

EXPERIENCIA DE LA APLICACIÓN DE RAMMS PARA LA MODELIZACIÓN DE FLUJO TRAS LA APLICACIÓN DE LAS SOLUCIONES FLEXIBLES VX EN EL BARRANC DE PORTAINÉ

**Carles RAÏMAT¹, Elisabeth RIERA¹, Christoph GRAF⁴, Roberto LUIS-FONSECA¹,
Carles FAÑANAS AGUILERA², Marcel HÜRLIMANN³.**

¹ Geobrugg Ibérica S.A

² Departament de Medi Ambient GENCAT

³ Universitat Politècnica de Catalunya

⁴ WSL Swiss Federal Research Institute, CH-8903 Birmensdorf – christoph.graf@wsl.ch

RESUMEN

Los torrentes de alta montaña en los Pirineos son habituales generadores de flujos hiper concentrados y corrientes des derrubios. Esta dinámica natural tiene especial relevancia en los últimos años en el Barranc de Portainé (Comarca del Pallars Sobirà,, Lleida, España).

Tras los eventos registrados de los años 1982, 2006 y 2008 que generaron importantes inconvenientes y desperfectos en accesos y servicios de la zona, se invirtieron sustanciales cantidades de dinero para el restablecimiento de la normalidad mediante la construcción de importantes infraestructuras de drenaje de la carretera, así como consolidaciones de terraplenes y correcciones hidrográficas en forma de diques flexibles VX. En Julio del 2010 la actividad torrencial del barranco hizo nuevamente muestra de presencia removilizando aproximadamente 30.000 m³ de material y afectando en diferente medida las infraestructuras recién construidas.

RAMMS (Rapid Mass Movements) es un modelo numérico basado en ecuaciones mecánicas de continuo bidimensional que se resuelven para el esquema reológico propuesto por Voellmy. La herramienta desarrollada por el Instituto Federal Suizo de Investigación (WSL/SLF) pretende ofrecer una predicción precisa de alturas de flujo, velocidades y presiones para trayectorias y distancias de recorrido para flujos del tipo corrientes de derrubios sobre la base de un modelo digital del terreno.

Tras 4 años desde el inicio de las obras y 1 año de la finalización de estas se han observado desperfectos en las infraestructuras construidas con las crecidas ocurridas a

considerar para futuras correcciones similares. En este caso se ha utilizado el software RAMMS para modelizar el efecto de un nuevo evento sobre las infraestructuras existentes, en las condiciones actuales, considerando la altura de flujo, energía y presión de impacto generado por un evento igual y superior al ocurrido en Julio de 2010.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del Barranco de Portainé tiene como cota máxima la del Pico del Orri, que culmina a 2439m de altura, mientras desemboca en el barranco de Romadriu, a una cota de 950m, superando el desnivel de casi 1500m en unos 5,7km que representa una pendiente media del 16°, con puntos en los que se alcanzan los 26°. Se trata de una cuenca cubierta por pastos en su parte más alta por encima de los 2100m y densamente poblada por vegetación arbórea y arbustiva autóctona en el resto. Geológicamente está formada por materiales metamórficos, cuarcitas y pizarras en general, con una fragmentación muy importante que propicia el desarrollo de una cubierta métrica de materiales de pie de ladera que buzan a favor de la pendiente. Los episodios de precipitaciones torrenciales en la zona Pirenaica se producen periódicamente asociados por lo general a un régimen tormentoso estacional de evolución muy localizada, aunque no se tiene un registro claro como consecuencia de la escasa red de estaciones meteorológicas en la zona. Sus efectos generan importantes desperfectos, y las correspondientes tareas de reparación y mantenimiento. El origen de las corrientes de derrubios se atribuye por lo general a combinaciones de intensidad y duración de la precipitación y pendiente de la cuenca y cauce (Fig.1A y 1B), aunque la construcción de infraestructuras con movimientos de tierra no consolidados puede ser uno de los elementos desencadenantes.

En el caso de Portainé los datos de los que se dispone son de precipitaciones para el evento del 2008 de 60 mm en menos de 40 minutos. Precipitación que se asume de periodo de retorno (T) próximo a 20 años y tiempo de concentración inferior a 20 minutos.

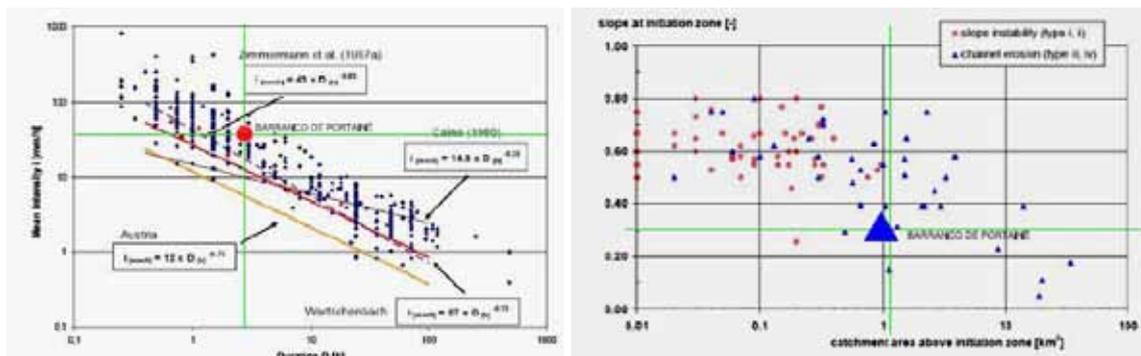


Figura 1A: Umbral de lluvia crítica para causar corrientes de derrubios (Meyer et al. 2003) y plasmación del evento de Portainé del 2008. Figura 1B: Pendiente versus área contributiva aguas arriba del punto de formación de corrientes de derrubios (Meyer et al. 2003) y plasmación del evento de Portainé del 2008.

