

## **PÉRDIDA DE SUELO EN LADERAS BAJO CAMBIO CLIMÁTICO. PROCESOS FÍSICOS, MODELACIÓN PREDICTIVA Y POSIBLES ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN - EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “SMUCPHY”**

**Marcel HÜRLIMANN<sup>1</sup>, Jean VAUNAT<sup>1</sup>, Raül OORTHUIS<sup>1</sup>, Antonio LLORET<sup>1</sup>, José MOYA<sup>1</sup>, Carol PUIG-POLO<sup>1</sup>, Alessandro FRACCICA<sup>1</sup>, Marta GONZALEZ<sup>2</sup>, Jordi PINYOL<sup>2</sup>, Felipe BUILL<sup>1</sup>, Amparo NUÑEZ-ANDRÉS<sup>1</sup>, Enrique ROMERO<sup>1</sup>, Clàudia ABANCÓ<sup>1,3</sup>, Joan MARTÍNEZ<sup>1,4</sup>, Carles RAÏMAT<sup>5</sup>, Ramon COPONS<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, BarcelonaTECH UPC

<sup>2</sup> Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

<sup>3</sup> Worldsensing SL, Barcelona

<sup>4</sup> Geomar SLP, Barcelona

<sup>5</sup> Geobrugg Ibérica SA

<sup>6</sup> Centre d'estudis de la neu i de la muntanya d'Andorra, Institut d'Estudis Andorrans

### **RESUMEN**

*Este proyecto de investigación estudia los mecanismos de la pérdida de suelos en zonas montañosas mediante un método multidisciplinar y el trabajo a diferentes escalas. Uno de los objetivos principales es analizar el efecto del cambio climático sobre estos mecanismos y buscar métodos de mitigación para afrontarlo correctamente. Se utilizan datos obtenidos mediante la auscultación de un experimento físico a gran escala y cuatro laderas y cuencas naturales situadas en el Pirineo Catalán, para alimentar y validar un modelo numérico innovador que implementa un módulo de interacciones suelo-vegetación-atmósfera. Finalmente, los resultados de la auscultación y de la modelización numérica se usarán para realizar una correlación de factores condicionantes de la inestabilidad con la ocurrencia espacio-temporal de deslizamientos superficiales utilizando técnicas SIG a escala regional.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

La pérdida de suelo debida a deslizamientos superficiales representa uno de los procesos erosivos más importantes en las regiones montañosas (p. ej. Hovius et al., 1997). Las inestabilidades de ladera inducidas por la lluvia tienen consecuencias para la sociedad. El movimiento de sedimento aguas abajo debido a corrientes de derrubios o procesos torrenciales puede tener consecuencias directas e indirectas tales como daños en infraestructuras y edificios, personas heridas y víctimas mortales, degradación del suelo debida a la pérdida de campos de cultivo o áreas forestales y la reducción de la capacidad de almacenamiento de embalses de agua, entre otras.

El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013) indica que el número de días calurosos ha aumentado a nivel mundial y que los fenómenos de precipitaciones extremas han aumentado en Europa desde 1950. Se espera que los eventos extremos de precipitación continúen aumentando considerablemente durante las próximas décadas (IPCC, 2012; Stoffel et al., 2014). Todos estos efectos generarán un incremento de pérdida de masa en las zonas montañosas y, en consecuencia, aumentarán el peligro y los daños.

El estudio de los impactos del cambio climático sobre los deslizamientos superficiales inducidos por la lluvia es una tarea de investigación muy compleja y no hay muchos estudios detallados disponibles (Coe and Godt, 2012; Crozier, 2010). Especialmente la aplicación de modelos numéricos para analizar la interacción termo-hidro-mecánico-química entre las capas del suelo y la atmósfera es una tarea pendiente.

El proyecto SMuCPhy, que ha empezado a principios de 2016 y termina a finales de 2019, tiene tres objetivos principales:

- 1) Mejorar el conocimiento sobre los procesos asociados a la pérdida de suelo mediante el estudio a tres escalas: escala local o ladera, escala cuenca vertiente y escala regional.
- 2) Analizar los mecanismos de la pérdida de suelo mediante modelos numéricos.
- 3) Estudiar el efecto del cambio climático sobre estos mecanismos y describir estrategias de mitigación.

## **2. METODOLOGIA GENERAL**

SMuCPhy es un proyecto multidisciplinar que incluye diferentes tipos de tareas y expertos. La estructura general se divide en ocho paquetes de trabajo (workpackages, WP) y las interacciones entre estos paquetes de trabajos están ilustradas en Figura 1.

Los tres primeros paquetes de trabajo (WP1, WP2 y WP3) se centran en la adquisición de datos a las tres escalas: escala regional mediante el inventario de eventos históricos; escala cuenca vertiente mediante auscultación in-situ; y escala ladera mediante un experimento físico (la construcción de un terraplén instrumentado).

