

EFFECTO ENCADENADO DE LOS INCENDIOS FORESTALES Y EL RIESGO TORRENCIAL. UN CASO SOBRE FERROCARRIL EN CAPELLADES

OLIVERAS i ALOY, Ricard⁽¹⁾, PRAT i FONTE, Elisabet⁽²⁾ y FERRÉ i OLTRA, Anna⁽³⁾

⁽¹⁾ Inaccés Geotecnica Vertical

⁽²⁾ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya

⁽³⁾ Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya

RESUMEN

Los incendios forestales tienen un impacto significativo en el aumento del riesgo geológico, ya que destruyen la vegetación que estabiliza las pendientes, haciendo que el suelo sea más susceptible a la erosión y los deslizamientos superficiales. Los escenarios de cambio climático indican un doble aumento del riesgo de incendio y de flujos torrenciales que pueden encadenarse desfavorablemente.

El caso en estudio que se presenta en Capellades afectó a la línea férrea de Igualada. Un incendio forestal el 24 julio de 2019 iniciado en la carretera C-15 afectó una superficie de ladera montañosa de 58Ha. En la inspección de terreno inmediata se identificó la pérdida total de vegetación dejando al desnudo abundantes depósitos de material fragmentado resultante de la erosión del macizo rocoso. En una orografía de valle muy verticalizado se evidenció una alta posibilidad de movilización y arrastre de materiales en una futura lluvia torrencial.

Se realizó un trabajo preventivo de medidas de contención localizado en secciones del torrente donde era más factible colocar estructuras de interceptación de flujos (barrera estática a modo de cierre de sección). Durante las lluvias del día 22 de octubre de 2019 estas estructuras de interceptación resistieron adecuadamente, pero se vieron sobrepasadas por la gran cantidad de material movilizado que en parte alcanzó la vía y provocó el descarrilo de un tren sin mayores perjuicios. Se aumentaron las medidas correctoras en una segunda fase instalándose más barreras de distintas tipologías, a la vez que se vaciaron las estructuras colmatadas con reto-araña. Finalmente, se instaló un sistema de monitoreo para la detección de carga en las barrera y alarma en la circulación ferroviaria.

El caso ha permitido extraer múltiples lecciones para futuras ocasiones semejantes que podrían resultar más frecuentes en un contexto de calentamiento global, que favorece los procesos de aridización y precipitaciones de mayor torrencialidad, siendo también la zona prelitoral catalán un área de elevada recurrencia de estos eventos, donde se configura una situación favorable a la erosión y transporte de sedimentos.

1. INTRODUCCIÓN

El día 24 de julio de 2019 se inicia un incendio forestal en la cuneta propiciado por un vehículo averiado en la C-15 PK38,2 en el término municipal de Capellades (Anoia). Rápidamente este incendio se propaga de la carretera hasta la infraestructura ferroviaria línea Igualada Martorell, L-A, la sobrepasa en el PK 13+500 y se ve afectada toda la ladera conocida como Bosc del Guenyo,

perteneciente al PEIN Valls de l'Anoia (Plan de espacios de interés natural). La superficie boscosa afectada final resultaría ser de 63Ha.



Figura 1. Fotografía obtenida con vuelo dron de la ladera incendiada, torrentera e infraestructura ferroviaria FGC y carretera C-15.

La zona corresponde a una buena muestra del ambiente mediterráneo propio, presentado por una mezcla de áreas boscosas, dominada por el pino carrasco (*Pinus halepensis*) en las solanas y con presencia de encina (*Quercus ilex*) y roble martinec (*Quercus pubescens*) en las laderas umbrías. Representa también una zona importante de nidificación y caza del águila perdicera (*Hieraatus fasciatus*).

Geológicamente esta ladera se encuentra formada por pizarras micacíticas y pizarras arenosas del cambroordoviciana-Ordoviciano y tiene un contacto muy cercano con un afloramiento granítico llamado plutón Vallbona-Capellades y enfrentada a unos grandes depósitos de travertinos del cuaternario. En la ladera existen afloramientos rocosos de pizarras y gran abundancia de acumulaciones de depósitos de material fragmentado muy fino y laminado tamaño gravilla y arenoso. A pie de vía también aparecen depósitos cuaternarios de arenas y arcillas.

