

Investigación

Aplicación del Láser Escáner Terrestre (TLS) y de modelos matemáticos para la modelización de conos de derrubios en la alta montaña templada.

Application of the Terrestrial Laser Scanning (TLS) and mathematical modeling models in debris cones in temperate high mountains.

José Juan de Sanjosé Blasco, Mariló López-González, Estrella Alonso-Pérez y Enrique Serrano

Revista de Investigación



Volumen XI, Número 2, pp. 031-046, ISSN 2174-0410

Recepción: 9 Ene'21; Aceptación: 1 Mar'21

1 de octubre de 2021

Resumen

Los conos de derrubios son una forma de relieve muy común en la alta montaña templada, siendo uno de los procesos periglaciales y nivales más representativos. En este artículo se analizan dos conos de derrubios (Cono A y Cono B) situados en la zona de “La Vueltona” en Picos de Europa. Los conos de derrubios tienen un comportamiento dinámico y su evolución se ha medido de forma ininterrumpida en los meses de agosto durante un periodo de 10 años (2009-2018) aplicando la técnica del Láser Escáner Terrestre (TLS). Para comprender la evolución lineal de los dos conos de derrubios se han realizado perfiles siguiendo las líneas de máxima pendiente del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del año 2009, y se han extrapolado estas líneas de perfiles para el resto de años de medición. Para la misma posición planimétrica (X, Y) a lo largo de los perfiles, y su evolución altimétrica durante los años (2009-2017), se ha calculado por métodos estadísticos la posición (Z) de esos puntos para el año 2018. Este valor estadístico se ha comparado con la información de la toma de datos en campo del año 2018. Los resultados de ambas coordenadas (Z), esto es la real de campo y la estadística son coherentes, dentro del margen de error propio de la toma de datos. Como interpretación a este estudio se puede indicar que el comportamiento de los dos conos de derrubios de La Vueltona tiene una dinámica ondulatoria siguiendo la línea de máxima pendiente, lo cual permite calcular mediante estadística su evolución en un plazo corto de tiempo.

Palabras Clave: Picos de Europa, conos de derrubios, Láser Escáner Terrestre, dinámica, modelización matemática.

Abstract

Debris cones are a very common landform in temperate high mountains, being one of the most representative examples of the periglacial and nival processes. This article analyzes two debris cones (Cone A and Cone B) located in “La Vueltona” in Picos de Europa. Their evolution was measured uninterruptedly throughout each August for 10 years (2009–2018) using the Terrestrial Laser Scanning (TLS) technique. The observations and calculations of the two debris cones were treated independently, but both showed the same behavior. Material falls onto the cones from the walls, and transfer of sediments follows linear trajectories according to the maximum slope. In order to understand the linear evolution of the two debris cones, profiles were created along the maximum slope lines of the Digital Elevation Model (DEM) of 2009, and these profile lines were extrapolated to the remaining years of measurement. In addition, the statistical predictive value for position (Z) in year 2018 was calculated for the same planimetric position (X,Y) throughout the profiles of maximum slopes. To do so, the real field data from 2009-2017 were interpolated and used to form a sample of curves. These curves are interpreted as the realization of a functional random variable that can be predicted using statistical techniques. The predictive curve obtained was compared with the 2018 field data. The results of both coordinates (Z), the real field data and the statistical data are coherent, within the margin of error of the data collection. As an interpretation of this study, it can be indicated that the behavior of the two debris cones of La Vueltona has an undulating dynamic along the maximum slope line, which allows to calculate statistically its evolution in a short period of time.

Keywords: Picos de Europa, debris cones, Terrestrial Laser Scanning, surface dynamic, mathematical modeling.

1. Introducción

En las montañas templadas los derrubios de ladera son muy frecuentes y generan amplios taludes y conos (Figura 1). Es uno de los mecanismos más rápidos de transferencia de sedimentos de la montaña y aunque su génesis está relacionada con las aportaciones desde las paredes, su funcionamiento dista de ser bien conocido en la actualidad. Sus características morfológicas y sedimentológicas dependen del volumen de material, la litología, la topografía, los procesos geomorfológicos involucrados y de la historia geomorfológica local [1] [2].



Figura 1. Vista general de los conos de derrubios de La Vueltona en Peña Vieja (Picos de Europa).