Los paquetes de trabajo WP4 y WP5 agrupan las tareas relacionadas con el modelo numérico. Primero, se desarrolla y valida el nuevo modelo que se basa en la versión existente del modelo Code\_bright ([http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright/](http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/)). El nuevo modelo avanzado tiene como objetivo de incluir las interacciones entre suelo, plantas y atmósfera. En un siguiente paso, se aplica este modelo avanzado a los datos registrados en el experimento físico (WP3) y en las cuencas vertientes (WP2).

Los resultados de todos los anteriores paquetes de trabajo representan la base para los dos siguientes paquetes: WP6 y WP7. El WP6, que incluye el análisis de los escenarios, será fundamental para el proyecto, ya que investiga el impacto del cambio climático en los procesos de pérdida de suelo en las tres escalas. Por otra parte, el paquete de trabajo WP7 analiza posibles estrategias de mitigación para afrontar los futuros impactos.

El último paquete, WP8, garantizará la transferencia de los resultados a la comunidad científica, así como la repercusión del proyecto en medios de comunicación y su difusión a la sociedad.

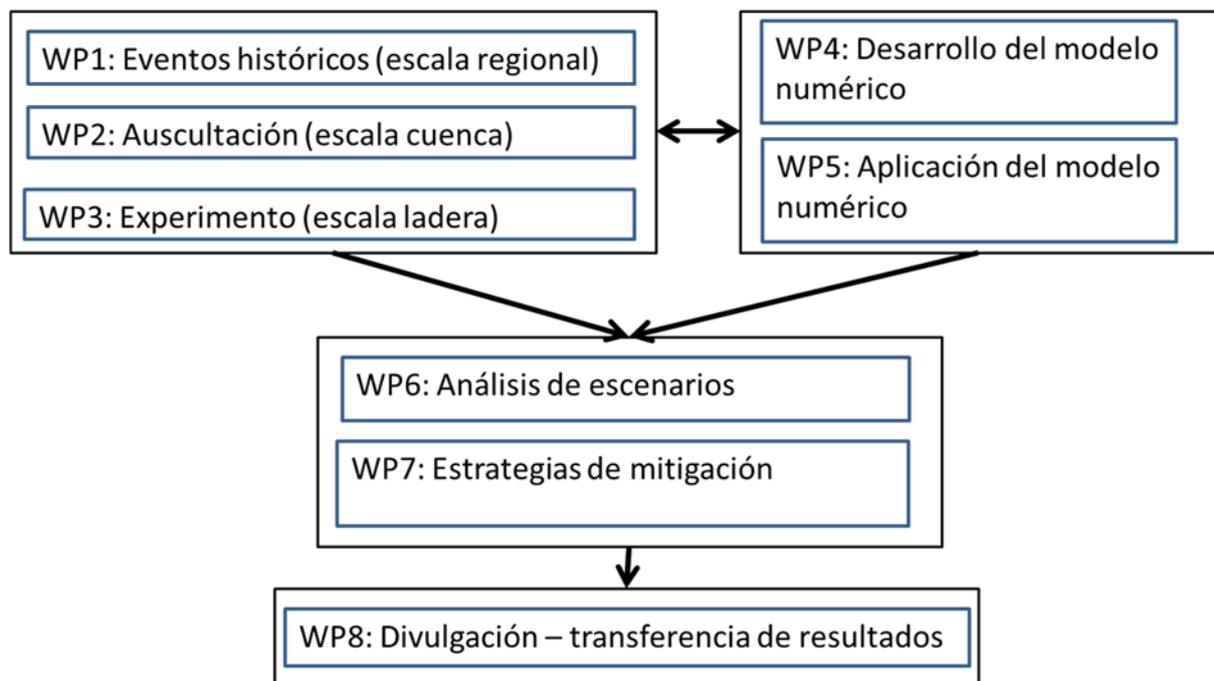


Figura 1. Metodología general del proyecto SMuCPHy ilustrando los diferentes paquetes de trabajo (workpackages, WP)

### 3. ZONAS DE ESTUDIO

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura del proyecto está definida para analizar la pérdida de suelo a tres escalas diferentes (de laderas, de cuenca y regional). A continuación, se describen de forma resumida las tres escalas.

#### 3.1 Escala ladera

Se ha construido un terraplén instrumentado en las instalaciones Agrópolis de la UPC en Viladecans. En la Figura 2 se muestra la geometría del terraplén experimental, con una pendiente 3H:2V y un espesor instrumentado de 70 centímetros. La capa instrumentada está separada del núcleo mediante una geomembrana impermeable rugosa con la finalidad de que la circulación de agua se desarrolle únicamente en la capa superior, donde se quieren medir las roturas. Tras un periodo de observación de un año con las condiciones naturales, las roturas se inducirán mediante una lluvia artificial intensa.

