

# Reconstrucción del alud histórico que destruyó el pueblo de Àrreu en 1803

PERE OLLER<sup>1</sup>, ELENA MUNTÁN<sup>2</sup>, JAN-THOMAS FISCHER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GEONEU RISK, BARCELONA, 08024, CATALUÑA, ESPAÑA; PERE.OLLER@GEONEURISK.COM

<sup>2</sup> CONSULTORA DENDROCRONOLOGA FREELANCE, BARCELONA, 08458 CATALUÑA, ESPAÑA; EMUNTANBORDAS@GMAIL.COM

<sup>3</sup> DEPARTMENT OF NATURAL HAZARDS, AUSTRIAN RESEARCH CENTRE FOR FORESTS (BFW), 6020 INNSBRUCK, AUSTRIA; JT.FISCHER@BFW.GV.AT

## Resumen

Se tiene noticia de diversos desastres históricos por aludes de nieve en los Pirineos. La reconstrucción de los escenarios de estas catástrofes es compleja, pero muy necesaria para conocer las circunstancias que las provocan y poder evitarlas. En 1803, un alud destruyó el pequeño pueblo de Àrreu en el Pirineo catalán. En este artículo se explica cómo se realizó la reconstrucción del evento utilizando todas las fuentes y metodologías descritas para el análisis del peligro de aludes, incluyendo la dendrogeomorfología y la modelización dinámica (con SAMOS-AT) y estadística (alfa-beta). El resultado ha sido el de un alud de nivel destructivo 5 que movilizó toda la zona de salida de la zona de aludes del barranco de Monars, con un volumen de nieve estimado superior a  $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ , que no solo alcanzó el viejo pueblo de Àrreu, sino que, presumiblemente, llegó hasta el valle principal del río Noguera Pallaresa, doblando la distancia total de los aludes mayores descritos en esta zona de aludes. Se pretende con este trabajo destacar la importancia de realizar un examen exhaustivo de estos fenómenos excepcionales que a menudo permanecen ocultos, pero que cuando se desencadenan provocan daños colosales.

**PALABRAS CLAVE** – alud histórico, dendrogeomorfología, modelización dinámica, modelización estadística, Pirineo Catalán.

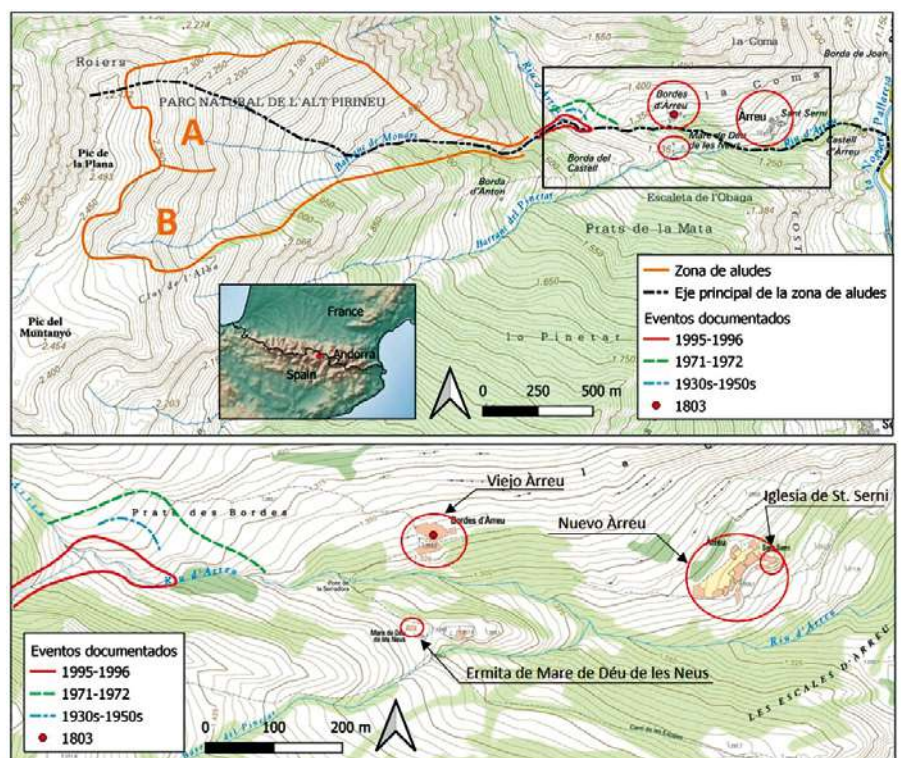
## Introducción

En los Pirineos, se conocen varios aludes catastróficos que podríamos calificar de históricos y que perduran en la memoria de sus habitantes. Son acontecimientos que han destruido pueblos o caseríos y matado a parte de su población. La recuperación de información sobre las circunstancias de estos desastres es difícil, puesto que a menudo ha quedado poca constancia escrita y las entrevistas no suelen proporcionar los detalles necesarios para la reconstrucción del recorrido de los aludes. Este es el caso del antiguo pueblo de Àrreu, en la comarca del Pallars Sobirà (Pirineo catalán), que en 1803 fue destruido por un alud de nieve que obligó a sus habitantes a trasladar su ubicación.