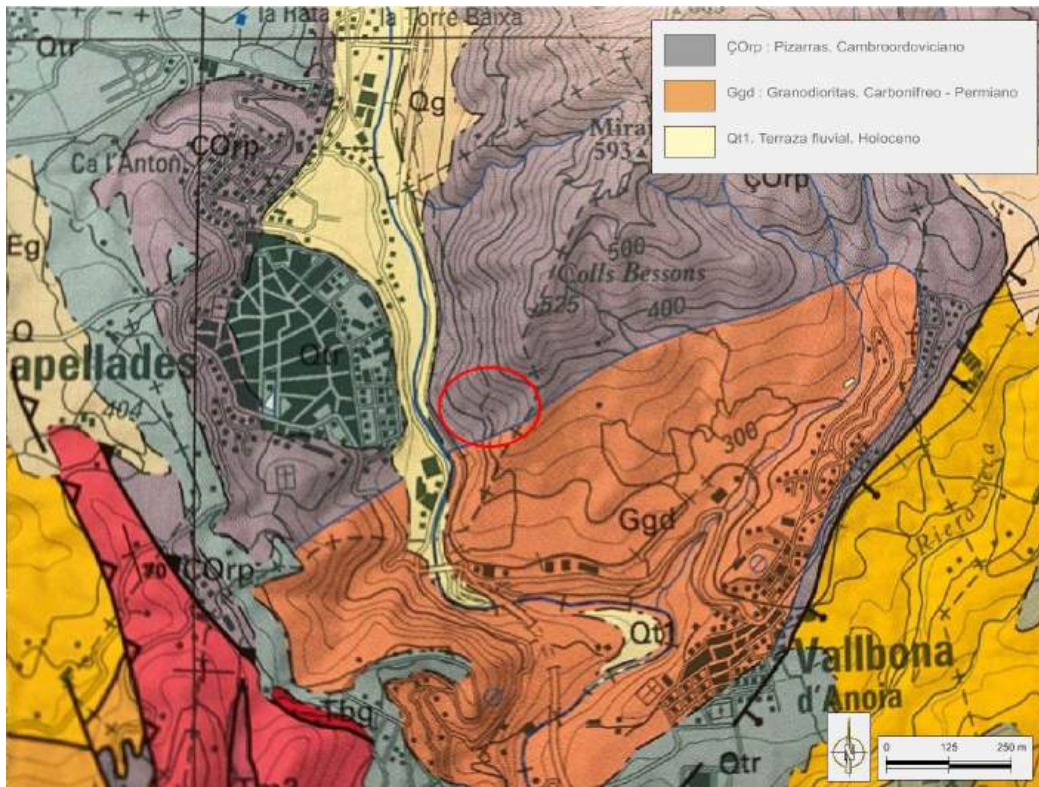


Figura 2. Mapa geológico 1:50.000 ICGC de la zona de estudio

2. INSPECCIÓN POSTERIOR Y ANTICIPO AL RIESGO GEOLÓGICO

El día 08/08/2019 se realiza visita de FGC, ICGC y Inaccés Geotècnica Vertical para una inspección detallada del terreno. Se identifica un talud de gran superficie con grandes inclinaciones, la total desaparición de vida vegetal dejando el terreno al descubierto e importantes acumulaciones de material fragmentado.

La ladera tiene una cuenca de drenaje con forma de embudo y una pendiente media de 26° , con una extensión de área fuente de unos 2.500 m^2 . Se observa que todo el perímetro de la cuenca de la torrentera vierte hasta la torrentera muy encajonada en el valle y que vierte todo el desagüe a un punto concreto del talud por encima de la vía ferroviaria la cual no dispone de obra de drenaje.

También se evalúa el estado de un talud de unos 1.400 m^2 de material muy fragmentado y con muchos finos que ha quedado totalmente expuesto, con una inclinación variable entre 60° - 90° y de gran altura, con gran cantidad de material movilizable (pizarras fracturadas, gravas con matriz arenosa)

De la inspección técnica se concluye la existencia de grandes acumulaciones de material fragmentado provenientes de las pizarras que juntamente con una morfología muy inclinada y de poca sección podría producir un arrastre de materiales importante ante un episodio tormentoso sobre la infraestructura ferroviaria. Los taludes y laderas de este tramo de la línea ferroviaria se habían manifestado anteriormente sensibles a la erosión del terreno, que derivó en necesidad de mantenimiento de las mallas y barreras de protección que hay instaladas por la acumulación de grandes bolsas de material retenido.