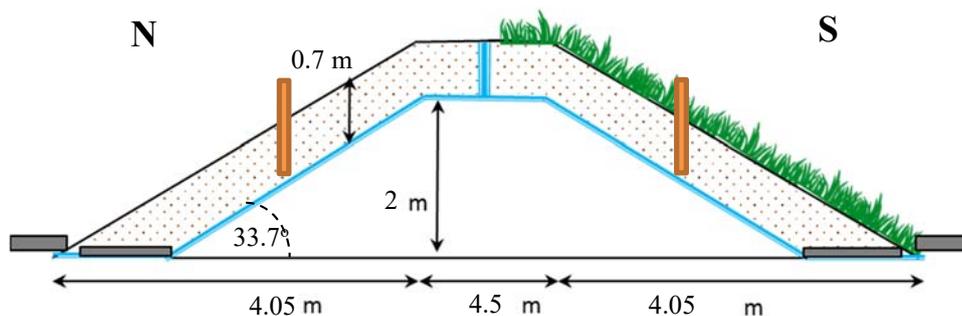


Figura 2. Esquema de la geometría del terraplén experimental. En azul, la geomembrana impermeable; en punteado, la capa superior donde se esperan las roturas y en marrón los perfiles verticales con instrumentación.

La instrumentación se distribuirá en 4 perfiles verticales diferentes situados a mitad de talud, dos encarados al norte, con y sin vegetación, y dos encarados al sud, con y sin vegetación (Figura 3), con el objeto de comparar la interacción de la infiltración con la vegetación y la atmósfera. Tanto la parte con vegetación como sin vegetación estarán separadas lateralmente con una geomembrana para evitar la interacción entre ambas partes.

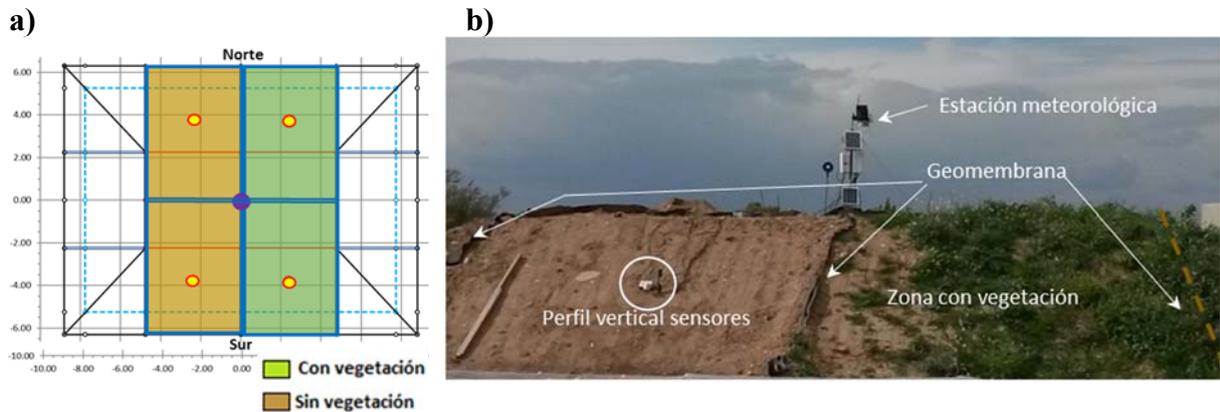


Figura 3. a) Esquema en planta del terraplén experimental con la posición de los perfiles verticales (puntos amarillos) y estación meteorológica (punto lila). b) Vista general del terraplén.

La función de la instrumentación en los perfiles verticales será la de caracterizar el flujo de agua y calor en el suelo. En condiciones normales, estos flujos serán fundamentalmente verticales, de ahí la distribución a lo largo de la vertical. En relación al flujo de agua se medirán presiones intersticiales (mediante tensiómetros y piezómetros) y contenidos volumétricos de agua (VWC). En relación al flujo de calor se medirá la temperatura y el propio flujo de calor. Por otra parte, a fin de establecer las condiciones de contorno en la superficie del suelo, se medirá la temperatura, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento encima de cada uno de los perfiles. En el centro del experimento, a 1.80 metros de altura sobre el nivel superior del terraplén, se sitúa una estación meteorológica formada por un pluviómetro, un anemómetro, un piranómetro y un sensor de humedad relativa y temperatura del aire. Los movimientos de la superficie de los taludes se medirán utilizando laser-scanner y técnicas fotogramétricas. En la Figura 4 se muestra la posición de los sensores para cada uno de los perfiles verticales.