Actualmente, la dinámica de taludes y conos de derrubios activos en la alta montaña se interpretan en el marco de los ambientes paraglaciaros, como ajustes de las laderas tras la

relajación por la liberación de las presiones del hielo sobre las mismas, lo que favorece los desplazamientos en masa, las caídas de rocas desde las paredes y las modificaciones de los taludes de derrubios [3]. Los ambientes paraglaciaros implican tasas de erosión y transporte de sedimentos muy superiores a las habituales en montañas templadas, siempre condicionados directamente por la deglaciación. Recientemente, el control dinámico y térmico de los derrubios ha sido objeto de estudio en ambientes con “permafrost” (ártico y de montaña), donde el hielo en el suelo es el proceso fundamental en su dinámica [4] [5] [6] [7]. Las nuevas técnicas de observación y registro permiten un conocimiento más detallado de la dinámica de los taludes y conos [8].

2. Área de estudio y toma de datos

El Macizo Central de los Picos de Europa alcanza los 2.648 m, y la altitud y proximidad al Mar Cantábrico favorecen los procesos periglaciares. El relieve de los Picos de Europa se caracteriza por sus componentes morfoestructurales, el modelado kárstico y el glaciar, que con diferentes ritmos y edades, han conformado una alta montaña rocosa. En el Macizo Central existe el Grupo de Peña Vieja (2.614 m), el cual es el tercer grupo montañoso de Picos de Europa.

El Grupo de Peña Vieja ha sido remodelado por el glaciario generando circos colgados, artesas y complejos morrénicos bien conservados (Áliva y Lloroza) [9] [10]. Las paredes y fondos de valle han sido afectadas por el periglaciario, principalmente mediante el desarrollo de taludes y conos de derrubios. Estos conos de derrubios ocupan una amplia extensión y son muy representativos de la dinámica geomorfológica del Macizo [11] [12] [13]. Existen elementos funcionales y semifuncionales, en función de su distribución altimétrica y se distribuyen entre los 1.200 y los 2.600 m, de modo que los situados por encima de los 2.000 m son dominantes y plenamente activos.

En la zona de La Vueltona, se han seleccionado dos conos de derrubios, los cuales se asocian a las condicionantes morfoestructurales, que favorecen la presencia de una pared con materiales inestables de más de 400 metros, y a las condiciones morfoclimáticas, que dirigen los procesos gravitacionales, criogénicos o nivales a distintas altitudes. Para el análisis dinámico y los cambios superficiales de los dos conos de derrubios se ha empleado la técnica geomática del Escáner Láser Terrestre (TLS), durante un periodo continuado de 10 años (2009-2018). El instrumental utilizado ha sido la estación total “Image Station” (Topcon), con posibilidad de escaneado superior a los 1.000 metros de distancia y un error posicional del punto medido de 2 cm. La base de escaneado está en la ladera de enfrente de los conos de derrubios, a 900 metros de distancia del punto más alejado. Desde la base de escaneado se ha generado una malla de medición de 3x3 metros para los dos conos de derrubios y se ha empleado un sistema de coordenadas propio, pero ambos conos tienen el mismo origen de coordenadas (Figura 2).

Con la malla de puntos, se ha generado el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), basado en una Red Irregular de Triángulos (TIN), que permite calcular las variaciones espaciales anuales. Además, para conocer el comportamiento dinámico de los conos de derrubios se han establecido seis perfiles de máxima pendiente (año 2009) en cada uno de los dos conos de derrubios (Figura 2).

