

ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD DE PROCESOS TORRENCIALES MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS GEOMÁTICAS. APLICACIÓN A LA CUENCA EL REBAIXADER (PIRINEO CENTRAL)

**Marcel HÜRLIMANN^{1*}, Felipe BULL¹, Amparo NUÑEZ¹, Juan Ignacio LÓPEZ²,
Clàudia ABANCÓ¹, José MOYA¹ y Josep BONET¹**

¹ Dpto. Ing. del Terreno, Cartográfica y Geofísica.
Universitat Politècnica de Catalunya.

² Dpt. Procesos geoambientales y cambio Global.
Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC.

RESUMEN

Los procesos torrenciales como corrientes de derrubios o flujos hiperconcentrados pueden cambiar fuertemente la morfología de una cuenca vertiente, y las técnicas geomáticas son una herramienta ideal para determinar y cuantificar estos cambios topográficos. En la cuenca torrencial El Rebaixader se han aplicado láser escáner terrestre de larga distancia (TLS) y fotogrametría para crear diferentes modelos digitales de elevaciones, que se han comparado posteriormente entre ellos y con otros modelos existentes (por ejemplo mediante láser escáner aerotransportado).

Las primeras experiencias de TLS indican que esta técnica, que se ha aplicado con éxito en macizos rocosos para desprendimientos, es más difícil de utilizar en una cuenca vertiente donde afecta considerablemente la vegetación y las superficies irregulares e húmedas. Por otra parte, la fotogrametría ha podido aplicar sin grandes problemas. Finalmente, se ha podido estimar una tasa de erosión de aproximadamente 15000 m³ por año entre 1975 y 2012, que coincide bien con los datos medidos entre 2009 y 2012 en la auscultación in-situ.

1. INTRODUCCIÓN

Las corrientes de derrubios son procesos peligrosos, ya que pueden alcanzar velocidades muy altas, movilizar un importante volumen de sedimento y recorrer grandes distancias. A parte de este fenómeno, otros procesos como flujos hiperconcentrados, desprendimientos o deslizamientos pueden ocurrir en cuencas torrenciales de alta montaña. Todos estos procesos geomorfológicos pueden movilizar grandes volúmenes de material y producir cambios topográficos en el terreno.

En las últimas décadas, las técnicas geomáticas han avanzado fuertemente (por ejemplo el uso de Lidar o SAR) y su aplicación al estudio de movimientos de laderas ha aumentado considerablemente nuestros conocimientos sobre mecanismos, causas y la dinámica (p.e. Jaboyedoff et al., 2012). Sin embargo, existen muy pocos trabajos donde se han analizado los procesos torrenciales a escala cuenca vertiente mediante técnicas geomáticas (Bremer y Sass, 2012) y ninguno que ha investigado la estimación de volumen de los eventos o de la tasa de erosión.

Por ello, el objetivo principal del presente trabajo de investigación es la estimación de la tasa de erosión en una cuenca torrencial muy activa. Para cumplir este objetivo, se intenta determinar la magnitud de los eventos mediante diferentes técnicas.

2. LA CUENCA EL REBAIXADER

La cuenca El Rebaixader se encuentra en el Pirineo Central, cerca de la población de Senet (Alta Ribagorça, Lleida; Fig. 1) en el margen izquierdo del río Noguera Ribagorçana. La cuenca de drenaje tiene una superficie de aproximadamente 0.53 km² y está orientada al noroeste.

El sustrato geológico está formado por pizarras, recubiertas por un till, en el que se sitúa el área fuente de las corrientes de derrubios. El till está formado por el material erosionado y transportado por los glaciares existentes en los valles del pirineo durante la última glaciación, estos depósitos se caracterizan por estar formados por materiales granulares muy heterogéneos (Vilaplana, 1983). La presencia de estos materiales junto con las fuertes pendientes de la cuenca favorecen la presencia de las corrientes de derrubios. Estas corrientes y otros movimientos de masa han formado un gran escarpe en esta morrena lateral (Fig. 1).

La precipitación media de la zona se sitúa alrededor de 1200 mm/año. El régimen de precipitaciones de la zona de estudio está fuertemente influenciado por tres factores: la relativa proximidad al Mar Mediterráneo, el efecto orográfico de la propia cordillera y la influencia de vientos de oeste del Atlántico. Las corrientes de derrubios se forman principalmente por lluvia lluvias convectivas de verano, de alta intensidad y corta duración.