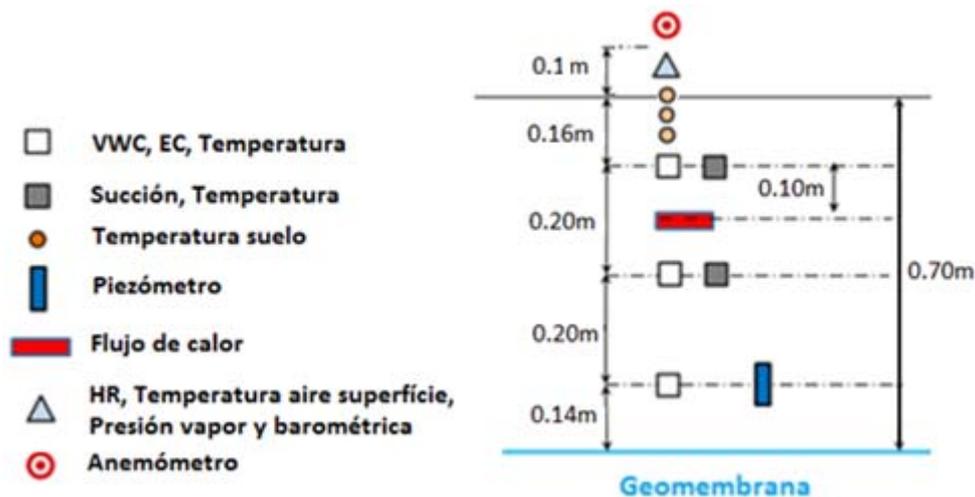


Figura 4. Posición instrumentación en cada uno de los perfiles verticales.

### 3.2 Escala cuenca

A escala de cuenca, se han seleccionado cuatro cuencas y laderas instrumentadas con diferentes sensores para medir la pérdida de suelo relacionada con deslizamientos superficiales y flujos torrenciales. Las zonas de estudio son el Rebaixader, Erill, Portainé y Cercs, todas ellas situados en el Pirineo o Prepirineo Central-Oriental (ver Figura 5). La primera de ellas, la cuenca el Rebaixader, es la que tiene la auscultación los instrumentos más complejos y la que tiene la serie de datos más larga, ya que se inició en el año 2009. Se trata de una cuenca vertiente con altas pendientes y una presencia casi ilimitada de material susceptible de ser movilizado (Figura 6), dos factores fundamentales para la pérdida de suelo en alta montaña. La descripción detallada de la cuenca, las especificaciones técnicas y requerimientos del sistema de monitorización, así como los resultados del análisis de los datos obtenidos pueden consultarse en Hürlimann et al. (2014).

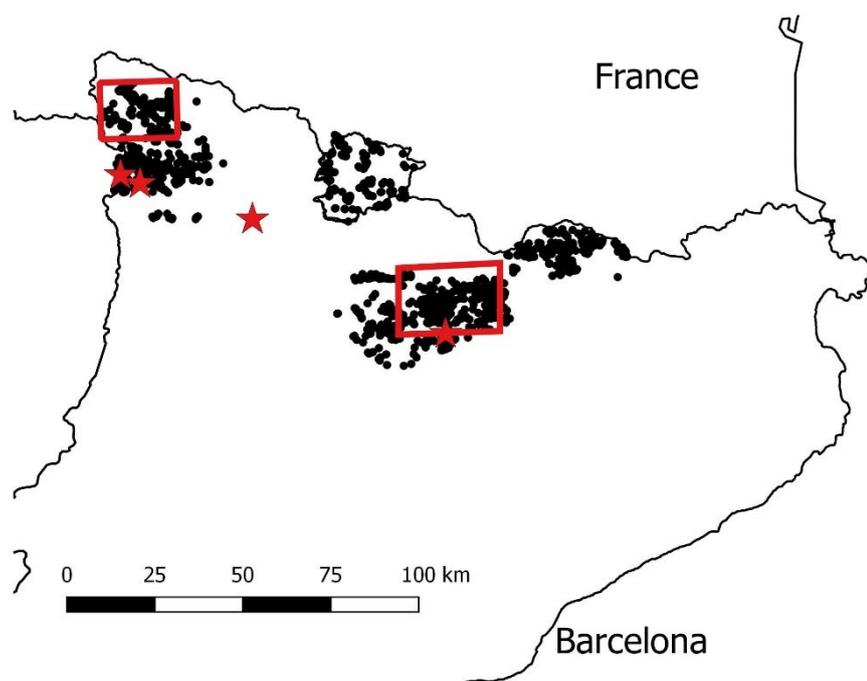


Figura 5. Situación de los deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios incluidos en el inventario (puntos negros). Las estrellas indican las cuencas auscultadas; y, con rectángulo rojo, las zonas propuestas para el estudio a escala regional (modificado de Hürlimann et al., 2016).

La cuenca de Erill y de Portainé, instrumentadas entre los años 2005 - 2012 (Raïmat et al. 2013; Raïmat 2017) y verano 2015 (Furdada et al. 2016; Palau et al. 2017) respectivamente, aportarán información complementaria, y así evitarán interpretaciones específicas del lugar que pueden sesgar los resultados.

A escala de detalle, también se utilizarán los datos obtenidos de instrumentar un deslizamiento superficial, el de Cercs (Berguedà) situado en el Prepirineo Catalán (Berguedà, ver Figura 5). Este deslizamiento de un volumen aproximado de varios cientos de metros cúbicos está ubicado en una ladera natural que muestra múltiples signos de inestabilidades. El substrato rocoso está formado por argillitas de la facies Garumniense. Los sensores están instalados en la parte alterada-fisurada de este substrato rocoso y en el coluvión que se ha formado en la superficie. La auscultación de Cercs estudia el movimiento del deslizamiento y la infiltración de la lluvia en el terreno mediante una estación meteorológica y diferentes sensores que registran el contenido de agua en el suelo y la succión.