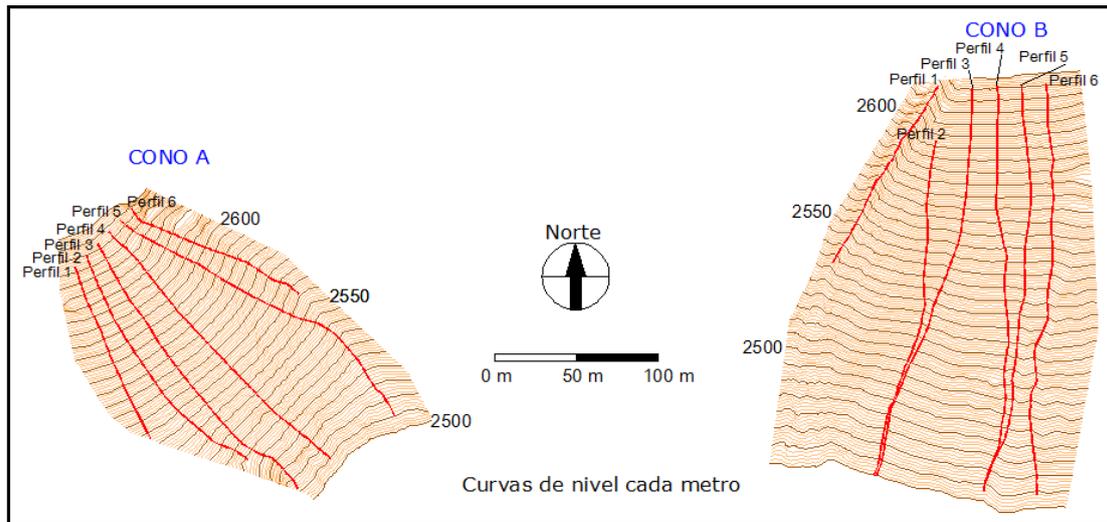


Figura 2. Situación espacial “real” entre los conos de derrubios (A and B) y representación de los perfiles de máxima pendiente sobre el MDE del año 2009.

Las rocas que componen los conos tienen un tamaño heterogéneo que no suelen superar los 30 centímetros, salvo en el Cono B que hay rocas de dimensión superior al metro. El MDE que se genera depende los puntos medidos, por ello se ha procedido a realizar el MDE de ambos conos dos veces durante la misma campaña de medición (año 2015) y se ha comprobado su diferencia. Las diferencias medias que tienen ambos modelos es de 10 cm, no superando en ningún caso valores de 20 cm, excepto en determinadas zonas (grandes rocas) del Cono B.

3. Resultados

Una vez se dispone de los diez MDE (uno por año) de los dos conos de derrubios para el periodo 2009-2018 se procede al cálculo dinámico mediante la interpretación de los perfiles de máxima pendiente.

Tabla 1. Valores de la altitud (en metros) para cada año (2009, 2010, 2011,...2018) para distancias de 1 metro. En esta tabla se indican los 10 primeros metros del perfil 3 (Cono B).

| Distancia (m) | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 2620,994 | 2620,982 | 2620,968 | 2621,074 | 2620,982 | 2620,995 | 2621,138 | 2620,876 | 2621,102 | 2621,023 |
| 1 | 2620,300 | 2620,287 | 2620,279 | 2620,391 | 2620,297 | 2620,307 | 2620,446 | 2620,210 | 2620,414 | 2620,309 |
| 2 | 2619,599 | 2619,593 | 2619,596 | 2619,708 | 2619,613 | 2619,619 | 2619,753 | 2619,533 | 2619,726 | 2619,584 |
| 3 | 2618,899 | 2618,898 | 2618,912 | 2619,025 | 2618,927 | 2618,931 | 2619,060 | 2618,855 | 2619,037 | 2618,860 |
| 4 | 2618,410 | 2618,204 | 2618,229 | 2618,342 | 2618,241 | 2618,243 | 2618,367 | 2618,165 | 2618,348 | 2618,135 |
| 5 | 2617,703 | 2617,510 | 2617,545 | 2617,654 | 2617,556 | 2617,554 | 2617,673 | 2617,431 | 2617,659 | 2617,431 |
| 6 | 2616,996 | 2616,815 | 2616,862 | 2616,954 | 2616,870 | 2616,866 | 2616,979 | 2616,736 | 2616,969 | 2616,766 |
| 7 | 2616,289 | 2616,122 | 2616,178 | 2616,254 | 2616,181 | 2616,177 | 2616,286 | 2616,066 | 2616,274 | 2616,101 |
| 8 | 2615,582 | 2615,442 | 2615,495 | 2615,554 | 2615,492 | 2615,508 | 2615,592 | 2615,393 | 2615,580 | 2615,434 |
| 9 | 2614,875 | 2614,762 | 2614,807 | 2614,853 | 2614,803 | 2614,840 | 2614,898 | 2614,721 | 2614,886 | 2614,764 |
| 10 | 2614,168 | 2614,083 | 2614,118 | 2614,137 | 2614,114 | 2614,173 | 2614,205 | 2614,048 | 2614,192 | 2614,094 |

El origen de los cálculos de la evolución de los conos es la generación de perfiles (Tabla 1), con la representación de la altitud para distancias separadas un metro con respecto a un origen

fijo. Ello se hace para cada año medido en cada uno de los perfiles de máxima pendiente (Figura 2). En general, la longitud total de cada uno de los perfiles es superior a 150 metros, como se puede ver en la figura 2. En general, la diferencia de altitud entre una medición anual y el resto de años no suele superar el valor de los 30 cm. La representación gráfica de los valores altimétricos queda expresada en los perfiles de máxima pendiente para cada año (Figura 3).