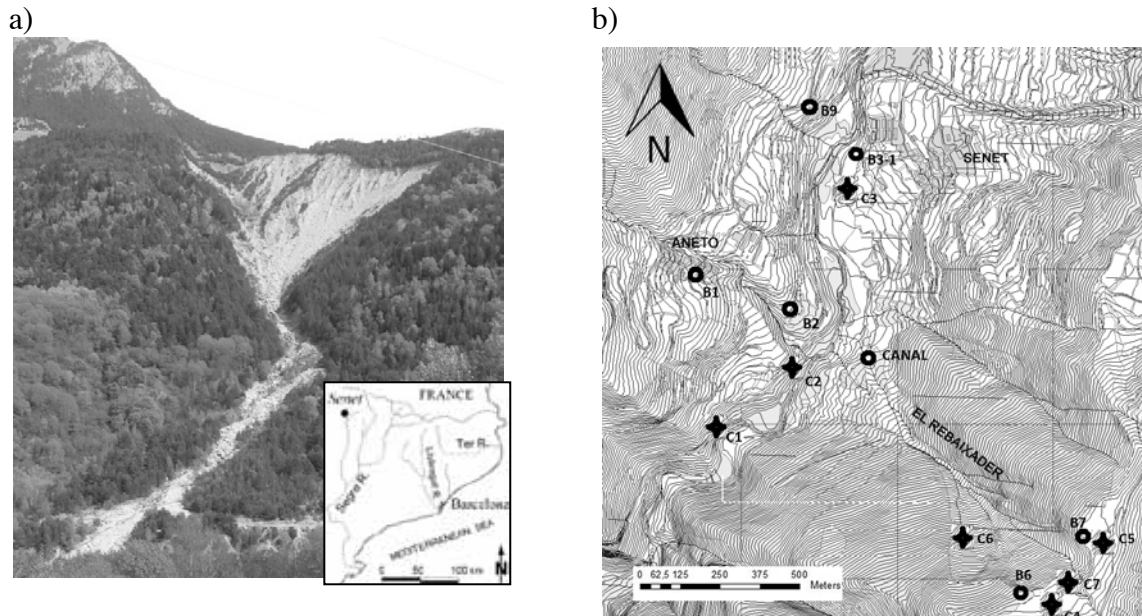


Figura 1. a) Vista general y situación del barranco El Rebaixader. b) Mapa topográfico incluyendo las bases del láser escáner terrestre (B) y de la verificación de los resultados(C).

La cuenca vertiente tiene su cota más elevada situada a unos 1710 metros de altura, con una anchura de más de 200 metros y el cono de deyección finaliza aproximadamente a la cota 1230, en la parte central de la cuenca se distingue claramente un canal de unos 200 metros de longitud i una anchura de 40 metros.

3. MÉTODOS Y DATOS

Los cambios morfológicos, que han afectado la cuenca, han sido analizados mediante diferentes técnicas geomáticas para un intervalo de tiempo entre 1975 y 2012, incluyendo: fotogrametría aérea, láser escáner terrestre (TLS) y láser escáner aerotransportado (ALS). Cada una de estas técnicas ha aportado un modelo digital de elevaciones (MDE) con diferentes características. A partir de los MDEs se han estudiado los cambios morfológicos para determinar una tasa de erosión global que se puede relacionar a la ocurrencia de corrientes de derrubios y otros procesos torrenciales. Las características de cada uno de los modelos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características y origen de los diferentes modelos digitales de elevaciones analizados (la resolución es tamaño de pixel del raster utilizado; ICC indica Institut Cartogràfic de Catalunya e IGN es Instituto Geográfico Nacional).

Fecha	Área / extensión	Resolución (m x m)	Técnica aplicada	fuelle	abreviatura
1975	toda la cuenca	2x2	Fotogrametría	Propia	MDE ₁₉₇₅
2005	toda la cuenca	5x5	Fotogrametría	ICC	MDE ₂₀₀₅
2006	cono deyección	1x1	ALS	ICC	MDE ₂₀₀₆
2010	toda la cuenca	5x5	ALS	IGN	MDE ₂₀₁₀
Agosto/Octubre 2011	toda la cuenca	2x2	ALS	ICC	MDE ₂₀₁₁
Mayo 2012	sólo zona activa	0.5x0.5	TLS	Propia	MDE _{2012.1}
Octubre 2012	sólo zona activa	0.5x0.5	TLS	Propia	MDE _{2012.2}

3.1 Láser escáner

La obtención de Modelos Digitales de Superficie (MDS) empleando TLS está cada vez más extendida. Existen diferentes tipos de sensores, atendiendo a su clasificación en función de la forma de obtener las coordenadas de los puntos medidos, se puede diferenciar: triangulación óptica, medida de diferencia de fase y tiempo de vuelo. Que irían de mayor a menor precisión, de menor a mayor alcance y de mayor a menor velocidad de captura.