**Figura 1.** Situación de la zona de estudio. Los pueblos de Bordes d'Àrreu (viejo Àrreu) y Àrreu (nuevo Àrreu); Barranco de Monars, ríos Àrreu y Noguera Pallaresa, y picos de la Plana y Muntanyó. La zona de aludes de Monars está delimitada en naranja (ARRO10, modificada de BDAC-ICGC), zonas de salida principales (A y B) y eventos mayores identificados.

Los escritos que hacen referencia a esta catástrofe son tres, y fueron el punto de partida de este estudio. Madoz en 1845-50 hace la siguiente descripción de Àrreu: “Este pueblo antes de 1803 se hallaba construido  $\frac{1}{4}$  de hora más hacia el N; pero habiéndose desprendido en dicho año una gran masa de nieve, la cual arruinó las 10 casas de que entonces constaba, matando a 17 personas, se edificó en el punto que actualmente ocupa por conceptuarlo a cubierto de semejantes catástrofes.” Tan solo unos años antes del alud, de Zamora (1790) menciona que Àrreu estaba compuesto por siete casas en un solo vecindario, por lo que se interpreta que el alud destruyó el pueblo entero. Por otro lado, a partir de una oración dedicada a la Mare de Déu de les Neus, que tiene una ermita a poca distancia del antiguo pueblo, se sabe que el río de nieve (metáfora del alud) se originó en el barranco de Monars.

El presente artículo explica el trabajo de reconstrucción del escenario de la catástrofe de 1803 en el antiguo pueblo de Àrreu utilizando todas las fuentes de información al alcance, para finalmente aplicar modelos de dinámica de aludes que nos han permitido aproximar la trayectoria del alud. Se ha conseguido así estimar las dimensiones del evento: la extensión de la zona de salida en la cuenca del barranco de Monars, la cantidad de nieve incorporada y el recorrido de la nieve hasta su detención. Estos trabajos se detallan de forma más extensa en Muntán y Oller, 2019 y Oller *et al.*, 2020.



## La cuenca del barranco de Monars

Antes de 1803, el emplazamiento de Àrreu estaba 450 m hacia el oeste de su posición actual, en el sitio que hoy en día se denomina Bordes d'Àrreu. Por este valle discurre el río de Àrreu que desciende hasta el río Noguera Pallaresa en el valle principal. El barranco de Monars tiene una cuenca extensa y una garganta angosta a 1650 m antes de desembocar en el río Àrreu a 1400 m de altitud. La máxima altitud en la cresta de Monars es el pico la Plana, de 2493 m, mientras que el valle principal se encuentra a 1100 m de altitud.

El clima del área es de transición entre el oceánico húmedo, al norte, y el continental más seco, hacia el sur, siendo relativamente frecuentes los episodios de aludes mayores (MAE) (Oller *et al.*, 2015).

En la cuenca del barranco de Monars está cartografiada una única zona de aludes, ARR010 (según la Base de Datos de Aludes del Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya, BDAC – ICGC) (Oller *et al.*, 2005) (Figura 1). La máxima altitud de esta zona de aludes es 2450 m y el viejo Àrreu está situado a 1325 m, constituyendo un desnivel de 1125 m. La zona de salida, en orientación este y sudeste básicamente, se puede dividir en dos (Figura 2): la subzona principal, situada al norte, más homogénea y amplia (A, 31 ha) y la otra, al sur, más irregular y pendiente (B, 5.7 ha).



**Figura 2.** Zonas de salida de la zona de aludes de Monars. A: zona de salida principal, cuya zona central es la más activa, cargándose de nieve transportada por vientos dominantes de norte y noroeste (flechas azules); B: zona de salida secundaria, más pendiente y también activa, pero más pequeña. Foto: Sara Orgué.

## El viejo pueblo de Àrreu

Hoy en día, el viejo pueblo de Àrreu es un conjunto de ruinas. Se pueden contar aún los restos de unos 9 edificios (Figura 3a). Una mirada de cerca permite descubrir que, en su origen, se trataba de casas y no de bordas (el aspecto de las fachadas, un arco en la entrada, etc.) (Figura 3b). Después de 1803, estos edi-



**Figura 3.** (a) Ruinas del viejo Àrreu, conocido hoy día como Bordes d'Àrreu; (b) algunas características arquitectónicas como este arco de puerta revelan que las ruinas del viejo Àrreu habían sido casas antes de ser usadas como bordas.



**Figura 4.** Àrreu nuevo, abandonado hasta hace poco (denominado Àrreu en el mapa oficial, Figura 1).

ficios fueron reconstruidos y utilizados para guardar el ganado, y entonces el sitio fue rebautizado como Bordes d'Àrreu, mientras que los habitantes construyeron un nuevo pueblo 450 m hacia el este (Figura 4). Hacia el sur de las Bordes d'Àrreu, al otro lado del río Àrreu está la ermita de la Mare de Déu de les Neus.

## Metodología aplicada

La única información sobre el alud de 1803 al inicio del proyecto de investigación era que el pueblo de Àrreu había sido destruido y que habían muerto 17 personas, viéndose los supervivientes forzados a trasladarse a un sitio más seguro.