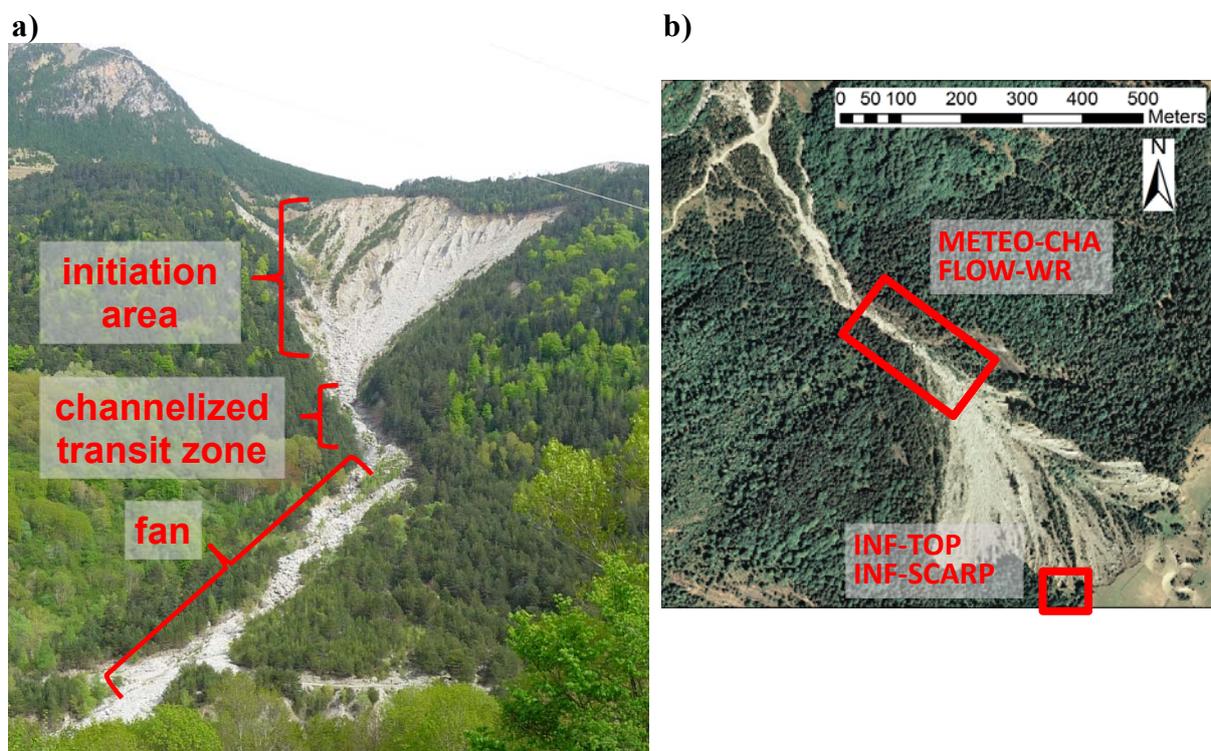


Figura 6. a) Vista general de la cuenca El Rebaixader, y b) situación de las estaciones de la auscultación.

### 3.3 Escala regional

A escala regional, están previstas dos zonas de estudio (Figura 5) donde se aplicarán los modelos obtenidos escala regional utilizando técnicas SIG.

Una de las zonas de estudio es el Val d'Arán (Pirineo Central), donde en 2013 se produjo un episodio de lluvias importantes que provocó una crecida excepcional de la Garona y de

sus afluentes, que provocó alteraciones importantes en los espacios fluviales y deslizamientos y flujos torrenciales generalizados en las laderas (Oller et. al., 2013; Victoriano et al., 2016). La segunda zona de estudio se ubica en la comarca del Berguedà en el Prepirineo Oriental, fuertemente afectada, en 1982, por un episodio de lluvias intensas que generaron cientos de deslizamientos (p. ej. Corominas y Alonso, 1990).

#### 4. RESULTADOS PRELIMINARES

##### 4.1 Datos de auscultación: terraplén

En la Figura 7 se ilustran los resultados preliminares de temperatura de una semana de registro con los sensores instalados en el terraplén. Se representa la temperatura del suelo registrada para diferentes profundidades (1 - 56 cm) y la temperatura del aire sobre la superficie del suelo. Se observa como los sensores situados más superficialmente tienen una temperatura que se asemeja más a la temperatura del aire, con picos más marcados durante el día y la noche. Los sensores situados a más profundidad registran menos variaciones de temperatura, con picos menos marcados y con un retraso respecto a los situados más superficialmente, lo que sugiere un gradiente térmico de la superficie hacia las capas más profundas del suelo y una difusión de la temperatura hacia capas más profundas.