En el caso que nos ocupa se necesita un gran alcance por lo que se han de emplear sensores de tiempo de vuelo. Los cuales miden la distancia a partir del tiempo que tarda un fotodiodo en emitir y detectar una luz láser, de forma similar al proceso que utilizan los distanciómetros electrónicos. Permiten obtener la situación de puntos en el espacio con una precisión alrededor del centímetro para centenares de metros, capturando millones de puntos que definen ese objeto tridimensionalmente.

Al realizar levantamientos para la obtención de Modelo Digital del Tereno (MDT) la zona de estudio no se suele cubrir con un solo barrido, debiéndose realizar cambios de posición del sensor. La nube de puntos en cada escaneado se encuentra referida al propio sistema de referencia del sensor en cada estacionamiento, por lo se han de referenciar todas a un mismo sistema para tener el modelo completo y posteriormente georreferenciarlas si fuese necesario. La unión de las nubes se puede hacer de forma directa, cuando el sensor se puede estacionar y orientar como en el caso tradicional topográfico, en este caso la nube ya estaría georreferenciada. Pero también se puede realizar de forma indirecta, para ello es necesario la utilización de dianas o puntos muy bien definidos en las nubes de puntos que sean visibles en varios barridos y que permitirán el ajuste entre los diferentes conjuntos de datos. La georreferenciación se realiza a partir de las coordenadas de las dianas o puntos de control.

En el caso que se presenta se han realizado dos campañas empleando dos sensores diferentes. En la primera de ellas realizada en mayo del 2012 se utilizó el HDS880 de Leica que tiene rango nominal de escaneado de hasta 1400m a roca, con una ventana de captura de 80° V y 360° H, precisión 20mm a 1000m y 0.01° angular. En la segunda se empleo el LPM321 de Riegl con un rango nominal de escaneado de hasta 6000m, una ventana de captura de 150° V y 360° H, precisión 25mm a 50m y 0.009° angular.

En la primera campaña se realizó el barrido de la zona de estudio desde 8 bases. El instrumento empleado es estacionable y orientable, introduciendo las coordenadas del punto de estación y del punto visado, por lo que la georreferenciación es directa.

Desde estas 8 estaciones se debería haber cubierto toda la zona, pero posteriormente se vio que debido a la menor reflectividad de la superficie en algunas de las zonas superiores, correspondientes a las cárcavas, hay vacíos en los datos.

Una vez en gabinete se dio color a la nube de puntos pero, debido a la baja resolución de la cámara interna del sistema, se comprobó que ésta no era de calidad. Antes de proceder a la unión de las nubes de puntos capturadas en campo se realizó la limpieza de puntos erróneos, causados principalmente por la niebla y lluvia presente durante la captura. También se realizó el filtrado de la vegetación en función de la diferente reflectividad de ésta respecto a la superficie del terreno. Esta labor se tuvo que finalizar de forma manual. Se crearon polígonos que delimitan tanto la zona de estudio como aquellas con una alta ocupación por parte de vegetación.

En la segunda campaña las diferentes nubes de datos se unieron y georreferenciaron gracias a los prismas reflectantes situados en las bases de coordenadas conocidas. En este caso se estacionó en 5 bases 3 de ellas coincidentes con las anteriores. Se colocó una nueva base que permitía una mejor toma de la zona de cicatriz y otra que permitiera una captura con más detalle del canal.

En este caso y debido al movimiento del sensor en una de las bases se tuvo que realizar un proceso de unión de la nube con el resto atendiendo a la superficie y no a los prismas.

Al estar ambas nubes georreferenciadas se puede realizar la comparación de ellas de forma directa. Pero al tener diferente resolución en las diferentes zonas es necesario crear previamente una malla regular, en este caso se seleccionó un paso de malla de 25cm. De esta forma posteriormente se puede calcular la diferencia de volúmenes en los prismas creados entre ambas superficies (Schürch et al., 2011).