Para conocer la dinámica de aludes en la cuenca del Monars y poder reconstruir el evento, se utilizaron los procedimientos habituales en el análisis espacial del peligro de aludes. Se trata de métodos y fuentes de información que se complementan entre sí: identificación de indicios en la vegetación, recopilación de información histórica y de testigos, análisis dendrogeomorfológico y análisis de imágenes aéreas, así como uso de modelos digitales del terreno (MDT) y mapas derivados. Como complemento final, se emplearon modelos de simulación, tanto dinámicos como estadísticos, para tratar de determinar la trayectoria y el alcance del alud y estimar su energía.

La obtención de datos y muestras dendrocronológicas, así como las entrevistas a personas de los pueblos cercanos, se realizaron en otoño de 2015 y verano de 2019. En la búsqueda de información histórica fue de gran ayuda la colaboración del Consell Cultural de les Valls d'Àneu.

## Análisis dendrogeomorfológico

Los árboles pueden verse afectados por diferentes procesos (biológicos, geomorfológicos, etc.) que alteran su crecimiento. Estas perturbaciones quedan registradas en los anillos de crecimiento y pueden, además, favorecer el desarrollo de formas características. Puesto que las respuestas a diferentes perturbaciones pueden ser iguales, un paso previo para determinar si la causa ha sido un alud de nieve consiste en inspeccionar el terreno para descartar otros orígenes. Una propor-

# Reconstrucción del alud histórico que destruyó el pueblo de Àrreu en 1803

ción elevada de señales de perturbación en un determinado año (anillo de crecimiento) y una distribución espacial compatible con la trayectoria de un alud son los criterios principales que se emplean para decidir si la causa ha sido, efectivamente, un alud.

En la zona de aludes del barranco de Monars se seleccionaron árboles con diferentes morfologías causadas, muy probablemente, por aludes de nieve (árboles inclinados o curvados y árboles con heridas). Estas perturbaciones producen señales concretas en los anillos de crecimiento y se pueden datar con la precisión de un año. De estos árboles se obtuvieron muestras del tronco, se dataron usando los métodos habituales en dendrocronología (Stokes y Smiley, 1968) y posteriormente, se analizaron siguiendo procedimientos de análisis dendrogeomorfológico (Stoffel y Bollschweiler, 2010).

## Modelización de aludes

Para reconstruir el evento de 1803, aplicamos diferentes aproximaciones de modelización. La evolución espacio-temporal del flujo de la avalancha se calculó mediante un proceso basado en una aproximación de modelización dinámica. El alcance obtenido fue luego comparado con una aproximación de modelización topográfico-estadística basada en una base de datos de eventos de aludes.

La modelización dinámica proporciona información de velocidad, altura de flujo, presión de impacto y, finalmente, las distancias de alcance resultantes. Se tienen que estimar diferentes parámetros de entrada como espesor de la nieve de partida y tamaño de la zona de salida, y la fricción en la base de la nieve en movimiento. En el presente estudio usamos el modelo de fricción SAMOS-AT (versión 2017\_07\_05), desarrollado por el Servicio Austríaco para el Control de Avalanchas y Torrentes (WLV). Este modelo describe dos tipos de capas del alud: la de avalancha de flujo denso (DFA) y la de avalancha de nieve polvo (PSA), así como la interacción entre ambas.

Los modelos estadísticos determinan el alcance a partir del perfil topográfico de la zona de alud. En este caso, aplicamos el modelo de regresión  $\alpha$ - $\beta$  (Lied y Bakkehoi, 1980), donde  $\alpha$  representa el ángulo de la línea que une la cota más elevada de la zona de salida de una zona de aludes con el alcance máximo de la avalancha (el punto  $\alpha$ ) y  $\beta$  es el ángulo de la línea que une la cota más elevada de la zona de aludes con el punto donde la pendiente del perfil topográfico del terreno alcanza los  $10^\circ$  (punto  $\beta$ ). Para el Pirineo Catalán, Furdada y Vilaplana (1998) obtuvieron diferentes ecuaciones a partir del análisis de regresión de 216 aludes de la parte occidental con un período de retorno estimado de más de 30 años. Nosotros aplicamos la ecuación general donde  $\alpha = 0.97\beta - 1.2^\circ$ ;  $R^2 = 0.87$ ;  $SD = 1.74^\circ$ ;  $N = 216$  ( $R^2$ , coeficiente de determinación de Pearson;  $SD$ , desviación estándar;  $N$ , Número de aludes usado en el análisis).