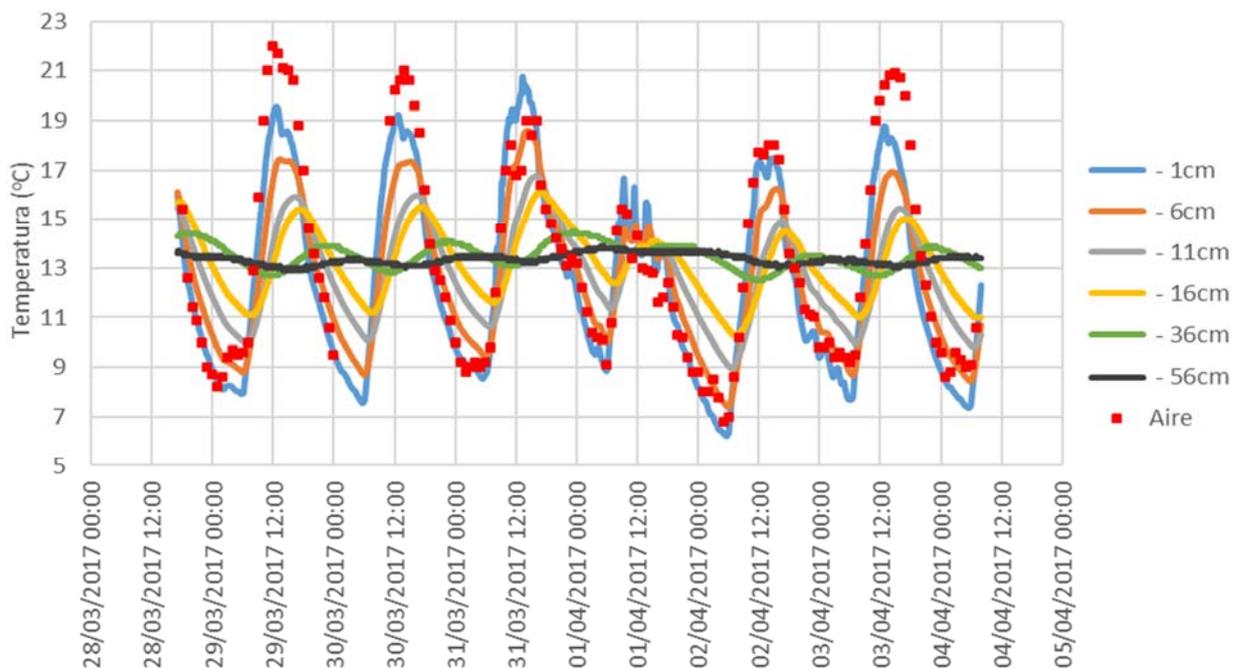


Figura 7. Resultados preliminares de una semana de registro de la temperatura del suelo a diferentes profundidades y la temperatura del aire.

## 4.2 Datos de auscultación: cuencas instrumentadas

A continuación, se presenta dos ejemplos de datos registrados mediante la auscultación. En primer lugar, se muestra la infiltración de lluvia en el deslizamiento superficial de Cercs durante el año 2015 y posteriormente se exponen los datos registrados durante un episodio de lluvia en la cuenca el Rebaixader.

La Figura 8 demuestra el efecto de la infiltración de lluvia en el subsuelo mediante las medidas de contenido de agua en dos profundidades diferentes. Se puede observar claramente la relación directa entre la precipitación y el aumento del contenido de agua en el suelo. La respuesta del suelo es casi instantánea mientras que el desecado es progresivo.

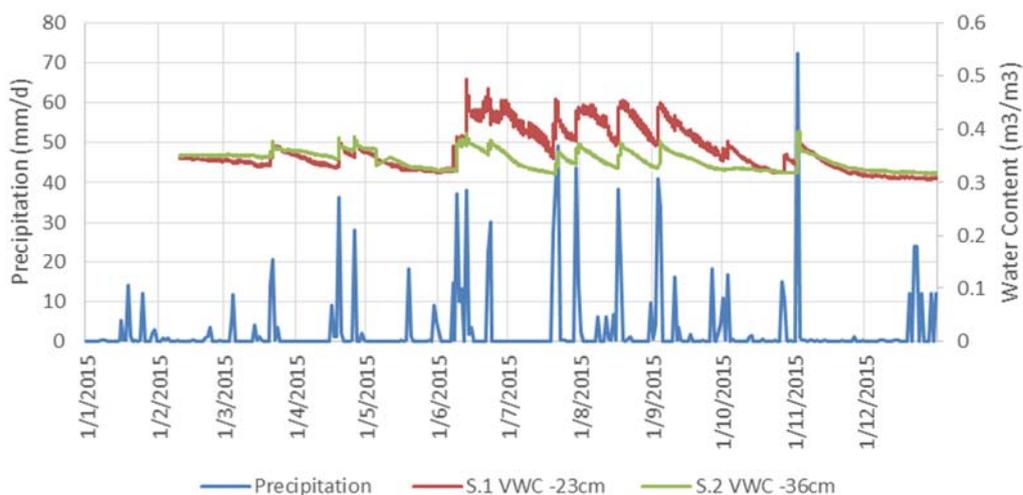


Figura 8. Datos de infiltración de 2015 medidos en el deslizamiento superficial en Cercs. Relación entre precipitación y contenido de agua (VWC) a dos profundidades diferentes: -23 y -36cm (adaptado de Martínez, 2016).