Ante la sensibilidad en este punto frente a próximas lluvias con carácter torrencial, se recomienda afrontar una actuación con carácter de obra de emergencia. Nos anticipamos preventivamente a diseñar las siguientes estructuras de interceptación y/o consolidación para un posible episodio de lluvias que pueda generar un arrastre y movilización de todo este material.

Las obras de emergencia se inician con la instalación en el barranco de dos barreras embudo para la retención de sedimentos en la parte baja de la ladera, una barrera estática oblicua y una actuación en el talud de la vía del tren.

-Protecciones tipo embudo a modo de barrera de contención en los puntos donde la sección del torrente estrecha y se facilita el bloqueo del encauzamiento.

Estas barreras son diques flexibles de malla metálica que retienen las piedras, tierras y restos de vegetación que el barranco puede arrastrar. Actúan como un elemento que, en llenarse consiguen un efecto de suavizado del terreno, formando un espacio llano aguas arriba con una pendiente de compensación que lo hace menos erosionable y disipando la energía del flujo de agua.

Las barreras no están diseñadas per detener el impacto de un flujo con una elevada energía, sino que la situación que puede tener lugar en esta ladera es la formación de un flujo laminar que provoque un relleno progresivo de la barrera. El emplazamiento de las barreras busca los puntos del barranco donde se oponen al flujo con mayor eficacia de retención.

Formados por anclajes flexibles 16mm L=3m, malla de triple torsión en doble capa, cables horizontales de 12mm y grapas de unión de cables. Ventaja de inmediatez, colocación fácil y velocidad. Situados encima de la cabecera del talud antes de la caída en zona de vía.

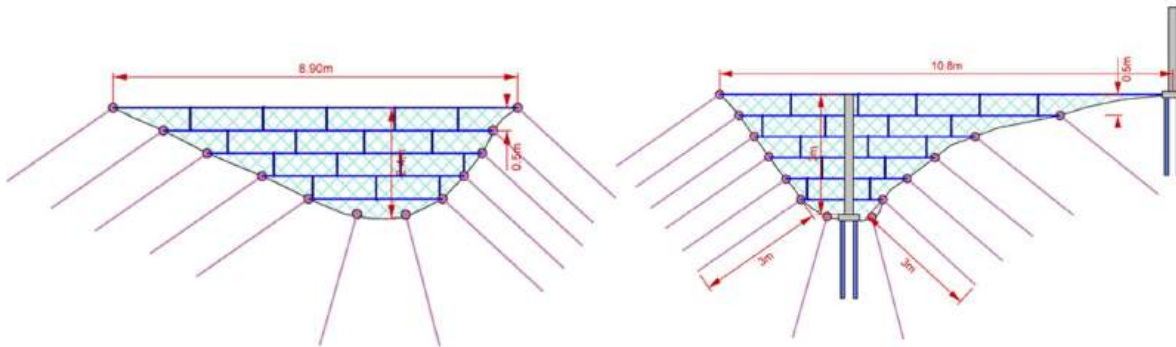


Figura 3. Esquema representativo de barrera embudo simple y con poste central de refuerzo.

-Barrera estáticas de perfiles HEB, anclajes, red de cable, malla triple torsión. Situada en el lateral del valle, para la recogida de arrastres de los bancales laterales.

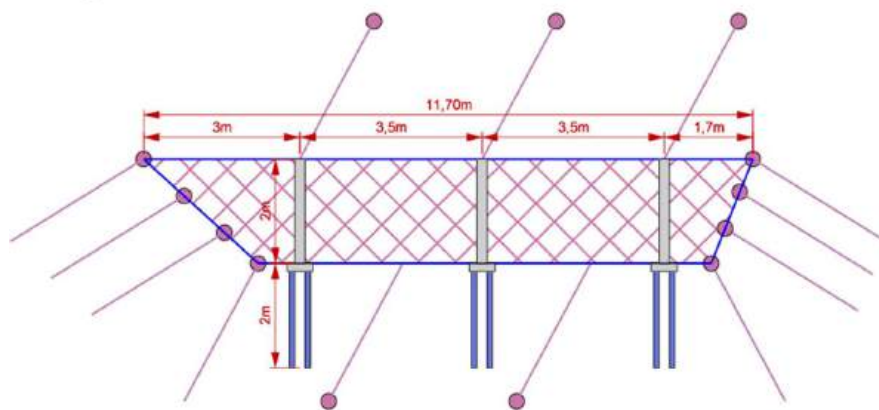


Figura 4. Esquema representativo de la barrera estática.

