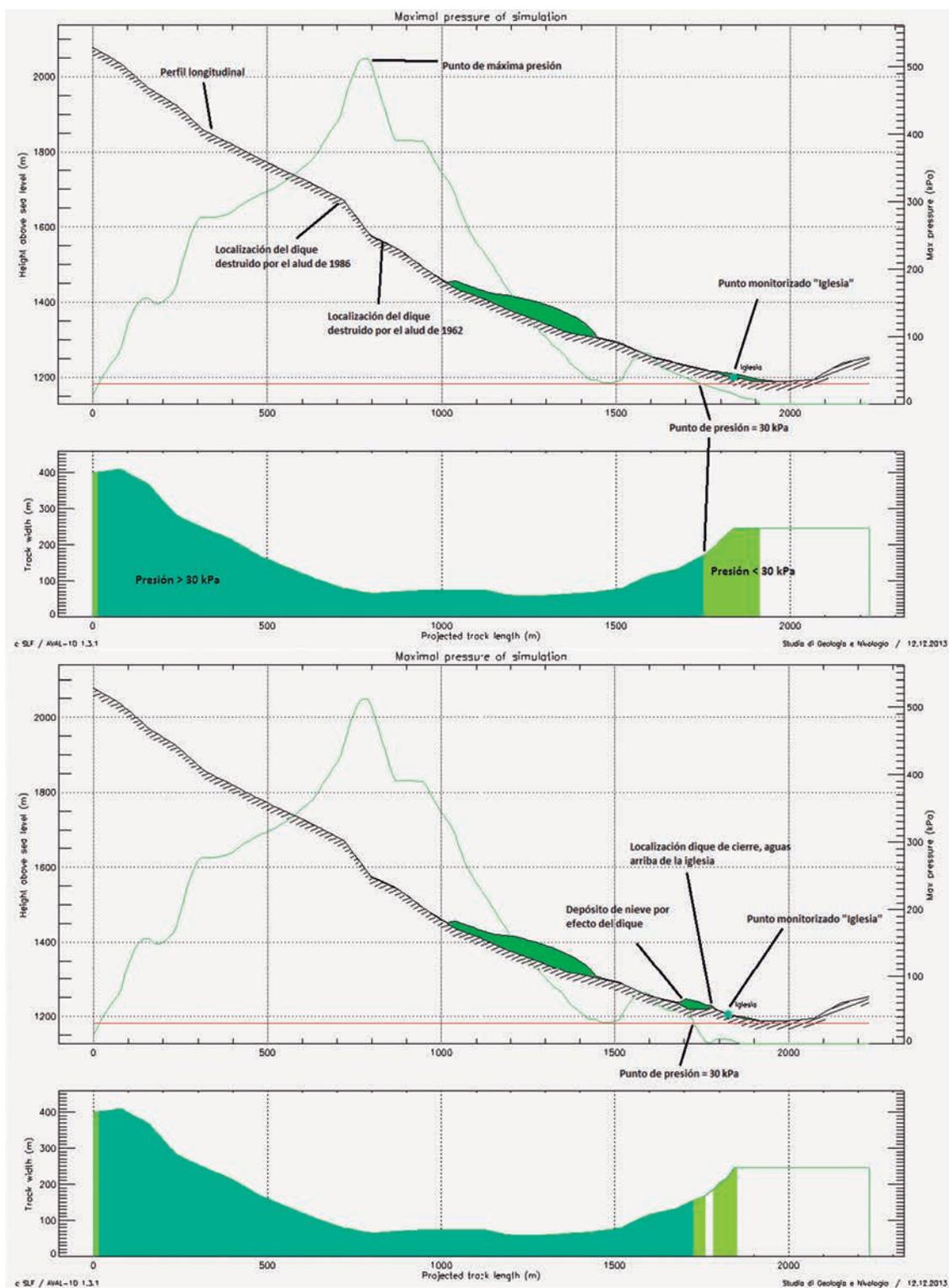


Figura 5. Resultados gráficos de la simulación de un alud en el torrente de Estiviellas para un periodo de retorno $T = 30$ años con el modelo AVAL-1D. Imagen superior: sin considerar el efecto del dique de cierre situado aguas arriba de la iglesia. Imagen inferior: considerando el efecto del dique de cierre.

Cola de Caballo, justo cerrando la zona de recepción). En el primer caso se estimó que el impacto del alud contra el suelo, tras caer de la cascada, le haría perder la energía suficiente para poder ser retenido a continuación con un dique rastrillo; en el segundo era una forma de acotar el movimiento del manto de nieve en cabecera. El modelo AVAL-1D es una herramienta muy útil para precisar estos puntos de vista (Fig. 5) y permitir decidir con mayor detalle la mejor ubicación de los diques. Justo debajo del gran salto de 90 m de *La Cola de Caballo* se observa que la velocidad y presión disminuyen de forma notable; efecto que también lo observó Ayerbe (1967).

7. Bibliografía

- Ayerbe y Vallés, J. M., 1967. Evolución de las obras de contención de aludes en España y cálculo de las mismas. *Montes*, 135, 163-168
- Bartelt, P., Salm, B., Gruber, U., 1999. Calculatin dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/pasive longitudinal straining. *J. Glaciology*, 45 (150), 242-254.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., 2002. AVAL-1D *Numerische Berechnung von Fliess-und Staublawinen, Manual zur Software*, Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung, Davos.
- Delgado, J.C., 1989. *Proyecto de continuación de las obras de defensa contra aludes en la cuenca del torrente Estiviellas*. Canfranc. Huesca. PFC. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Föhn, P., 1980. Snow transport over mountain crests. *J. Glaciology*, 26 (94), 469-480.
- García, J.L., Arrazola, J.F., Cuchí, J.A., Fábregas, S., 2006. La protección de poblaciones e infraestructuras contra aludes. El caso del torrente Epifanio en Canfranc (Huesca). Ponencia presentada en el *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente-octubre 2006*, Zaragoza, España.
- Istituto Federale per lo Studio della Neve e delle Valanghe (1984). *Direttive per la considerazione del pericolo di valanghe nelle attività di incidenza territoriale*. WSL (Davos), 22 pp.
- Leo Ferrando, E. y Cuchí Oterino, J.A., 2004. Los Aludes en el Alto Aragón. *Lucas Mallada*, 135-161.
- Marraco Solana, S., 1999. La Restauración Hidrológico-Forestal en el Pirineo Aragonés: Tres ejemplos y una conclusión. Madrigal Collazo, A. (ed.), *Ciencias y Técnicas Forestales: 150 años de aportaciones de los ingenieros de montes*. Fundación Conde del Valle de Salazar, E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid, pp. 261-270.
- Muñoz Trigo, P., 1988. *Prevención y defensa contra aludes. Aplicación práctica al Pirineo Aragonés*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Oller, P., Janeras, M., De Buen, H., Arnó, G., Christen, M., García, C., Martínez, P., 2010 Using AVAL-1D to simulate avalanches in the eastern Pyrenees, *Cold Reg. Sci. and Technol.*, 64(2), 190-198.
- Salm, B.,Burkard, A., Gubler, H.U., 1990. *Berechnung von Fliesslawinen Eine Anleitung für*

Praktiker mit Beispielen. Eidgenössischen Institut für Schnee und Lawinenforschung.
Num. 47.

Tecilla, G., Cordola, M., 2005. *Linee Guida Metodologiche per la Perimetrazione delle Aree Esposte al Pericolo di Valanghe.* (M. Barbolini, & L. Natale, Edits.) Pavia: Università di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale.