## Resultados

### Testigos de los aludes del pasado

En el verano de 2019 tuvimos la oportunidad de entrevistar a tres personas mayores relacionadas con Àrreu y ello añadió información crucial para entender el evento de 1803. Se trató

de testigos visuales de aludes caídos en la cuenca de Monars, dos personas del vecino pueblo de Borén, y una señora nacida en Àrreu (Àrreu nuevo) en 1932, propietaria de los prados de “casa Nadal”, ubicados en “Prats des Bordes” (Figura 1) en la zona de remonte de la avalancha. A partir de las conversaciones, pudimos obtener información de aludes de los años 1930, 1950 y 1972, cuyos límites en la zona de llegada se han representado en la figura 1. En todos estos casos, los aludes cruzaron el río de Àrreu y remontaron los prados que, como consecuencia, quedaron cubiertos de ramas transportadas y sedimentos, y hubo mucho trabajo para retirar los escombros. Según estos testigos, los habitantes del pueblo creían que la situación peligrosa ocurría cuando caía un primer alud y cubría de nieve el río de Àrreu y así el siguiente tenía las condiciones necesarias para alcanzar el viejo Àrreu. A pesar de que ninguno de ellos había observado este escenario, quedaba claro que la idea había sido transmitida por las generaciones anteriores. En relación con el régimen de flujo, ninguno de los testigos había visto la caída de la avalancha, por lo tanto, no había información sobre sus características dinámicas. Solo habían observado el depósito de nieve y los derrubios transportados por la avalancha algunos días después de su descenso. Otra información interesante aportada fue que los aludes solían desprenderse desde las laderas sur de la arista norte del pic de la Plana (parte central de la zona de salida A; Figuras 1 y 2).

### Características de la zona de aludes de Monars

Enseguida se comprobó que no habría árboles de edad suficiente como para haber registrado el acontecimiento de 1803. Los árboles son relativamente jóvenes y la mayoría tienen menos de 60 años. Abunda el abedul (*Betula pendula* Roth), hay algunas manchas de pino negro (*Pinus uncinata* Ramond ex DC. in Lam. et DC.), los más viejos en las crestas, y alrededor de los prados y campos en la mitad inferior, crecen fresnos (*Fraxinus excelsior* L.).

A partir de la inspección de la vegetación, se comprobó una actividad de aludes frecuente en la parte alta del barranco de Monars, siguiendo la línea del talweg y llegando justo hasta el inicio de la garganta a 1600 m de altitud. Más abajo, las señales de aludes no eran tan abundantes ni tan recientes. Por debajo de la intersección entre el barranco de Monars y el río de Àrreu, aún se detectaban indicios, pero solamente en unos pocos árboles de las orillas.

De acuerdo con el número de árboles con señales y su distribución espacial, consideramos que se habían producido aludes durante los siguientes inviernos: 1971–72, 1977–78, 1995–96, 2002–03 y 2013–14 (Figura 5).

Los inviernos con una proporción más elevada de árboles con señales fueron 1971–72 y 1995–96 (cercana al 40 % de los árboles muestreados), mientras que los inviernos de 1977–78, 2002–03 y 2013–14 mostraron valores inferiores, pero suficientes como para tenerlos en consideración (19 %, 14 %, 14 %, respectivamente) como se explica en Muntán *et al.* (2009). En el caso de los acontecimientos más recientes de 2002–03 y 2013–14 se ha podido comprobar que fueron aludes, pero en el caso de 1977–78 no existe una certeza absoluta. Los aludes de las temporadas nivológicas 1971–72 y 1995–

96, cuya proporción se acerca al 40 % se pueden considerar aludes mayores (Butler y Sawyer, 2008).

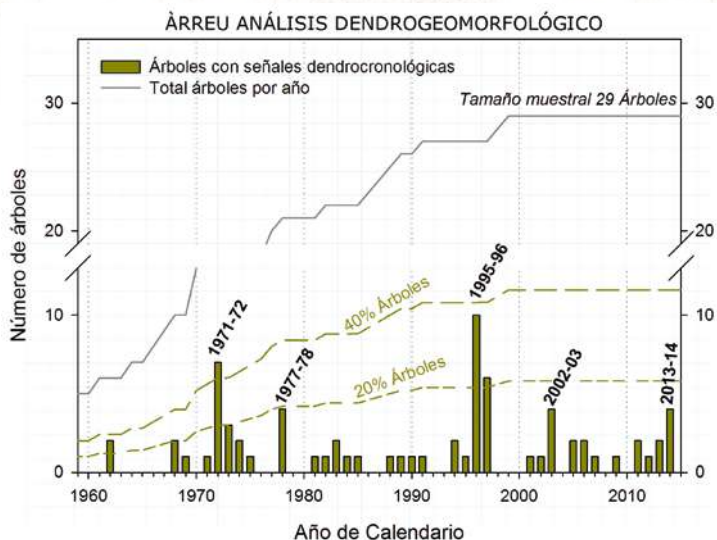


Figura 5. Resultado del análisis dendrogeomorfológico. Las barras verticales representan el número de árboles con señales por año. Se destacan las que corresponden muy probablemente a aludes de nieve en los inviernos indicados. Las líneas simbolizan el número total de árboles muestreados por año (en gris), 20 % y 40 % del total de árboles (líneas discontinuas en verde). Modificado de Oller *et al.*, 2020.