En el caso del ALS el sensor sigue el mismo principio de medida de distancias. El láser emite pulsos y se determina el tiempo que tarda el pulso en rebotar y volver al sensor, pero en este caso se pueden recibir varios pulsos (Baltsavias, 1999) conocidos como primer y último rebote, siendo este último el que determina el MDT. El barrido se realiza mediante un espejo que desvía el rayo de forma que se cubre el terreno en la dirección perpendicular al avance del avión. Para el posicionamiento del sensor y

georreferenciación de las nubes de puntos se emplean sistemas inerciales (INS) y receptores GNSS tanto en el avión como en tierra para posteriormente realizar un posicionamiento mediante un método diferencial.

Empleando este tipo de sistemas tenemos que tener muy en cuenta que la altura de vuelo condicionará la densidad de puntos obtenida y la calidad de estos, ya que junto con el ángulo de incidencia es lo que definirá la huella del rayo contra el objeto. Las mallas obtenidas generalmente tienen una densidad de entre 1 y 2 ptos/m².

La zona de la que se quiere obtener el MDT o MDS se cubre mediante pasadas, como en el caso fotogramétrico, siendo recomendable que existan pasadas cruzadas como comprobación. En nuestro caso disponemos la malla 2x2 m facilitada por el ICC y obtenida a partir de un vuelo con el láser escáner Optech ALTM 3025.

3.2 Fotogrametría

De forma análoga al caso de captura de datos 3D con sensores láser escáner la fotogrametría permite la captura de información espacial desde la superficie terrestre o desde plataformas aéreas (Kraus, 2007). En el primer caso encontramos los inconvenientes propios de la perspectiva: ocultación de elementos por otros, grandes diferencias de distancia, superficies muy oblicuas en relación a los ejes de toma... En el caso aéreo estos problemas se ven minimizados: se tiene una visión completa de la superficie del terreno, la distancia es similar, la superficie es perpendicular al eje óptico de la cámara.

En el caso de estudio se dispone de información espacial obtenida por fotogrametría a escalas medias y pequeñas (a partir de 1/20000) que han permitido obtener como productos derivados MDE, de alturas conocidas con un paso de malla de 1, 2 y 5 metros.

También se ha tenido la posibilidad de trabajar con fotogramas a escala 1/20000 del año 1975 efectuados por la empresa *AFSA*, válidos para obtener un modelo a escala 1/10000. Todos los datos fueron cedidos por el ICC.

El modelo fotogramétrico se ha obtenido después de orientar 3 fotografías (números 1015901001464660-61-62) efectuados a 5000 m de altura, con un recubrimiento longitudinal del 70% aproximadamente, pertenecientes a una pasada con orientación Este-Oeste. Se han utilizado un total de 9 puntos de control obtenidos a partir de la identificación de detalles, tanto en las fotografías como en la cartografía del ICC, al no disponerse de coordenadas de puntos de control tomados para este trabajo cartográfico, ni tener la posibilidad de conseguir los datos de orientación de las cámaras (por aerotriangulación o por apoyo continuo). La altura media del terreno es de 2000 m, siendo el desnivel que se presenta en la superficie cubierta por las fotografías de casi 1200 m.