En la Figura 9 se presentan datos registrados en la cuenca de Senet durante una lluvia torrencial de julio de 2013. Esta lluvia causó una corriente de derrubios de un volumen total superior a  $10000 \text{ m}^3$ , detectado mediante los sensores instalados en la cuenca. La lluvia tuvo una duración de aproximadamente 1 hora, pero una intensidad muy alta. Los sensores que miden el contenido de agua en el suelo indican un rápido e importante aumento del grado de saturación, especialmente los dos sensores situados a -30 y -50 cm. Los datos también indican que el desencadenamiento del flujo torrencial empezó casi simultáneamente con el aumento de contenido de agua en el suelo. Esta conexión temporal tan rápida es lógica ya que el tipo de material en la zona de formación de los flujos, donde están instalados los sensores de infiltración, consiste de un till de sedimento granular muy permeable.

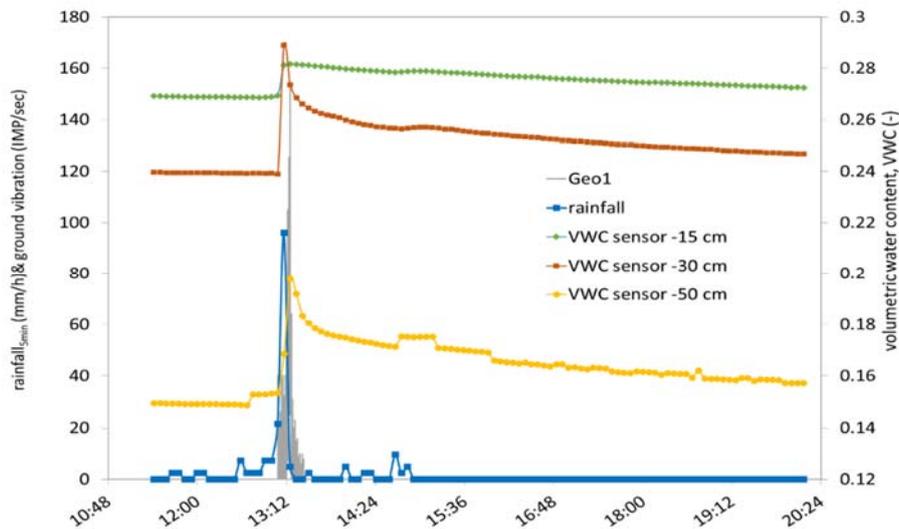


Figura 9. Datos de infiltración registrados en Senet durante el episodio de lluvia del 17 de Julio de 2013, desencadenante de una corriente de derrubios.

### 4.3 Resultados preliminares del modelo numérico

Los datos de auscultación se interpretan mediante análisis numéricos para estudiar la respuesta de los taludes frente a acciones climáticas. Con ese propósito, se ha utilizado el código de elementos finitos Code\_bright, que permite resolver problemas acoplados termo-hidro-mecánicos en medios geológicos, y se ha implementado una condición de contorno específica para representar las interacciones suelo-atmósfera. La Figura 10 muestra un ejemplo de comparación entre los contenidos volumétricos de agua medidos en el campo y los calculados por el modelo numérico a lo largo de dos meses de auscultación.

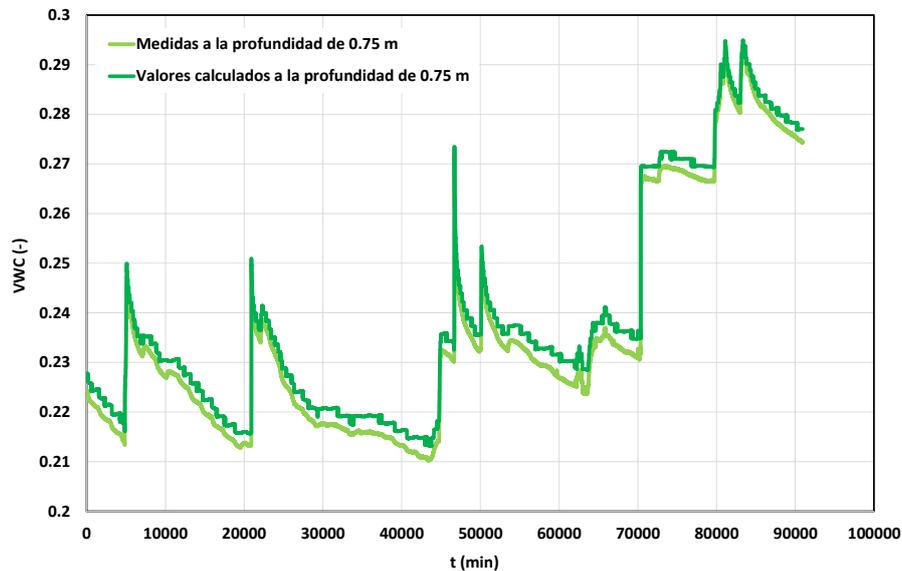


Figura 10. Comparación entre contenido volumétrico de agua medido en Senet y el calculado.