El barranco de Portainé ha sido el más activo de los Pirineos desde 1982 donde se estima por las incisiones medidas y simulaciones retrospectivas realizadas pudo desplazar más de 50.000m^3 . En el año 2008 destruyó la carretera de acceso a la Estación de Esquí y dañó de forma importante la Estación Hidroeléctrica situada en el Romadriu movilizándolo más de 20.000m^3 .



Figura 2: A la izquierda fotografía del surco-canal de 30m^2 aproximadamente y *levee* de $1.5\text{-}3.5\text{ m}^2$ producto del evento de 2008 en comparación con restos de la *levee* del evento de 1982 (derecha).

En este Barranco se proyectaron en el año 2009 once protecciones del tipo VX para evitar futuros daños potenciales, como los generados en 2008. En invierno-primavera de 2010 se instalaron 9 protecciones del tipo VX de las 11 proyectadas (Fig. 3 y Tabla 1). El objetivo básico era el de retener progresivamente el material aportado por los potenciales eventos, conformando una corrección hidrológica a medio plazo. Estaba condicionada la actuación a la mínima incidencia medioambiental como por ejemplo la no apertura de vías de acceso, así como era requisito del cliente mantener la dinámica fluvial propia de un torrente de alta montaña y ser de utilidad exclusivamente para eventos catastróficos.

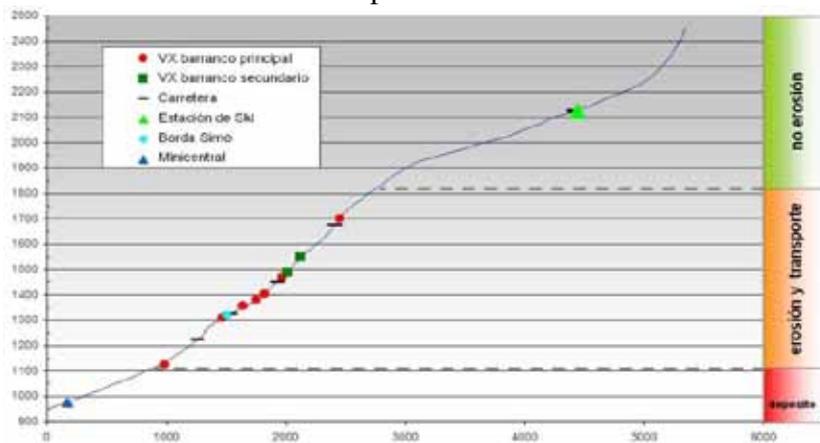


Figura 3: Perfil general del barranco de Portainé y medidas de intercepción de flujo existentes diseñadas e instaladas a partir de la interpretación de la corriente de derrubios de 2008.

Cota (msnm)	Barrera	Tipo	Altura (m)	Ancho (m)
1.470 m	G-1	VX-160	5	20,0 – 9,0
1.490 m	G-2	VX-160	4	27,0 - 13,0
1.550 m	G-2	VX-160	4	26,0 – 10,0
1.700 m	G-1	VX-160	6	19,5 – 7,5
1.405 m	G-1	VX-160	4	13,5 – 5,0
1.380 m	G-1	VX-160	5	11,5 – 5,0
1.355 m	G-1	VX-160	5	13,5 – 5,0
1.308 m	G-1	VX-160	4	16,8 – 6,6
1.125 m	G-1	VX-160	4	13,5 – 5,0

Tabla 1: Descripción del emplazamiento y tipo de las soluciones VX instaladas.

El día 22 de Julio del año 2010 la entrada de aire frío en altura desde el norte y aire caliente empujado desde el Este es pronosticada por los servicios meteorológicos como una jornada de evolución inestable con potenciales lluvias muy localizadas de gran intensidad. Se trata pues del pronóstico de un episodio tormentoso de verano en la zona Pirenaica. Un episodio tormentoso de evolución, por la tarde que avanza de Oeste a Este alcanza el barranco de Erill a las 17:30 horas aproximadamente. A las 20:38 el sistema automático de alerta se activa y avisa vía GSM de un evento “*DEBRIS-FLOW*”. La misma tormenta alcanza en Portainé una hora más tarde (Fig. 4). Según testigos un impresionante evento cortó la carretera de acceso a la estación de esquí de Portainé a las 22:30. Solamente 3 meses después de la terminación de las obras para la instalación de las 9 protecciones del tipo VX nuevamente se movilizaron más de 25.000m³ (Fig. 5-6-7).