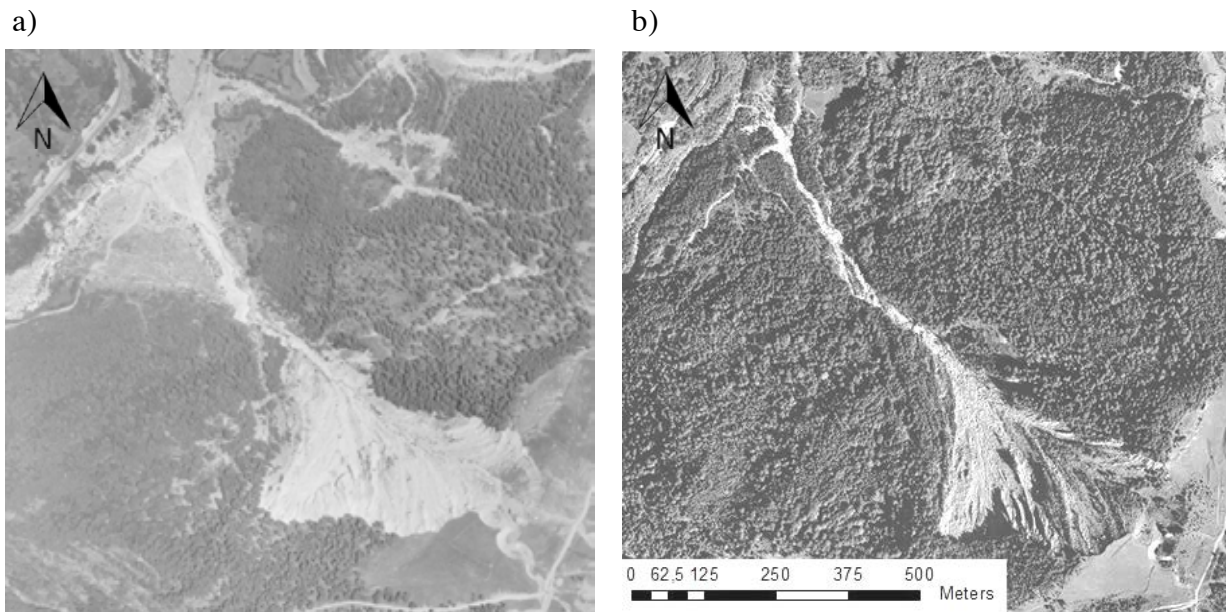


Figura 2. a) Zona del fotograma central de la zona de estudio del vuelo de 1975. b) Ortofoto actual.

Las fotografías se efectuaron con una cámara Leica modelo RC30 de focal 152.96 mm, con una altura media sobre el terreno de 3000 m, digitalizadas a un tamaño aproximado de 17000 columnas y 16000 filas, con una resolución de 25 $\mu\text{m}/\text{píxel}$. El programa escogido para la orientación y obtención del modelo es el software Image Master de TOPCON, debido a las posibilidades de trabajo que presenta. Para la orientación relativa se midieron más de 60 puntos de control menor, haciéndolos coincidir con detalles bien definidos en las fotografías y distribuidos de forma homogénea en toda la superficie de la segunda fotografía. Se midieron los mismos puntos en las tres fotografías siempre que fue posible, de esta manera se consigue formar un bloque que tendrá una mejor solución. Finalmente se midieron 7 puntos de control de apoyo en terreno, desechando 2 puntos por sobrepasar la tolerancia impuesta (1 m). Después del ajuste en bloque de los fotogramas se consiguieron las orientaciones de las tres posiciones de cámara, así como las coordenadas de los puntos de vista y apoyo menor. La resolución espacial conseguida en el terreno es de 0.50 m en planimetría, con σ de 0.40 m tanto en planta como en altura (X, Y y Z), con un residuo máximo de -0.97 m, 0.70 m y 0.52 m en X, Y y Z respectivamente.

Finalmente se restituyeron las líneas de ruptura, que en este caso se limitaron a la cabeza del talud y a la línea de vaguada, y se creó un modelo por correlación automática con un paso de malla de entre 0.50 y 0.60 m, y un total de 900000 puntos, de los cuales 300000 corresponden al modelo de estudio. Se editaron y desearon aquellas partes del modelo

que correspondían con cubiertas vegetales o puntos mal correlados. A partir de este modelo se pueden obtener otros derivados con paso de malla homogéneo y coincidentes con los obtenidos por láser escáner o MDE actuales a partir de fotogrametría.

3.3 Auscultación in-situ

Los resultados obtenidos mediante técnicas geomáticas se han comparado con los datos registrados en el sistema de auscultación in-situ. Los sensores instalados se pueden agrupar en dos conjuntos: 1) unos están relacionados con la formación de corrientes de derrubios, y 2) otros están instalados para observar la dinámica de flujo.

Para el presente trabajo, se han utilizado datos de los sensores relacionados a la dinámica de flujo, con el objetivo de estimar el volumen de cada evento observado. Para esta tarea se han estudiado los datos de los geófonos, que miden la vibración del terreno generada por los procesos, un sensor de ultrasonidos, que mide el calado del flujo, y una videocámara.

Con toda esta información auscultada se ha podido estimar el volumen, V , de cada proceso torrencial. Finalmente, se han estimado el volumen para 6 corrientes de derrubios, 11 flujos hiperconcentrados y 4 desprendimientos que han ocurrido entre agosto 2009 y octubre 2012.

4. RESULTADOS

Antes de analizar los cambios morfológicos y calcular los volúmenes de erosión o acumulación entre dos MDEs, se ha realizado una verificación de los MDEs mediante diferentes zonas de control. Para realizar el control se han comparado todos los MDEs con el MDE₂₀₁₁ porque es el de mayor resolución de los que cubren toda la superficie. Estas zonas han sido localizados en carreteras, substrato rocoso o prados, donde el movimiento vertical ha sido insignificante (Figura 1), como se puede observar en la tabla siguiente no disponemos de estos valores para todos los MDE, esto es debido al menor alcance de algunos modelos o a que la poca resolución no permite tomar valores representativos. Los datos de los MDE tienen un cierto rango de variación, por este motivo no se ha hecho el control mediante puntos concretos y se intentado encontrar este rango de variación mediante la obtención de distintos valores en cada zona de control. Los resultados de esta verificación dan lugar a la tabla siguiente.