## 5. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación SMuCPhy intenta aplicar una metodología multidisciplinar para analizar el efecto del cambio climático global sobre la pérdida de suelo asociada con deslizamientos superficiales y procesos torrenciales. A principios de 2017 se ha terminado la construcción del terraplén y se ha instalado la instrumentación que permitirá la adquisición de datos a escala de ladera. Todos estos datos, junto con los registros obtenidos de las auscultaciones realizadas en el Pirineo, alimentarán los diferentes modelos numéricos y analíticos, que finalmente permitirán mejorar el conocimiento sobre los mecanismos y las causas de la pérdida de suelo en zonas montañosas y proponer medidas de mitigación específicas a la problemática analizada

## AGRADECIMIENTOS

El proyecto SMuCPhy está financiado por el ministerio de economía y competitividad (BIA 2015-67500-R). También dar las gracias al Servei Meteorològic de Catalunya y la Agencia Estatal de Meteorología por facilitarnos los datos de estaciones meteorológicas.

## REFERENCIAS

Coe, J.A., Godt, J., 2012. Review of approaches for assessing the impact of climate change on landslide hazards, in: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K., Leroueil, S. (Eds.), *Landslides and Engineered Slopes*. Banff, Canada, pp. 371–377.

- Corominas, J., Alonso, E., 1990. Geomorphological effects of extreme floods (November 1982) in the southern Pyrenees. IAHS no. 194, Lausanne, pp. 295–302.
- Crozier, M.J., 2010. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology* 124, 260–267. doi:10.1016/j.geomorph.2010.04.009
- Furdada G, Génova G, Guinau M, Victoriano A, Khazaradze G, Díez-Herrero A, Calvet J (2016) Las avenidas torrenciales de los barrancos de Portainé, Reguerals y Ramaiosa (Pirineo Central): evolución de las cuencas y dinámica torrencial. Instituto Geológico y Minero de España, *Geología y Geofísica* 5:315-322
- Hovius, N., Stark, C., Allen, P., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology* 25, 231–234.
- Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., Vilajosana, I., 2014. Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain. *Landslides* 11, 939–953.
- Hürlimann, M., Lantada, N., Gonzalez, M., Pinyol, J., 2016. Susceptibility assessment of rainfall-triggered flows and slides in the Central-Eastern Pyrenees, in: Aversa, S., Cascini, L., Picarelli, L., Scavia, C. (Eds.), XII Int. Symposium on Landslides and Engineered Slopes. CRC Press, Naples, pp. 1129–1136.
- IPCC, 2013. Summary for policymakers. Working group I contribution to the IPCC Fifth assessment report climate change 2013: the physical science basis. Cambridge University Press.
- IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Martínez, G. (2016) Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercs. Trabajo final de máster, UPC. 93pp.
- Oller P, Pinyol J, González M, Ripoll J, Micheo M<sup>a</sup>J (2013) Efectes geomorfològics de l'aiguat i riuada del 18 de juny de 2013. Libro de comunicaciones " La gestió de les inundacions", Noviembre 27 y 28, 2013.
- Palau R.M., Hürlimann, M., Pinyol J., Moya J., Victoriano A., Génova M., Puig-Polo C. (2017) Recent debris-flows in the Portainé catchment (Eastern Pyrenees, Spain). Analysis of monitoring and field data focussing on the 2015 event. *LANDSLIDES*, doi:10.1007/s10346-017-0832-9.
- Raïmat, C. (2017) Dinámica y peligrosidad de las corrientes de derrubios: Aplicación en el barranco de Erill, Pirineo Catalán, Tesis doctoral. UPC. 495pp.
- Raïmat, C., Luis-Fonseca, R., Hürlimann M., Corominas, J., Fernandez, J. (2013) Reconstrucción de la Frecuencia de Corrientes de Derrubios en el Barranc d'Erill. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Mallorca, p. 519-529.
- Stoffel, M., Tiranti, D., Huggel, C., 2014. Climate change impacts on mass movements--case studies from the European Alps. *Sci. Total Environ.* 493, 1255–66.
- Victoriano, A., García-Silvestre, M., Furdada, G., Bordonau, J., 2016. Long-term entrenchment and consequences for present flood hazard in the Garona River (Val d'Aran, Central Pyrenees, Spain). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 2055–2070.