-Geomalla reforzada para la protección del talud de la vía del tren con el objetivo de reducir los efectos erosivos del terreno y a la vez fijar el terreno para evitar deslizamientos superficiales. La actuación consiste en la instalación de una geomalla de polipropileno reforzada con malla metálica y fijada y ajustada a las irregularidades del terreno con bulones auto-perforantes y bulones de barra de acero y cables de refuerzo diagonales y horizontales.



Figura 5. Situación de barreras embudo, barreras estáticas y geomalla reforzada en el talud.

3. EPISODIO DE LLUVIAS TORRECIALES Y DESCARRILO DEL TREN

Entre las 22:30 del día 22 de octubre y las 2:00 del día 23 se registraron 61,4mm de precipitación en la estación meteorológica más próxima a la zona de la incidencia, que es la estación de Hostalets de Pierola. Estos valores representan una intensidad de precipitación de 8,8mm/30 minutos.

Se recibe un aviso de descarrilamiento de un convoy de pasajeros a las 11 de la noche en el mismo punto del incendio forestal, en el PK 10+400. El tren colisiona con un depósito de arrastres, y queda remontado y ladeado hacia el talud, sobre un volumen aproximado de tierras de 50m³. El convoy quedaría semi enterrado con la caída continuada del flujo de arrastres.



Figura 6. Convoy enterrado en escombros y vista barrera embudo colmatada.

La misma noche se verificó que los embudos de retención del torrente habían trabajado con eficacia hasta el límite de su capacidad por dimensiones y altura y que se vieron superados superiormente por la corriente de flujos, rebosando por encima. Quedando colmatados en toda su altura, recogiendo

estos 40m^3 , 60m^3 y 50m^3 la barrera estática lateral. Las estructuras de retención se deformaron por el empuje del peso acumulado pero no se llegó al extremo de la rotura, demostrando ser una solución funcional, simple y muy rápida de ejecutar.

El volumen total acumulado en las barreras en el barranco y sobre la vía del tren se estimó entre 200 y 250m^3 de material de arrastres

Inspeccionada la ladera al día siguiente, se detecta un gran depósito de material acumulado en la parte alta del valle, obturando parcialmente el camino superior, hecho que evidencia el movimiento global de material en toda la ladera. A la vez, se identifica una segunda corriente de flujos y gran movilización de material en la obra de drenaje en el PK13+400 que terminó obturando parcialmente una gran obra de drenaje de FGC y la carretera C-15, llegando el cono del depósito hasta el cauce del Torrent de l'Anoia. Se movilizaron alrededor de 300m^3 de tierras.

Ante la colmatación de las estructuras y la obturación parcial de la obra de drenaje se iniciaron de inmediato las labores de desescombro y retirada de tierras para dejarlas operativas nuevamente con el menor tiempo posible. Las dificultades de acceso a la torrentera del PK13+500 obligaron a trabajar con excavadora retro-araña, creando un acceso desde la pista superior. Las estructuras embudo fueron vaciadas desescombrando el material hacia la vía sobre dumper, para su retirada de zona de vía.



Figura 7. Vista de las barreras embudo y estática colmatadas de material tras el episodio de lluvias torrenciales del 22 de octubre de 2019. Talud geomalla reforzada.

4. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN: SEGUNDA FASE

La solución propuesta y que se ejecutó con carácter de emergencia después del incendio resultó adecuada en tipología, pero el evento excedió su capacidad de retención, por lo tanto, se plantea una ampliación de las estructuras de protección en el mismo sentido de la obra de emergencia.