Tabla 2. Rango de valores obtenido en metros.

ZONA	MDE ₂₀₀₆	MDE ₂₀₀₅	MDE ₂₀₁₀	MDE _{2012.1}	MDE _{2012.2}	MDE ₁₉₇₅
C1	±0,1	-----	-----	-----	-----	-----
C2	±0,1	0,3 a 0,6	-0,5 a -0,2	-----	-----	-----
C3	±0,1	0,4 a 0,6	-0,5 a -0,4	-----	-----	-----
C4	-----	0,8 a 1,6	±0,2	-----	-----	-0,8 a -0,3
C5	-----	0,4 a 0,7	-0,4 a 0,2	±0,2	-----	-0,6 a 0,5
C6	-----	-----	-----	±0,3	±0,5	-----
C7	-----	-----	-----	-----	±0,4	-----

La verificación nos muestra que los MDE creados mediante Láser escáner (MDE_{2012.1} y MDE_{2012.2}) tienen una cierta variación de 0,5 metros alrededor de 0. Los modelos raster 5x5 (MDE₂₀₀₅ y MDE₂₀₁₀) muestran unos rangos de valores menos homogéneos (debido a la poca resolución que tienen la variabilidad de los valores es mucho mayor), con los datos obtenidos podemos concluir que la precisión está entre 0,5 y 1 metro. Los valores del Modelo de 1975 nos confirman la precisión alrededor de 1 metro que nos indicaba el programa de fotogrametría.

Se han realizado 4 comparaciones entre los modelos disponibles, la comparación consiste en "restar" el modelo más antiguo del más actual. Los modelos obtenidos de la comparación son los representados en la figura siguiente. Los valores negativos del raster obtenido nos indican erosión y los positivos acumulación, para obtener los volúmenes de erosión hemos calculado el volumen del modelo utilizando solo los valores negativos. Los resultados son los descritos en la tabla siguiente y visualizado en Figura 4a. Los valores de esta tabla nos dan una tasa de erosión media anual de casi 15000 metros cúbicos (14579 m³).

Tabla 3. Cambios de volumen calculado en dos MDEs diferentes y estimación de la tasa de erosión.

MDEs comparados	Erosión (m ³)	Intervalo (años)	Tasa erosión anual (m ³ /a)
MDE _{2012.1} vs MDE _{2012.2}	-14807	1	14807
MDE ₁₉₇₅ vs MDE ₂₀₁₁	-624028	38	16421
MDE ₂₀₀₅ vs MDE ₂₀₁₀	-79495	5	15899
MDE ₂₀₁₁ vs MDE _{2012.2}	-22376	2	11188

Los resultados obtenidos mediante la auscultación in-situ indican que los procesos torrenciales detectados entre Agosto 2009 y Octubre 2012 movilizaron masas con volúmenes muy pequeños (desprendimientos de 10 - 50 m³) a volúmenes grandes (corrientes de derrubios de 2100 m³ a 16200 m³). El volumen de cada evento y la suma anual y la media anual están ilustrados en Figura 4b mostrando una tasa de erosión media de aproximadamente 15000 m³ entre 2009 y 2012.