A partir de los resultados dendrogeomorfológicos, se hizo una estimación de la frecuencia de avalanchas en diferentes secciones altitudinales de la zona de trayecto de la zona de aludes. La frecuencia más elevada, con una periodicidad de 5 o 6 años, se detectó en el tramo muestreado a mayor altitud, entre 1800 y 1650 m. Se evidenció que la mayoría de aludes se detienen en el límite superior de la garganta. Ejemplos de estas avalanchas son los ocurridos en 2002-03 y 2013-14 (Figura 6). El acontecimiento de 1995-96 (identificado por dendrogeomorfología y por fotointerpretación) y los de los años 1930 y 1950 (a partir de entrevistas a testigos), cuya zona de llegada se sitúa unos metros más abajo del río de Àrreu, se estimó que tienen un periodo de retorno del orden de 30 años (que simbolizamos: T30). El alud de 1972 que remontó e invadió los prados por encima del antiguo pueblo de Àrreu, datado por dendrogeomorfología y confirmado por testigos presenciales, se estimó que tiene un periodo de retorno del orden de 100 años (T100).

### Las zonas de salida de aludes de la cuenca de Monars

Para definir las zonas de salida, se emplearon métodos indirectos como el análisis del estado del bosque, la pendiente y la configuración del terreno, y así estimar su extensión y grado de actividad.

A partir de la comparación de imágenes aéreas (de 1946 hasta el presente) y de la inspección sobre el terreno se comprobaron cambios en la cubierta vegetal que se cartografiaron y clasificaron de la siguiente manera: bosque persistente (PF), áreas donde el bosque no ha cambiado durante este período; bosque de regeneración (RF), áreas donde se ha regenerado después de una perturbación; bosque dañado (DaF), áreas donde una gran proporción de árboles muestran formas causadas por las avalanchas (troncos inclinados, cicatrices, ramas rotas, etc.); y bosque devastado (DeF), áreas donde los árboles han sido arrancados o se mantienen vivos pero en posición horizontal. La figura 7 muestra la síntesis de este trabajo. Las variaciones principales de los límites del bosque (*trim-lines*) se observan en las imágenes tomadas después de los eventos de 1971-72 (imagen de 1991), 1995-96 (imagen de 1997), y 2013-14 (imagen de 2014).

Con este análisis se dedujeron las zonas más activas (causantes de los aludes más frecuentes de pequeño tamaño) y las que se activaban con menor frecuencia, pero de mayores dimensiones.

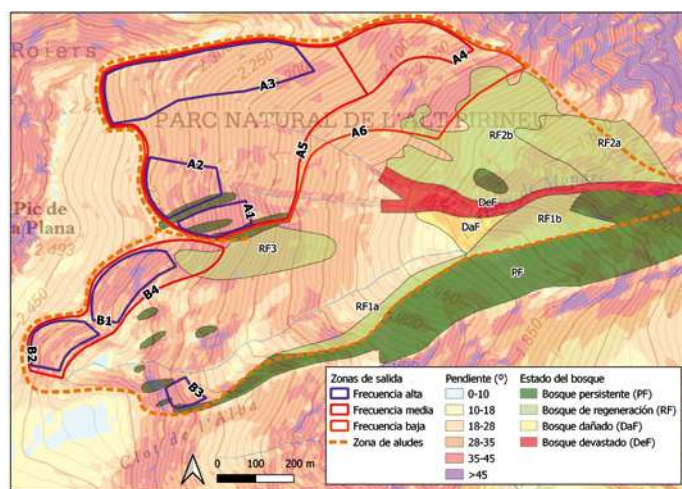


Figura 7. Zonas de salida de la zona de aludes de Monars (según Oller *et al.*, 2020), deducidas a partir de cambios en la cubierta forestal, análisis dendrogeomorfológico, observaciones de testigos y características del terreno.

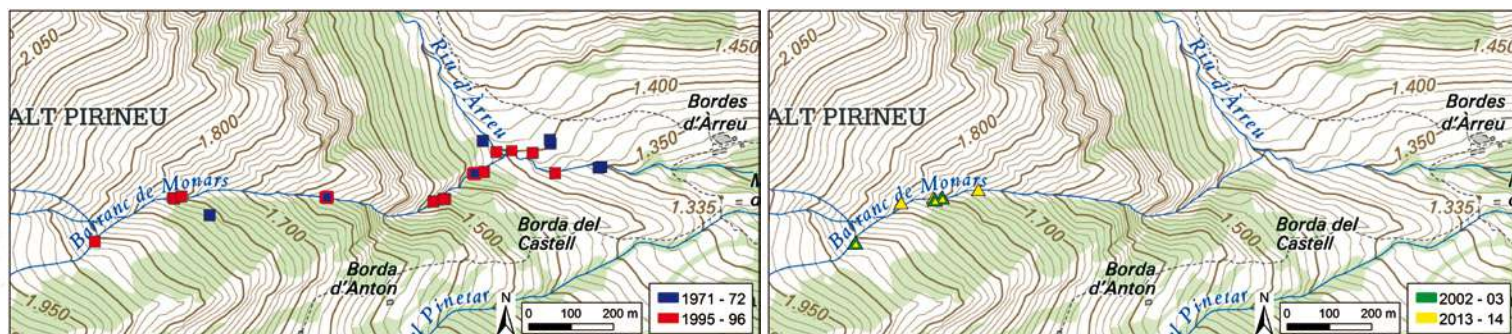


Figura 6. Extensión de los aludes identificados por dendrogeomorfología. Derecha: aludes de alta frecuencia en 2002-03 y 2013-14 que se detienen por encima de la garganta de Monars (1650 msnm). Izquierda: aludes de menor frecuencia en 1995-96 y 1971-72, con zonas de llegada mayores, pero ligeramente diferentes entre sí (Los símbolos indican la posición de árboles con señales dendrocronológicas en los años concretos). Figura modificada de Oller *et al.*, 2020.