La estrategia de protección está dirigida a diferentes tipologías de actuación:

- Actuaciones en la parte baja de la ladera: barreras en la parte baja de la ladera en diferentes secciones del torrente para ampliar la capacidad de retención de las protecciones anteriores, con una tipología de obra similar.
- Barrera debris a pie de terraplén de la pista forestal.
- Actuaciones en la pista forestal: reforma de la pista forestal para controlar la dispersión del flujo en el barranco y evitar que en atravesar la pista forestal se disperse y vierta ladera abajo en diferentes puntos

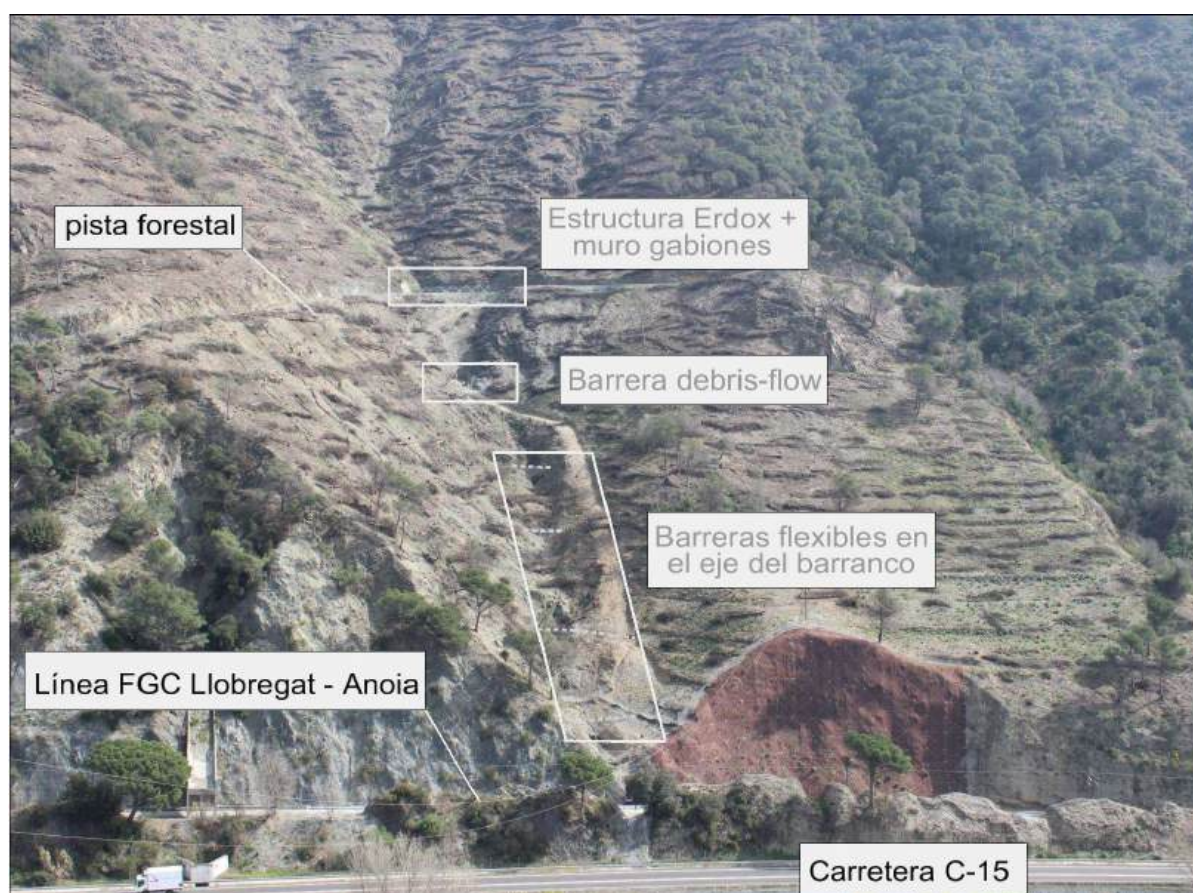


Figura 8. Representación de la situación de las actuaciones de protección en la ladera afectada por el incendio y posterior episodio de lluvias torrenciales

Barreras flexibles en el barranco

Se instala una línea de barrera flexible intercalada entre las barreras instaladas durante la primera fase de la emergencia, y tres líneas por encima barranco arriba. Se trata de barreras construidas con la misma tipología, con cables longitudinales espaciados 50 cm y forrado con doble capa de malla de triple torsión. La barrera inferior adaptada a la sección del barranco, presenta un área de 16 m² y las barreras superiores unas áreas de 11 m², 9 m² i 11 m².