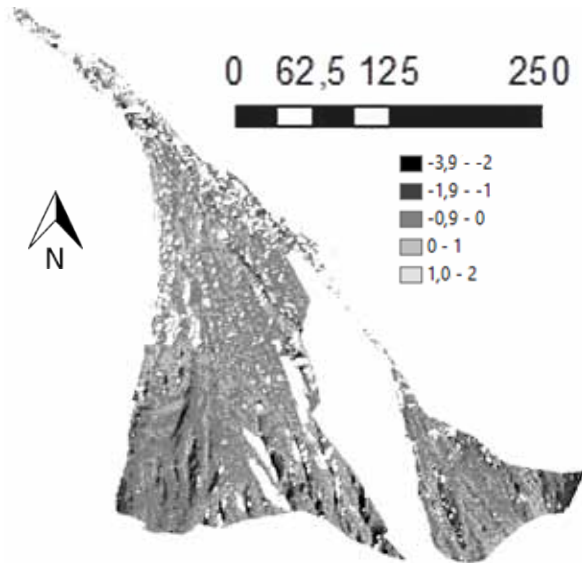
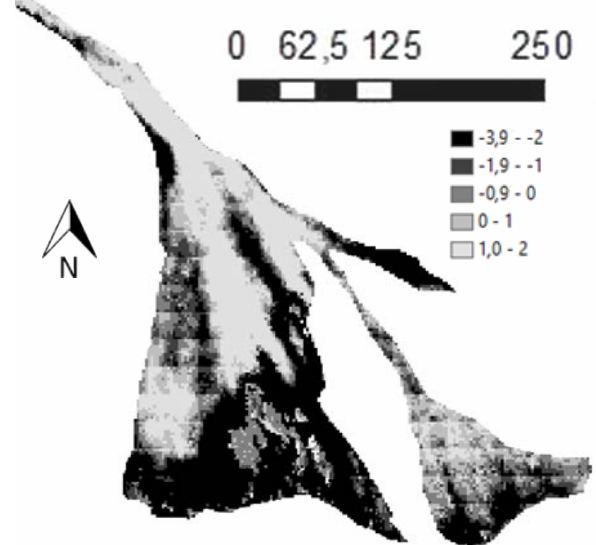
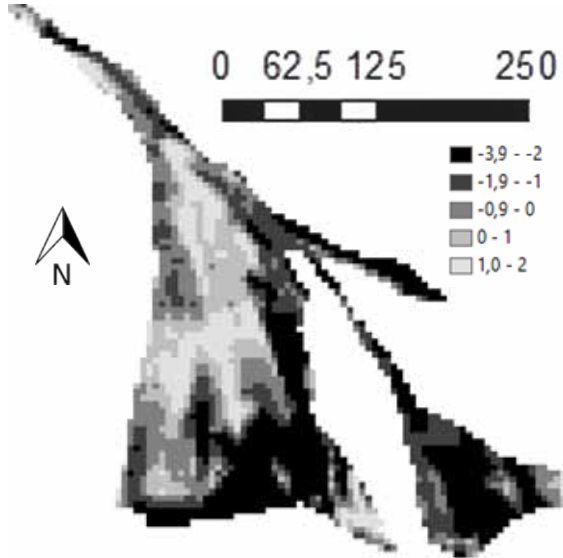
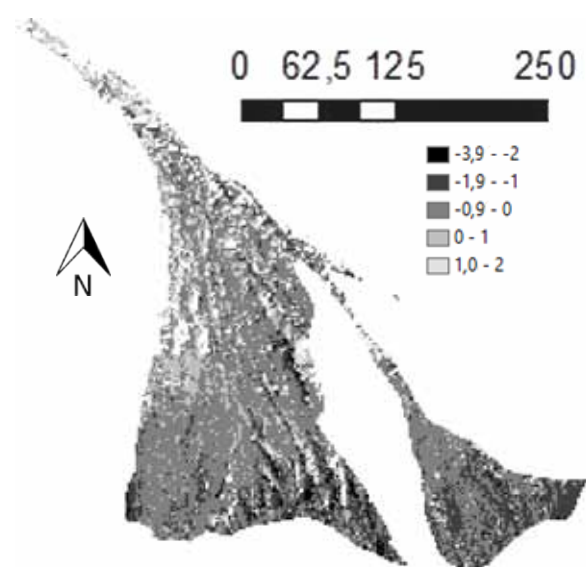
a) MDE_{2012.1} vs MDE_{2012.2} (0.5x0.5)b) MDE₁₉₇₅ vs MDE₂₀₁₁ (2x2)c) MDE₂₀₀₅ vs MDE₂₀₁₀ (5x5)d) MDE₂₀₁₁ vs MDE_{2012.2} (2x2)

Figura 3. Cambios morfológicos observados en diferentes MDEs. Ver Tabla 1 para las abreviaturas.