# Reconstrucción del alud histórico que destruyó el pueblo de Àrreu en 1803

## Modelización de la avalancha de 1803

Nuestro primer escenario para reconstruir el evento catastrófico de 1803 mediante simulación con SAMOS-AT se basó en la hipótesis de que eran necesarias dos avalanchas sucesivas para alcanzar las Bordas de Àrreu, según las personas entrevistadas.

Como condiciones iniciales, en la zona de salida consideramos diferentes dimensiones y variamos el espesor de nieve. Para avalanchas de alta frecuencia (alrededor de T30), se consideraron las áreas de salida de alta frecuencia de la Figura 7 (A1, A2, A3, B1, B2). Para aludes de frecuencia media, se consideraron zonas de salida de frecuencia media (A4, A5, B4). Para avalanchas de frecuencia más baja, toda la extensión de la zona de salida A (A6) y B4.

Aplicamos la aproximación de cálculo de espesor de desencadenamiento desarrollado por Salm *et al.* (1990), que ha sido utilizada para cartografía de peligrosidad en Suiza y está bien establecida (Bühler *et al.*, 2018). La estimación del espesor de nieve de desencadenamiento se basó en el máximo incremento de espesor de nieve en tres días ( $\Delta HS(3)$ ), medido en estaciones nivometeorológicas automáticas o manuales. Los datos se obtuvieron de la estación nivometeorológica, Bonaigua, perteneciente a la red XEMA del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC). Se consideró un incremento en tres días para los periodos de retorno de referencia (T30: 113 cm; T100: 132 cm; T300: 149 cm), así como las correcciones de altura y acumulación por viento.

Para reproducir el escenario de dos aludes sucesivos, se simuló una primera avalancha similar al evento de 1996, a partir de reducir progresivamente las zonas de salida de alta frecuencia y los espesores de salida, manteniendo todos los otros parámetros de simulación constantes. La simulación rellenó el lecho del río de Àrreu a lo largo de unos 150 m, suavizando el talweg del río, tal como ocurrió en el evento de 1996.

El segundo evento fue simulado variando los espesores y el tamaño de las zonas de salida. La segunda avalancha alcanzó el viejo Àrreu cuando el volumen se incrementó hasta  $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Ello requirió considerar toda la extensión de ambas zonas de salida y un espesor de nieve correspondiente a un periodo de retorno de 30 años. Con este tamaño, la avalancha habría alcanzado el viejo Àrreu después de remontar la ladera opuesta del río de Àrreu, desviándose hacia el este, y fluyendo hacia el pequeño pueblo. En este punto, la presión dinámica sería de alrededor 150 kPa, más que suficiente para causar el daño documentado en la literatura. La avalancha no solo habría alcanzado el pueblo, sino que habría continuado siguiendo el río de Àrreu hasta el río Noguera Pallaresa a 1115 m s.n.m., alrededor de 1 km hacia el este. De acuerdo con los resultados de esta simulación, una altura de flujo substancial habría generado un depósito considerable en el río Noguera Pallaresa, y tal vez, lo habría bloqueado. Este fenómeno nunca había sido descrito antes, y si ocurrió en el evento de 1803, no se ha repetido probablemente desde entonces; de lo contrario, habría sido recordado por los habitantes del valle.

Se realizaron también varias simulaciones PSA, pero no fue hasta que se aplicaron las mismas condiciones de tamaño que la simulación DFA ( $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) que la nieve alcanzó el viejo Àrreu con suficiente energía. En este caso, los valores pico de la presión en el lado oeste del pueblo serían de 17 kPa. En este escenario, la avalancha habría podido causar el daño reportado debido, muy

probablemente, a la capa fluidificada del PSA, que tiene una mayor capacidad de remontar laderas y podría alcanzar estos valores de presión. La nube de polvo (capa de suspensión) de la avalancha habría afectado una amplia área próxima al río de Àrreu, e incluso el emplazamiento de Àrreu nuevo, alcanzando el río Noguera Pallaresa, aunque con valores de presión bajos ( $< 3 \text{ kPa}$ ). El extraordinario alcance de la simulación hasta el río Noguera Pallaresa nos hizo dudar del resultado. Para verificarlo, aplicamos el modelo estadístico  $\alpha\text{-}\beta$ , que se obtiene a partir de regresión con datos de los eventos conocidos en la zona de aludes. Los resultados indican que, con una baja probabilidad, la avalancha podría alcanzar el valle principal, confirmando el resultado de la modelización dinámica.