En el lateral de la ladera para evitar la aportación del material removido por la apertura de la pista de acceso a la parte baja del barranco se instala una barrera estática oblicua.



Figura 9. Barreras flexibles tipo embudo instaladas en el eje del barranco en la parte baja de la ladera

Barrera debrís

A partir de los datos de campo y las características de la cuenca se determina que en el barranco de estudio se pueden producir flujos de tipo debrís flow según *A Wilford et al. (2004)*

Se plantea la instalación de una barrera debrís a pie del terraplén de la pista forestal.

La barrera debrís debe dimensionarse para soportar la carga dinámica, que se produce en el momento en el que la estructura recibe el impacto del flujo, pero también tiene que soportar la carga estática debida al material acumulado y la carga de arrastre, que se produce una vez la barrera se ha rellenado completamente y el caudal vierte por encima de la estructura. (*Maccafferri 2015*)

En la ladera de estudio las fuerzas que actúan sobre la estructura y que se transmiten a los anclajes son bajas teniendo en cuenta las dimensiones del flujo. Los esfuerzos y la deformación se distribuyen después del impacto del flujo en una amplia zona, que puede llegar a ser 10 veces más grande que una zona afectada por el impacto de una única roca. Teniendo en cuenta la misma energía de impacto, las barreras de debrís se deforman menos que las barreras dinámicas de caída de rocas. Los disipadores de energía se pueden activar ya sea con carga pseudoestática como con una carga dinámica.

El valor de la presión de impacto incluye tanto la componente estática como la dinámica de la presión, por lo tanto, el valor de presión máxima para dimensionar la barrera es la suma de las dos.

Se instala una barrera de debrís flow con una presión máxima admisible de 80 kPa. Para cubrir el ancho del barranco en este punto a pie del terraplén es necesario una longitud de 16m, con una altura de la barrera de 3m. En estas condiciones la barrera se fija sobre dos postes situados en el barranco, formados por perfiles tipo HEB que se montan a una placa base a través de una articulación. La barrera también se instala con una disposición en forma de ala del cable superior para asegurar una sección de desguace bien definida.



Figura 10. Barrera de protección contra debris flow a pie del terraplén de la pista forestal

Actuaciones en la pista forestal

A raíz de las afectaciones producidas a nivel de la pista forestal se evidencia la necesidad de conducir las aguas provenientes de los dos barrancos que confluyen en este punto, atravesando la pista hacia el barranco.

En este punto el objetivo de las actuaciones es evitar que el flujo se desvíe por la pista forestal, donde produce una fuerte erosión por la circulación de la escorrentía superficial y también desborda descontroladamente por otros puntos a lo largo de la pista llegando a la vía del tren.

Aunque la pista representa un cambio de la pendiente en el curso del barranco y por lo tanto es una zona de acumulación natural del material arrastrado, se instala una barrera de retención de este material llegado de la mitad superior de la ladera, evitando que invada la pista dejándola impracticable. Para evitar la saturación del material, es importante que el sistema permita el drenaje, así se evita la sobrepresión por el posible exceso de peso originado por el agua.

Se instala una barrera estructura Erdox (*Maccafferri 2015*) para la protección contra debris flow, que está especialmente diseñada para ser una barrera filtrante y destaca por su facilidad de montaje y capacidad de drenaje. Para cubrir todo lo ancho de los dos barrancos que llegan a este punto se instalan 6 módulos Erdox colocados en posición horizontal, con unas dimensiones de 360 x 310 cm.

La estructura frontal en forma de cruz está formada por una malla cuadrada de cable de acero de 8cm de diámetro, sostenida por otra de perimétrica, anclada sobre bigas HEB en forma de cruz. Los esfuerzos se transmiten a la cimentación a través de un mástil tubular de acero, de longitud variable entre 3 i 6 m y que está conectado al nodo central mediante una articulación esférica. La estructura tiene una red al lado exterior del panel frontal y superpuesta una doble capa de malla de triple torsión.