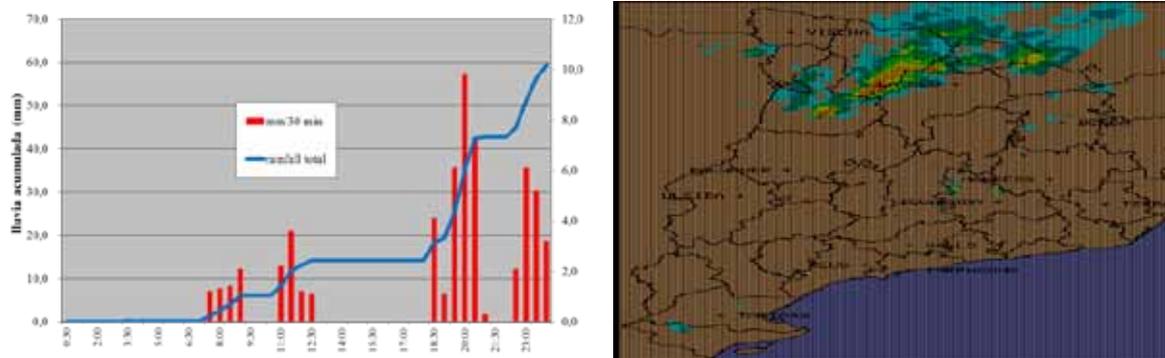


Figura 4A: Gráfica mostrando la precipitación instantánea y acumulada del día 22 de Julio de 2010. 4B: Imagen radar del mismo evento en Portainé



Figura 5: Imágenes de las protecciones VX-160 tras el evento de día 22 de Julio de 2010. (A) Vista general desde aguas abajo, (B) Detalle de los disipadores plásticos (*break rings*) situados en las cables superiores, (C) Detalle de la red de anillos Rocco©.



Figura 6: Fotografía “antes y después” de una de las protecciones VX-160 instaladas en el Barranco de Portainé.



Figura 7: Vista lateral y frontal de una de las protecciones VX-160 instaladas en el Barranco de Portainé tras el evento de 2010.

Con posterioridad a estos acontecimientos la comunidad científica nacional ha tomado mayor consciencia de esto tipo de fenómenos y con ello esta buscando nuevas herramientas para la modelización de esto tipo de eventos para poder dimensionar

infraestructuras acorde a las necesidades reales. En este sentido el *RAMMS (Rapid Mass Movements)*, un modelo numérico basado en ecuaciones mecánicas de continuo bidimensional que se resuelven para el esquema reológico propuesto por Voellmy, puede ofrecer una predicción precisa de alturas de flujo, velocidades y presiones para trayectorias y distancias de recorrido para flujos del tipo corrientes de derrubios sobre la base de un modelo digital del terreno.

2. METODOLOGÍA-PROCESO *RUNOUT*

Además de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de una corriente de derrubios, la determinación de su dinámica es una de las tareas más importantes durante la evaluación de los riesgos (Jakob, 2005). La distancia total de descentramiento, la zona afectada por el evento y la energía a lo largo de la ruta de flujo son la información necesaria para la asignación de riesgos y debe determinarse idealmente mediante un método dinámico.

Los métodos disponibles para el runout analysis pueden dividirse en tres tipos: simple empírico, analítico, trazado de flujo simple y numérico (Dai et al., 2002; Hungr et al., 2005; Rickenmann, 2005a). Además, estas técnicas pueden clasificarse sobre la dimensión del cálculo. Puede pues hacerse uso de la definición de la hidráulica y el término unidimensional (1D) para los cálculos a lo largo de un perfil topográfico previamente seleccionado. En contraste, métodos bidimensionales (2D) determinan la dinámica de flujo de escombros sobre un área generalmente representado por un modelo de elevación digital (DEM). El método de runout analysis seleccionado para la asignación de riesgos debe coincidir con tres condiciones: i) el método debe especificar una distribución espacial y los resultados deben cubrir el área de estudio completo, ii) el método aplicado debe ser capaz de incorporar diferentes volúmenes como datos de entrada y iii) la salida de los métodos debería permitir la determinación de la intensidad. Dado el grado de riesgo depende de la intensidad, los resultados también deben incluir información sobre la energía del impacto.

En este caso se ha usado RAMMS (Christen et al. 2010), para simular la propagación e intensidad de los debris flow en la cuenca de Portainé para distintos escenarios. Para ello previamente se ha calibrado el modelo a partir de reproducir los eventos recientes que puedan contrastarse fotográficamente. La simulación debiera permitir reproducir la extensión (área y espesor) de los eventos históricos y compararlo con los datos obtenidos de la mediación de campo.

RAMMS, emplea el modelo de fricción Voellmy-fluido. Este modelo divide la resistencia friccional en dos partes: una fricción de tipo Coulomb seco (coeficiente μ) que escala con la tensión normal y una velocidad al cuadrado (coeficiente ξ) de arrastre. La resistencia friccional S (Pa), a continuación, es:

$$S = \mu\rho Hg \cos\phi + \frac{\rho g U^2}{\xi}$$

donde ρ es la densidad de flujo, la aceleración gravitacional g , ϕ el ángulo de inclinación, H la altura del flujo y U la velocidad de flujo. Este modelo ha encontrado amplia aplicación en la simulación de movimientos de masas, especialmente avalanchas de nieve.

La metodología usada para este estudio ha sido:

- 1.- Calibración a partir de back-análisis del evento de 2008.
- 2.- Aplicación de los parámetros definidos en el evento de 2008 en el evento de 2010, considerando además la existencia de los Sistemas VX-160 interpuestos al flujo.
- 3.- Validación de las simulaciones a partir de los datos de campo tomados tras el evento.