## Discusión y conclusiones

Mediante simulaciones con el modelo SAMOS-AT se reprodujo el escenario de dos aludes sucesivos. El resultado fue que solamente cuando consideramos un gran volumen de nieve, el alud llegaba hasta el antiguo pueblo de Àrreu. Sin embargo, con un volumen tal, el alud hubiese llegado igualmente hasta el pueblo sin la ayuda de un alud previo menor. Por lo tanto, el escenario más plausible, de acuerdo con las simulaciones, habría sido el de una avalancha de grandes dimensiones (con o sin un alud previo), en la cual la totalidad de la zona de salida se hubiese activado, incorporando un volumen de nieve superior a  $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Este habría sido un alud descomunal. Con semejante tamaño, el alud hubiese alcanzado el viejo Àrreu con una presión dinámica de 150 kPa, suficiente para causar la destrucción de la población entera. La extensión total de la zona de salida, de unas 37 ha, constituiría el volumen de una avalancha de nivel destructivo 5. Habría sido similar al ocurrido en Arinsal, Andorra, en febrero de 1996. En los Pirineos, los aludes de nieve de este orden de magnitud son muy raros. En el alud catastrófico de Arinsal, las mediciones posteriores estimaron un volumen de entre  $0.8 \times 10^6$  y  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Furdada *et al.*, 2020). En dicha ocasión, el tamaño de la zona de salida fue de 50 ha. Una avalancha tan enorme iría acompañada por una nube de polvo considerablemente grande, como en el evento de Arinsal.

Como se ha dicho, las presiones obtenidas en las simulaciones DFA, 150 kPa, habrían destruido el pueblo completamente. En cambio, las presiones de la simulación de PSA para un tamaño equivalente (17 kPa) habrían dañado seriamente las casas y destruido algunas de ellas, pero no el pueblo entero. Una presión dinámica superior a 10 kPa causa considerable daño en paredes de mampostería, lo cual corresponde a la destrucción relatada por Madoz (1845) en el viejo Àrreu. Las casas fueron reconstruidas después de la catástrofe, muy probablemente porque no fueron destruidas completamente. Por lo tanto, un PSA habría sido el tipo de flujo más verosímil que pudo haber afectado el pueblo de Àrreu, con un DFA que habría impactado solo en una parte de éste (Figura 8).

Aparte de la avalancha de 1803, el mayor evento conocido tuvo lugar en 1972, para el cual estimamos un periodo de retorno de 30–100 años. Consecuentemente, asignamos un periodo de retorno mayor de 100 años a la avalancha de 1803. Quisiéramos enfatizar que, de acuerdo con las simulaciones, esta avalancha excepcional, fuera una DFA o una PSA, habría llega-

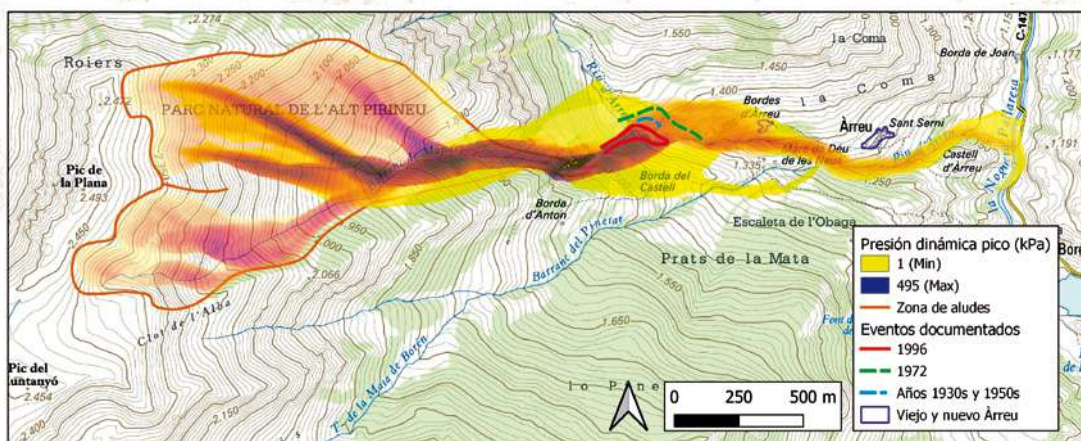


Figura 8. Escenario más plausible del alud que destruyó el pueblo de Àrreu: movilización de toda la zona potencial de salida con un volumen del orden de  $0,6 \times 10^5$  m<sup>3</sup> de nieve. Parte del flujo tiene un comportamiento de nieve densa (DFA; colores anaranjados y violeta) y parte, un comportamiento de nieve polvo (PSA; color amarillo). Simulaciones realizadas con SAMOS-AT. Modificado de Oller *et al.*, 2020.

do hasta el río Noguera Pallaresa, más de 1 km más lejos que la de 1972. Ello es ciertamente un caso raro, y no existen testigos, documentación histórica o evidencias para verificarlo. Si bien la probabilidad es muy baja, de acuerdo con los resultados de las aproximaciones de las modelizaciones dinámica y estadística, consideramos que es plausible. Las simulaciones refuerzan la hipótesis de que el largo alcance que habría tenido el alud en 1803 se deba a la componente de polvo, que está a menudo asociado con el flujo fluidificado de una avalancha.