Para el cierre al extremo superior se construye un cierre con un pequeño muro de gaviones, para dejar un acceso para el mantenimiento y vaciado de material acumulado detrás del muro.



Figura 11. Barrera con estructuras Erdox y cierre con muro de gaviones en la pista forestal para conducir el curso del torrente

5. RESTAURACIÓN PAISAGÍSTICA

Finalizadas las actuaciones de contención y retención, se llevaron a cabo los trabajos de revegetación y reforestación de la zona afectada por el incendio. En una primera fase se realizó la de tala del abundante arbolado, dejándose los troncos a modo de barrera natural, perpendiculares a la dirección de caída de la ladera. Conjuntamente, con el abundante ramaje, se utilizaron para realizar fajinas, disipadores y sedimentadores de los finos de arrastre. Para el sostenimiento de las barreras naturales se realizaron gran número bulones al terreno con barras gewi de $L=2m$.

Posteriormente se realizaron actuaciones de reforestación de diversas variedades arbustivas y encinas.

6. MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAS

Complementariamente a las actuaciones de protección en la ladera FGC promovió una actuación de instalación de un sistema de detección automática de desprendimientos en laderas de la línea Llobregat – Anoia de los Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya.

La estrategia de monitorización tiene por objetivo aportar una seguridad complementaria que actúa en el sentido de la anticipación a la incidencia. Así como la protección estructural aporta una seguridad a la infraestructura ferroviaria, un sistema de detección de incidencias y alerta aporta una seguridad adicional a la circulación ferroviaria, orientada a evitar descarrilos, detectando la incidencia en el momento en que ocurre y evitando que esta se traslade a la infraestructura o elementos móviles que circulan por ella.

Este sistema de detección se instaló en las barreras embudo en la parte baja del barranco, de modo que un impacto detectado en estas barreras active en modo aspa el semáforo en la vía del tren.

También en abril de 2024 se instalan en la barrera debris por debajo de la pista forestal y en un extremo de la barrera estática oblicua en la parte baja de la ladera un dispositivo Guard de la casa Geobrugg (*Denk et al 2023*).

Se trata de un pequeño dispositivo que funciona de forma inalámbrica, instalado en un cable de la barrera que está equipado con una serie de sensores que miden tanto los impactos dinámicos y proporcionan información sobre la fuerza del impacto de un evento como las cargas estáticas que proporcionan información sobre el grado de relleno de la barrera. Además, incorporan también un sensor de corrosión que permite estimar la vida útil restante de la estructura. Los datos transmitidos de los sensores se muestran en una plataforma en línea y proporcionan la información sobre el estado actual de la estructura de protección.



Figura 12. Dispositivos de monitorización en las estructuras instaladas en el barranco. a) Sistema de detección automática aspa-flecha en las barreras embudo b) Dispositivo Guard de Geobrugg instalado en la barrera debris

7. ESTADO ACTUAL

Durante los 5 años posteriores no ha habido lluvias de intensidad parecida y las protecciones se encuentran apenas reteniendo algo de pequeño material acumulado. Se ha visto favorecido por la rápida colonización arbustiva de la zona, que ha revegetado abundantemente.

En 2020, el temporal Gloria dejó en Catalunya precipitaciones totalmente excepcionales en un mes de enero. En esta zona la estación meteorológica más próxima de Hostalets de Pierola registró solo 63,1 mm en 2 días, sin registrarse incidencias.

En abril del mismo año 2020 se registra un episodio de precipitaciones persistentes con afectación generalizada en Catalunya. En la estación de Hostalets de Pierola se recogieron 121,4mm entre los días 18 a 23 de abril, destacando los 52,3 mm acumulados solo el día 21.

Queda pendiente por parte de FGC acometer la obra de un drenaje transversal en la zona de vía para poder drenar un episodio de semejantes características.

8.CONCLUSIONES

A raíz del incendio forestal del día 24 de julio de 2019 se ven afectados localmente la ladera y el talud de la vía del tren y de la línea Llobregat – Anoia de FGC en el PK 10+400.