3. CALIBRACIÓN A PARTIR DE BACK-ANÁLISIS

Con Voellmy uno puede controlar la velocidad de flujo (ξ parámetro) y la distancia de frenado (μ). El término turbulento domina el comportamiento de fricción cuando el flujo se mueve rápidamente y el término de Coulomb es dominante cuando el flujo se mueve lentamente, permitiendo que el modelo pueda calibrarse a partir de observaciones de la velocidad de flujo y la ubicación del punto de parada del frente de flujo. En este caso y a partir de la observación de campo realizada tras el evento de 2008 se ha procedido a buscar los parámetros (ξ parámetro) y (μ) el resultado de la aplicación de los cuales ofreciese unos datos iguales i similares a los observados en campo como altura de flujo, extensión y espesor del depósito. A la búsqueda de la combinación de parámetros (ξ) y (μ) más apropiadas se ha realizado la siguiente matriz de simulaciones sobre DEM de 5x5 metros de celda, para idénticos volúmenes y puntos de salida (Total 25.000 m³) a los que se detectaron tras el trabajo de campo de 2008, sobre la base de comparar la altura de flujo pues es el valor apreciable en trabajo de campo merced a la presencia del depósito de *levee* en buena parte del trazado:

COMBINATORIA		Parámetro (μ)				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Parámetro (ξ)	500	0.1-500	0.2-500	0.3-500	0.4-500	0.5-500
	1000	0.1-1000	0.2-1000	0.3-1000	0.4-1000	0.5-1000
	1500	0.1-1500	0.2-1500	0.3-1500	0.4-1500	0.5-1500
	2000	0.1-2000	0.2-2000	0.3-2000	0.4-2000	0.5-2000
	2500	0.1-2500	0.2-2500	0.3-2500	0.4-2500	0.5-2500

A modo de ejemplo se muestran las combinaciones extremas realizadas para evidenciar las diferencias entre las distintas simulaciones.

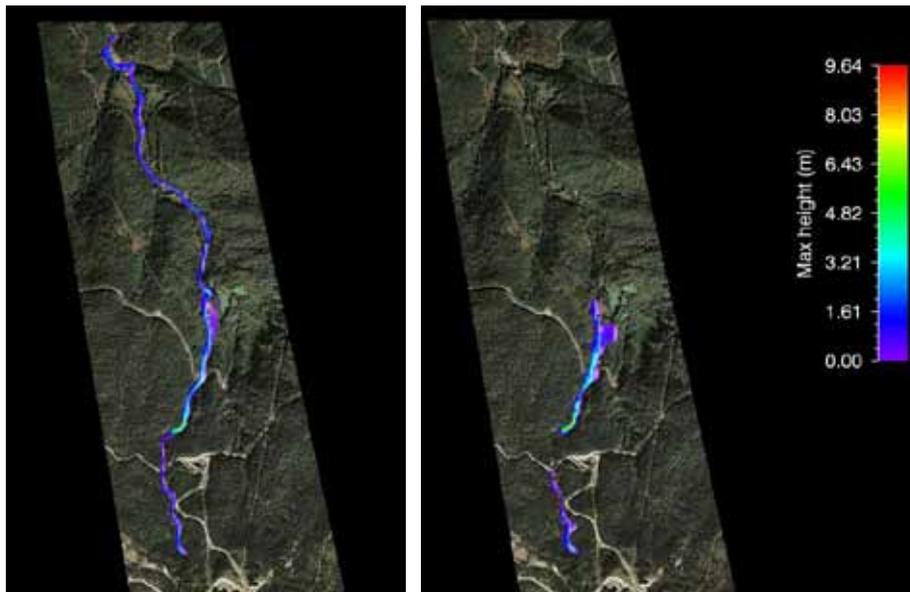


Figura 8: Simulación (variación en μ) izquierda con 0.1-500 y derecha con 0.5-500

Puede observarse en esta comparativa entre alturas de flujo (H) como la variación de 0.1 a 0.5 del valor μ manteniendo el mismo valor en 500 de ξ reproduce una similar altura de flujo entre los dos ejemplos y a la vez muy parecida a lo que ocurrió en el evento en cuestión. Sin embargo la principal diferencia radica en la evolución del flujo en el torrente donde en el caso de la derecha el flujo alcanzaría la desembocadura en Romadriu mientras que en la situación derecha el flujo no alcanzaría la Borda Simó (Fig. 8).

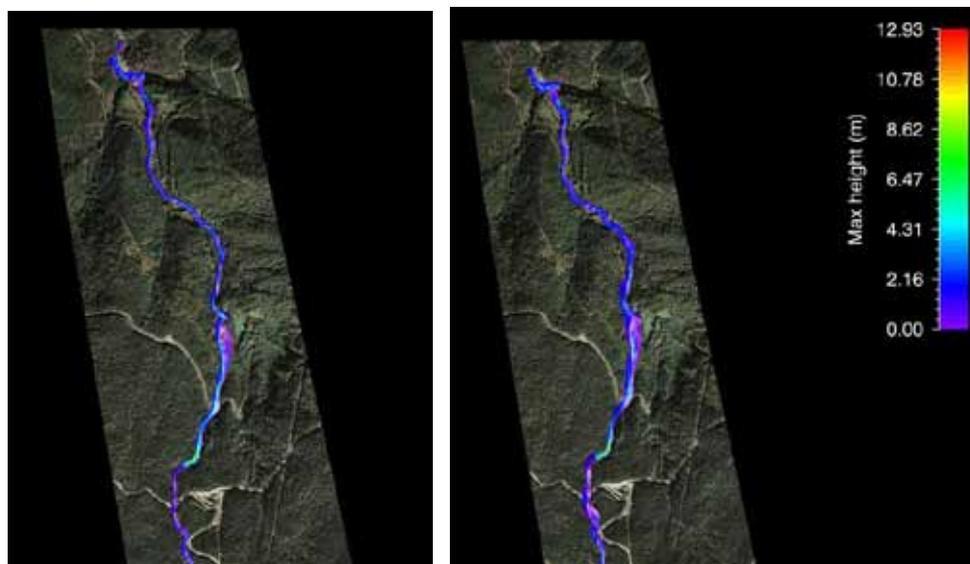


Figura 9: Simulación (variación en ξ) izquierda con 0.1-500 y derecha con 0.1-2500