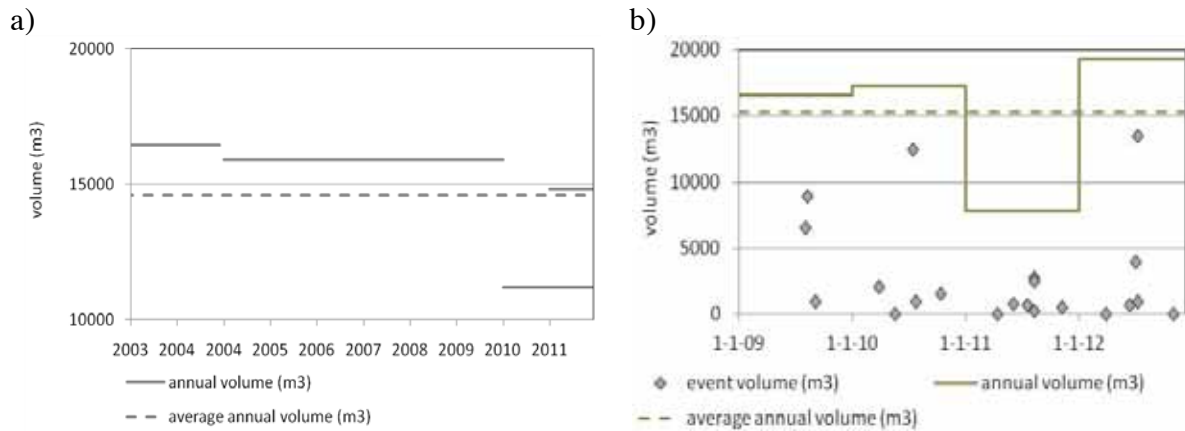


Figura 4. Resumen de la tasa de erosión estimada mediante técnicas geomáticas comparando diferentes MDEs (a) y mediante auscultación in-situ (b).

Finalmente, se han comparado los resultados obtenidos mediante técnicas geomáticas con los datos registrados en el sistema de auscultación in-situ. La comparación indica que los resultados son muy similares. Los datos geomáticos nos reflejan una tasa de erosión anual ligeramente inferior a 15000m^3 mientras que la auscultación nos da unos resultados un poco superiores a este valor.

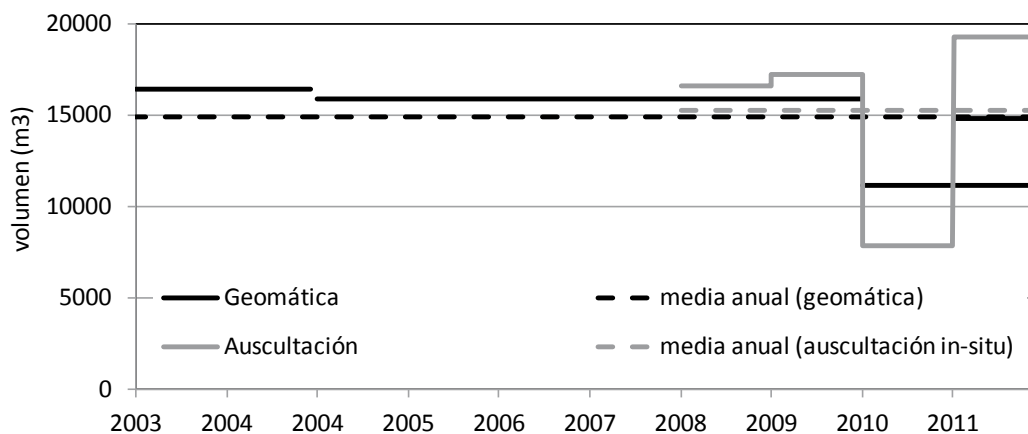


Figura 5. Comparación de las tasas de erosión calculadas mediante técnicas geomáticas y auscultación in-situ.

5. CONCLUSIONES

Se han calculado la tasa de erosión en una cuenca vertiente afectada por procesos torrenciales. Mediante técnicas geomáticas se han podido estimar cambios de volumen en los MDEs entre los años 1975 y 2012; y comparar estos resultados con la estimación de volumen que se ha obtenido de la auscultación in-situ del torrente.

A parte de diversos problemas en las dos campañas del láser escáner terrestre de larga distancia se han creado MDEs de alta resolución. La comparación entre estos dos MDEs y otros MDEs existentes ha revelado una tasa de erosión anual de aproximadamente 15000m³, que coincide bien con los datos medidos entre 2009 y 2012 en la auscultación in-situ.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido subvencionado por los proyectos nacionales DEBRIS-CATCH y DEBRISTART (CGL2008-00299/BTE and CGL2011-23300).

REFERENCIAS

- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 199–214.
- Bremer, M., Sass, O., 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology*, 138 (1), 49-60.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 1-24.
- Kraus, K., 2007. *Photogrammetry : geometry from images and laser scans*. 2a. Berlin: Walter de Gruyter.
- Schürch, P., Densmore, A.L., Rosser, N.J., Lim M., McArdell, B.W., 2011. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. *Earth Surf. Process. Landforms*, 36, 1847–1859.
- Vilaplana, J.M., 1983. Quaternary Glacial Geology of Alta Ribagorça Basin (Central Southern Pyrenees). *Acta Geológica Hispánica*, 18 ((3/4)), 217-233.