La ladera afectada hasta el momento tenía asignada una peligrosidad muy baja de desprendimiento de rocas y deslizamientos y no había registrado ninguna incidencia. La problemática aflora después del incendio, ya que en estas condiciones el terreno se convierte en muy sensible a la erosión en eventos torrenciales de lluvias intensas, por los materiales que lo constituyen, con un macizo altamente fracturado y meteorizado, así como por la pendiente de la ladera. El hecho de no existir un drenaje transversal operativo a la salida de la cuenca del drenaje implica una alta afectación a la vía del tren, donde fácilmente se depositaría el material arrastrado por el barranco.

En un contexto de calentamiento global que favorece los procesos de aridización y precipitaciones de mayor torrencialidad, siendo también la zona prelitoral catalán un área de elevada recurrencia de estos eventos, en conjunto se configura una situación favorable a la erosión y transporte de sedimentos.

Ante la sensibilidad en este punto frente a próximas lluvias con carácter torrencial se ejecutaron unas actuaciones en la ladera y el talud de la vía del tren, con carácter de obra de emergencia. Al final de la obra, el día 22 de octubre, se sucedió un episodio de lluvias torrenciales que sobrepasó la capacidad de retención de las protecciones y provocó el descarrilo de un convoy de pasajeros.

Considerando la incertidumbre en la magnitud de un nuevo evento y el importante volumen de material movilizable aún el barranco, se ejecutó en una segunda fase una ampliación de las estructuras de protección en el mismo sentido de la solución propuesta inicialmente, que resultó adecuada en tipología pero que el evento excedió en su capacidad de retención.

Estas actuaciones finalmente se complementaron con una monitorización de las estructuras de protección, con la instalación de un sistema de detección automática de desprendimientos aspa-flecha y sistemas Guard de la casa Geobrugg. Y queda pendiente por parte de FGC acometer la obra de un drenaje transversal en la zona de vía para poder drenar un episodio de semejantes características.

REFERENCIAS

- Calsamiglia, A ., Lucas-Borja, M.E ., Fortesa, J. García-Comendador, J ., Estrany, J (2017) Changes in Soil Quality and Hydrological Connectivity Caused by the Abandonment of Terraces in a Mediterranean Burned Catchment. *Forests*
- Denk, M ., Schultes, S. (2023) Geobrugg GUARD Use Guide. Remote monitoring for flexible Protection Systems
- García-Comendador, J ., Fortesa, J. Calsamiglia, A. Calvo-Cases, A ., Estrany, J. (2017) Post-fire hydrological response and suspended sediment transport of a terraced Mediterranean catchment. *Earth surface processes and landforms*
- Geobrugg AG. (2024) Manual Geobrugg GUARD
- Grangeon Thomas ., Vandromme Rosalie ., Cerdan Olivier ., De Girolamo Anna Maria. (2021) Modelling forest fire and firebreak scenarios in a mediterranean mountainous catchment : Impact on sediment loads. *Journal of Environmental Management* 289 (2021) 112497
- Lucas-Borja, M.E ., Calsamiglia, A ., Fortesa, J. (2018) The role of wildfire on soil quality in abandoned terraces of three Mediterranean micro-catchments. *Catena* 170 (2018) 246-256
- Maccaferri MAC.RO.System- Barriers DF. Barriers for impact of deformable masses
- Maccaferri (2015) Erdox. Fascicolo tecnico
- Mariano Di Napoli ., Cannur Eroglu ., Bastian van den Bout ., Diego Di Nartine ., Hakan Tanyas ., Luigi Lombardo. (2024) Space-time modeling of cascading hazards : Chaining wildfires, rainfall and landslide events through machine learning. *Catena* 246 (2024) 108452
- Mayor, A.G ., Bautista, S ., Llovet, J ., Bellot, J. (2007) Post-fire hydrological and erosional response of a mediterranean landscape : Seven years of catchment-scale dynamics. *ScienceDirect*

- Petter Nyman ., Gary J. Sheridan ., Hugh G. Smith ., Patrick N.J. Lane (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology* 125 (2011) 383-401
- Xingyue, Li ., Jidong, Zhao ., Julian S.H. Kwan (2020). Assessing debris flow impact on flexible ring net barrier: A coupled CFD-DEM study. *Computers and Geotechnics*.
- Yong, Kong., Xingyue, Li., Jidong, Zhao. (2021). Quantifying the transition of impact mechanisms of geophysical flows against flexible barrier. *Engineering Geology*.