En esta comparativa entre alturas de flujo (H) donde conservamos en 0.1 el valor de (μ) por tratarse del que ofrece resultados más parecidos al evento patrón y modificamos de 500 a 2500 el valor de (ξ). La diferencia se centra a lo largo del canal con un el elevado desbordamiento con respecto a lo observado sobre terreno (Fig. 9).

Tras el back análisis de todas las simulaciones se ha consensuado la combinación de valores de 0.1-1000 como la que ofrece resultados más semejantes a la observación de campo (Fig.10).

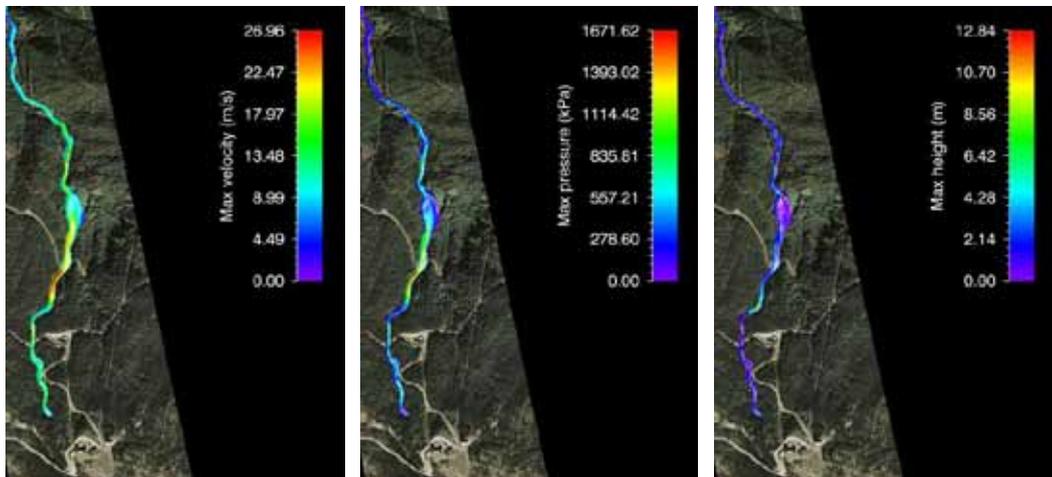


Figura 10: Simulación para valores 0.1-1000 obteniendo valores máximos de altura de flujo, velocidad y presión.

Destacan las velocidades máximas poco comunes para corrientes de derrubios pero si habituales en flujos hiperconcentrados de hasta 20 m/s y presiones importantes que superaron los 1400 kPa, combinación que justificaría la enorme erosión creada en el canal en el tramo de torrente situado entre la Borda de Simó y la Estación de Skí de Portainé (Fig.11).

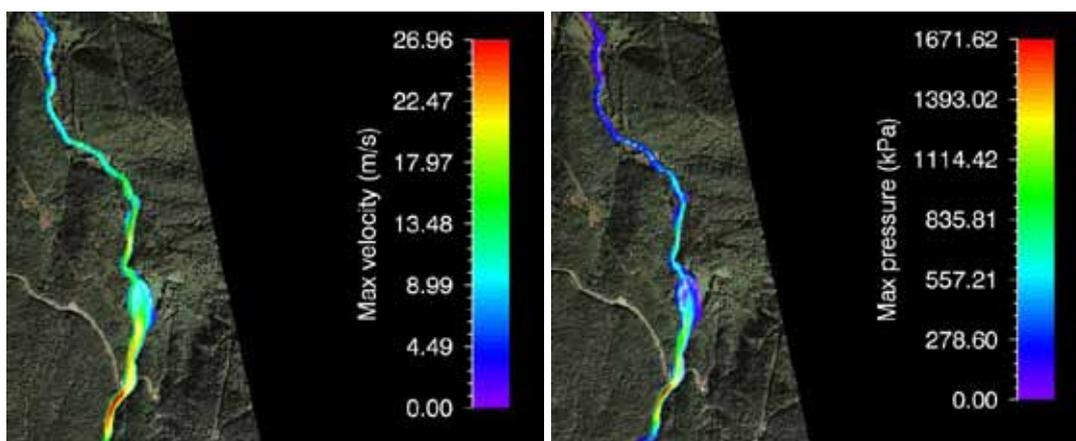


Figura 11: Detalle de velocidad y presión en la zona comprendida entre la carretera y la Borda de Simó, con los parámetros de 0.1 (μ) y 1000 (ξ), donde se concentraron los mayores daños en el evento de 2008.