Para acabar, existen factores históricos que dan pie a reflexionar sobre la excepcionalidad del evento de 1803. De acuerdo con Bolós y Hurtado (2012), el nombre del antiguo pueblo de Àrreu tiene más de 1000 años y además, la ermita de la Mare de Déu de les Neus está datada en el siglo XII (Rella, 1993). Esta pequeña ermita se construyó en una ubicación naturalmente protegida. De hecho, en las simulaciones practicadas, está situada en el punto más resguardado en relación a la trayectoria de los aludes y el flujo no invade este trozo de terreno en ningún caso (Figura 8). Este hecho nos permite especular que la capilla podría haberse construido para obtener protección divina después de un alud mucho más antiguo. En este hipotético caso, pensamos que el antiguo

pueblo de Àrreu, en su posición original, no habría sido destruido del todo en esa ocasión (a diferencia de lo sucedido en 1803), puesto que, con bastante probabilidad, sus habitantes se habrían trasladado antes a un sitio más seguro. Esto significaría que el periodo de retorno del alud de 1803 sería superior a los 300 años, periodo de retorno de referencia utilizado en algunos países en la cartografía de zonificación de la peligrosidad para la planificación urbanística. En la cartografía de peligrosidad, las áreas afectadas por aludes de un periodo de retorno superior a 100 o 300 años son motivo de controversia y de discusión recurrente, puesto que a pesar de denominarse *avalancha excepcional* en Francia o *riesgo residual* en Suiza, cuando finalmente tienen lugar, el nivel de daños y destrucción es masivo.

Este trabajo pone de relieve la importancia de usar diferentes disciplinas para obtener un conocimiento lo más exhaustivo posible de la dinámica de avalanchas en una zona de aludes determinada, como metodología para encontrar y reconstruir esas avalanchas de periodo de retorno extraordinario que podrían permanecer no detectadas de otra manera. A menudo esta metodología – bien establecida en el análisis de la peligrosidad de aludes – se simplifica en exceso en la práctica.

## Referencias

- Bolós, J., Hurtado, V. 2012: *Atlas dels Comtats de Pallars i Ribagorça* (v. 806–v.998), Rafael Dalmau Editor: Barcelona, Spain, 165p.
- Bühler, Y., von Rickenbach, D., Stoffel, A., Margreth, S., Stoffel, L., Christen, M. 2018: Automated snow avalanche release area delineation—Validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 3235–3251.
- Butler, D.R., Sawyer, C.F. 2008: Dendrogeomorphology and high-magnitude snow avalanches: A review and case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 303–309.
- De Zamora, F. 1997: *Respostes de la Vall d'Àneu als Qüestionaris de Francisco de Zamora (1709)*. Padilla, J.I. Ed, Garsineu Edicions: Tremp, Spain.
- Furdada, G., Margalef, A., Trapero, L., Pons, M., Areny, F., Baró, M., Reyes, A., Guinau, M., 2020: The Avalanche of Les Fonts d'Arinsal (Andorra): An example of a Pure Powder, Dry Snow Avalanche. *Geosciences*, 10, 126.
- Furdada, G., Vilaplana, J.M. 1998: Statistical prediction of maximum avalanche run-out distances from topographic data in the western Catalan Pyrenees (northeast Spain). *Ann. Glaciol.*, 26, 285–288.
- Lied, K., Bakkehøi, S. 1980: Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. *J. Glaciol.*, 26, 165–178.
- Madoz, P. 1845: *Diccionario geográfico, estadístico e histórico de España y sus posesiones de ultramar*. <http://www.bibliotecavirtualdeandalucia.es/catalogo/es/consulta/registro.cmd?id=6353>
- Muntán, E., García, C., Oller, P., Martí, G., García, A., Gutiérrez, E. 2009: Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrenees. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1599–1612.
- Muntán, E., Oller, P. 2019: Historic snow avalanches in the Pyrenees: The destruction of the small village of Àrreu (Pallars Sobirà). *Z. Wildbach Lawinen Eros. Steinschlagschutz*, 183, 152–161.
- Oller, P., Fischer, J.-T., Muntán, E. 2020: The Historic Avalanche that Destroyed the Village of Àrreu in 1803, Catalan Pyrenees. *Geosciences*, 10, 169.
- Oller, P., Marturià, J., González, J.C., Escriu, J., Martínez, P. El servidor de datos de aludes de Cataluña, una herramienta de ayuda a la planificación territorial. En *Actas del VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, Valencia, Spain, 21–24 June 2005, pp. 905–916.
- Oller, P., Muntán, E., García-Sellés, C., Furdada, G., Baeza, C., Angulo, C. 2015: Characterizing major avalanche episodes in space and time in the twentieth and early twenty-first centuries in the Catalan Pyrenees. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 110, 129–148.
- Rella, F. 1993: *Les Valls d'Àneu*, Edicions El Mèdol: Tarragona, Spain, 391pp.
- Salm, B., Burkard, A., Gubler, H. 1990: Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen, Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF: Davos, Switzerland.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. 2008: Tree-ring analysis in natural hazards research—An overview. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 187–202.
- Stokes, M.A., Smiley, T.L., 1968: *An Introduction to Tree-Ring Dating*, University of Chicago Press: Chicago, IL, USA, 73p.