4. EFICIENCIA DE LAS PROTECCIONES VX-160 SIMULADA MEDIANTE RAMMS

En 2010, escasos 3 meses después de la finalización de las obras de implementación de 9 barreras VX-160 en la zona erosiva del curso del barranco de Portainé, ocurrió un nuevo evento de similares características en cuanto a volumen y zona de salida al ocurrido en 2008, que colmató y desbordó las protecciones VX-160 pero que sin embargo resultó menos dañino para las infraestructuras de lo que lo había sido el anterior. Con la base de los valores obtenidos con el back-análisis se realiza una nueva simulación considerando la presencia de las infraestructuras construidas.

La presencia del Sistema VX-160 interpuesto perpendicularmente al torrente genera un efecto sobre la **altura de flujo**, en base a la observación de las simulaciones, que puede dividirse para cada protección en 3 partes bien diferenciadas: La primera parte supone un descenso en la lámina de flujo unos 30-44 metros antes de alcanzar la cota de la infraestructura; la segunda parte que implica la elevación de la lámina de flujo justo en el punto donde intercepta con el sistema VX; y una tercera parte con una importante reducción en la altura de flujo justo sobrepasada la estructura y por una distancia de más de 50 metros (Fig. 12).

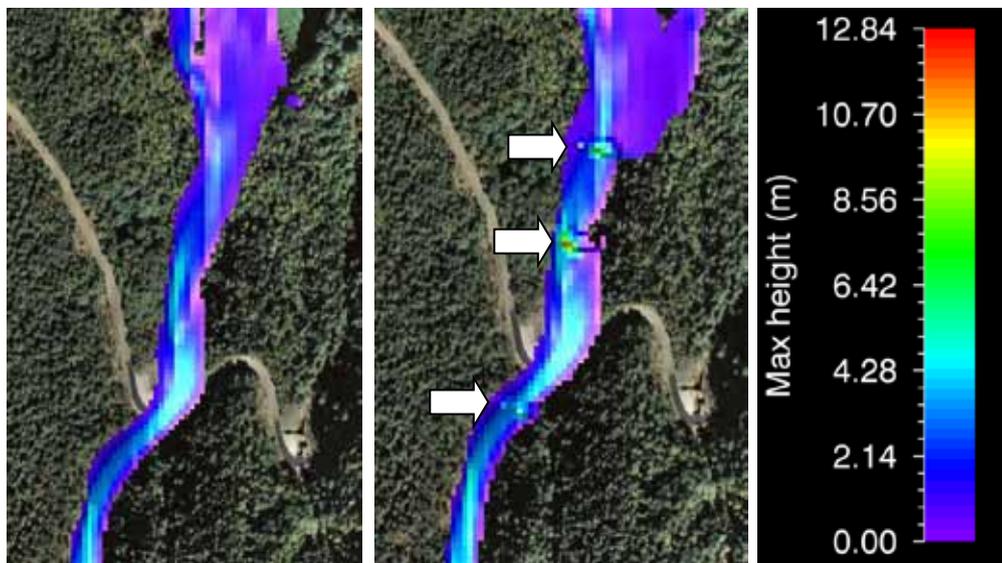
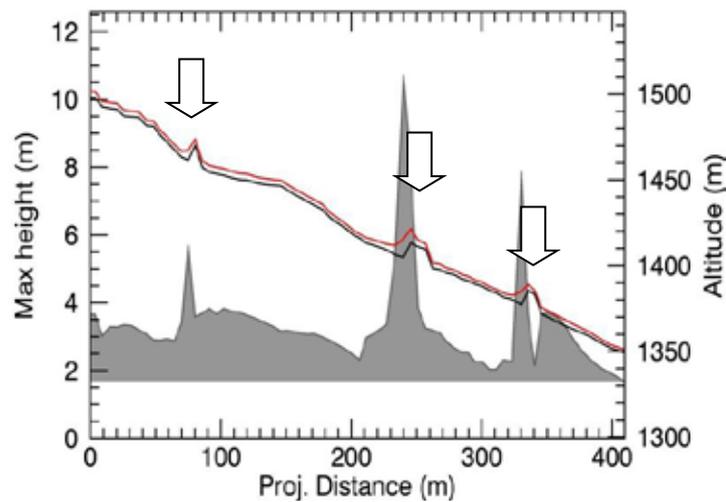


Figura 12: Comparativa “antes y después” de la influencia en la **altura** de flujo por de la instalación en el tramo de la Borda de Simó de Sistemas VX consecutivos. En la gráfica en negro perfil topográfico, en rojo lámina de flujo en área gris variación lámina flujo.



Se interpretan las tres partes en la gráfica como la reducción en la lámina de agua previa como consecuencia del embalse aguas arriba de la estructura por efecto de llenado; la segunda parte se interpreta como el efecto de rebose del agua por encima de la estructura y la tercera parte se asume como la pérdida de turbulencia y por lo tanto laminación temporal del flujo con el consecuente efecto de la pérdida de sólido.

La presencia del Sistema VX-160 interpuesto perpendicularmente al torrente genera un descenso generalizado en el torrente de la **presión de flujo** en base a la observación de las simulaciones y puntualmente y coincidiendo con la presencia de la estructura VX se detecta una caída en la presión de hasta 2/3 del total (Fig. 13).

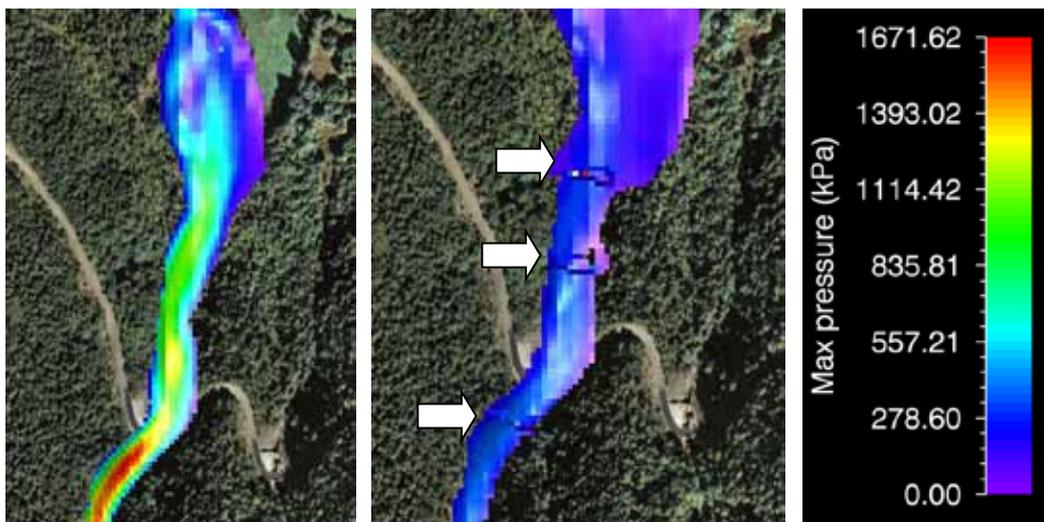
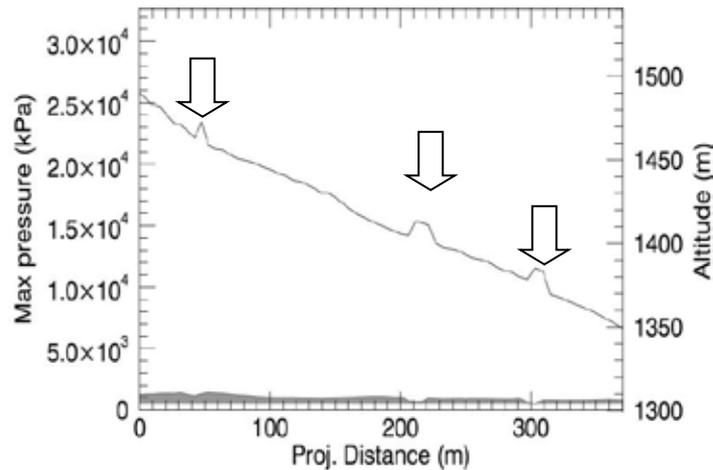


Figura 13: Comparativa “antes y después” de la influencia en la **presión** de flujo por de la instalación en el tramo de la Borda de Simó de Sistemas VX consecutivos. En la gráfica en negro perfil topográfico y en área gris variación presión.



Se interpreta que la existencia de las VX interpuestas al flujo en forma de escalera obliga a la pérdida de sólidos y por lo tanto a un descenso en la presión y con ello pérdida en la capacidad erosiva. Este efecto continuado en la trayectoria de flujo por las sucesivas interposiciones implica un descenso progresivo en la presión hasta evidenciar para el caso estudiado una prácticamente nula presión a 1km aguas arriba de la desembocadura en el río Romadriu.

De igual modo la presencia del Sistema VX-160 interpuesto perpendicularmente al torrente genera un descenso generalizado en el torrente de la **velocidad de flujo** para las mismas condiciones, en base a la observación de las simulaciones y de forma localizada y coincidiendo con la presencia de la estructura VX, tanto aguas arriba como aguas abajo, se pone de manifiesto reducción en la velocidad de flujo de hasta 1/2 del total (Fig.14).

Se interpreta esta reducción como la consecución del efecto “poza-salto-poza” propio de la dinámica torrencial natural en alta montaña.

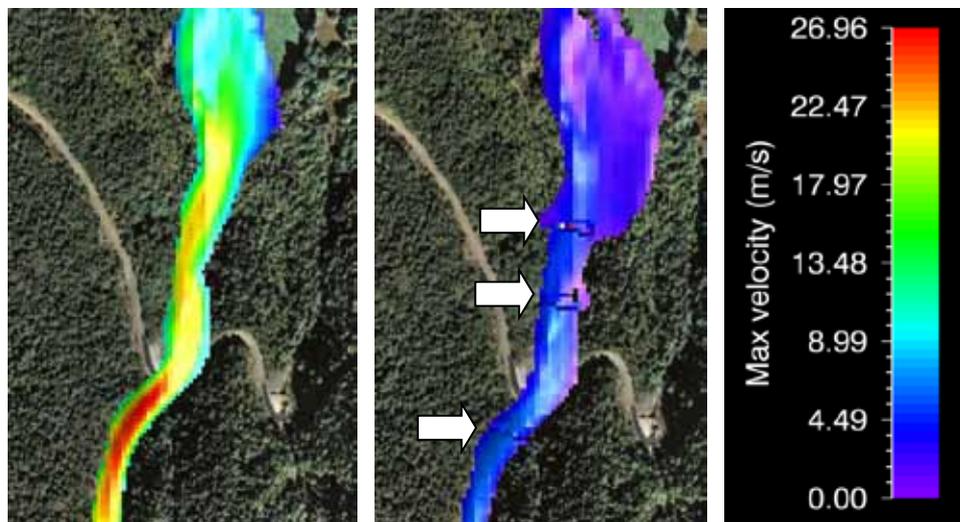
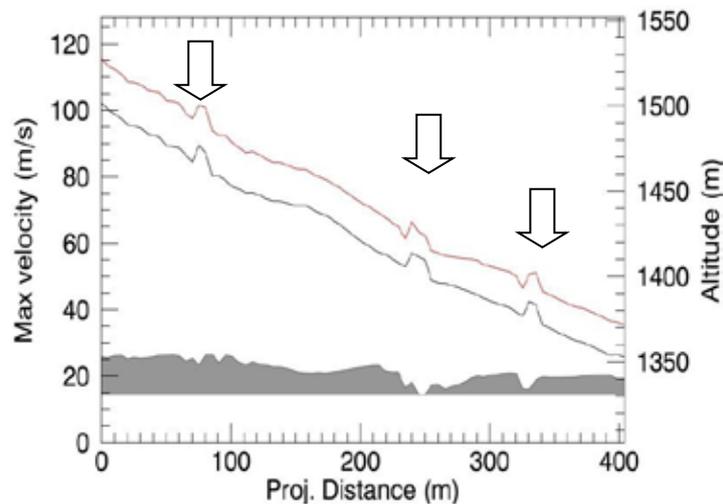


Figura 14: Comparativa “antes y después” de la influencia en la **velocidad** de flujo por de la instalación en el tramo de la Borda de Simó de 3 Sistemas VX consecutivos. En la gráfica en negro perfil topográfico, en rojo velocidad y en área gris variación velocidad.



Las simulaciones en su conjunto no hacen otra cosa más que evidenciar el eficiente funcionamiento de las infraestructuras instaladas para el evento de 25.000 m^3 ocurrido en Julio de 2010, simulado con densidad media de 2 t/m^3 .

5. CONCLUSIONES

En este caso la infraestructura para la defensa y corrección hidrológica de la que se dotó el torrente de Portainé fue diseñada para eventos de hasta 25.000 m^3 y los hechos y las simulaciones realizadas con RAMMS confirman la eficiencia de ésta. Sin embargo debemos considerar que este tipo de eventos en los Pirineos y en base a recientes estudios realizados en el Barranc de Erill (Raïmat et al. 2013) evidencian que si bien estos son los eventos dañinos para las infraestructuras más comunes y se corresponden con una frecuencia aproximada de $1.2 \cdot 10^{-2}$ eventos año, otros mayores eventos son esperables también en esta área y pudieran generar flujos no paliables con este tipo de medidas.

Los meticulosos datos tomados en observación de campo (calado máximo de flujo en base a las levees, tipo de depósito, zonas de erosión, transporte y zona combinada) tras el evento de 2008 permiten calibrar con precisión y criterio mediante back-analysis, los parámetros necesarios para el manejo de RAMMS en esta cuenca.

RAMMS se confirma como una herramienta capaz de simular con notable precisión la velocidad, altura de flujo y presión de los acontecimientos ocurridos en el Barranc de Portainé en Julio de 2010.

Esta herramienta puede ofrecer a la gente experimentada en el trabajo de campo una comprensión mayor de la evolución del flujo a lo largo del torrente y una capacidad enorme para el manejo y planificación del territorio frente a eventos tipo corriente de derrubios con la recreación de escenarios.

6. REFERENCIAS

- Ammann, W. Volkwein, A. (2006) Debris flow test site Illgraben, Switzerland. Research result from test barrier 2005. WSL, Switzerland.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., 2005: Numerical calculation of snow avalanche runout distances. In: Soibelman, L.; Pena-Mora, F. (eds) Computing in Civil Engineering. Proc. of the 2005 International Conference, July 12-15, 2005. Cancun, Mexico. 11 p
- Dai, F.C., Lee, C.F. & Ngai, Y.Y. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64:65-87.
- Hungr, O., Corominas, J. & Eberhardt, E. 2005. Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture & E. Eberhardt (eds), *Landslide Risk Management*. Vancouver, British Columbia, May 31-June 3, 2005:99-128.
- Jakob, Matthias; Hungr, Oldrich (2005). "Debris-flow hazards and related phenomena". *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena* (Springer): 38–39.
- Luis Fonseca, R., et al. (2005). SISTEMAS FLEXIBLES DE PROTECCIÓN CONTRA FLUJOS DE DETRITUS. Simposio de taludes y laderas inestables, Valencia.
- Luis Fonseca, R. et al (2007) SISTEMAS FLEXIBLES DE PROTECCIÓN CONTRA TORRENTES DE DETRITUS. *Ingeoter* 7.
- Meyer, G.A., and Pierce, J.L., 2003, Climatic controls on fire-induced sediment pulses in Yellowstone National Park and Central Idaho: a long-term perspective: *Forest Ecology and Management*, v. 178, p. 89-104.
- Raïmat, C. et al., 2013. Reconstrucción de la frecuencia de corrientes de derrubios en el barranc d'Erill. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca, Junio 2013 E.Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.) CIMNE, Barcelona, 2013
- Rickenmann, D. 2005. Runout prediction methods. In M. Jakob & O. Hungr (eds), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Berlin: Springer:305-324.
- Voellmy, A. 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung* 73:212-285.
- Wendeler, C. (2008). Murgangrückhalt in wildbächen – grundlage zu planung und berechnung von flexiblen barrieren, Doktorarbeit ETH-Zürich.