Como se ha indicado anteriormente, para cada cono de derrubios se han determinado 6 perfiles de máxima pendiente, y ello se ha hecho para los 10 años de observación, por tanto se dispone de 120 perfiles, con información de 24.000 puntos altimétricos, como los expresados en la tabla 1.

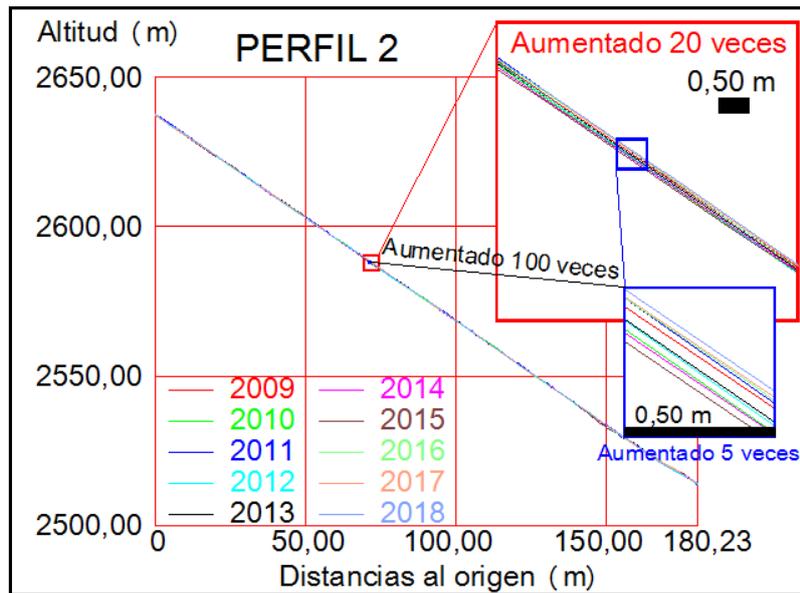


Figura 3. Representación de la evolución anual (2009-2018) del perfil 2 del Cono A. El cuadro azul está ampliado 100 veces con respecto al perfil.

Por tanto, partiendo de la información de cada perfil como la mostrada en la tabla 1, se emplea una metodología analógica (representación sobre una tabla “excel”) para ver la evolución e interpretar sus valores, y la técnica analítica (modelización matemática de la dinámica).

3.1. Metodología analógica

De la tabla 1 se han analizado las diferencias parciales o anuales de dos años consecutivos donde se ha restado el valor de la altitud de un punto del perfil para un determinado año, con el valor de la altitud del mismo punto del perfil del año anterior. Así, los periodos de los cálculos son: 2010-2009; 2011-2010; 2012-2011; 2013-2012; 2014-2013; 2015-2014; 2016-2015; 2017-2016 y 2018-2017. Si el valor resultante es positivo, se entiende que se ha depositado material rocoso y si el valor es negativo se ha erosionado. Como se indicó anteriormente, en general existen valores diferenciales de centímetros y son excepcionales los casos donde las diferencias son superiores a 30 cm (Figura 4). En la figura 4 se representa un perfil con intervalos de distancia de 10 metros y valores diferenciales de altitud respecto a una situación sin diferencias (0,00 m) de la medición del año anterior. Si en el perfil se ha ganado material de derrubios para un

intervalo de distancia de 10 m, entonces se indica con "A" (Arriba), pero si ha perdido material, entonces se pone "B" (Bajo). Esto se ha realizado para el mismo perfil, durante los periodos anuales, de manera que se obtiene la figura 5.

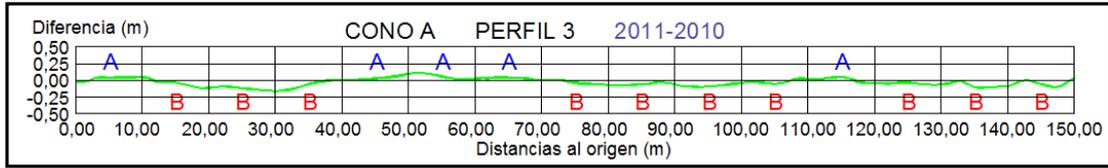


Figura 4. Ganancias (A) y pérdidas (B) entre la comparativa de dos años consecutivos (2011-2010) del perfil 3 del Cono A.

En la figura 5, se realizan líneas de evolución del perfil a lo largo de los años, así en color morado está la línea de evolución de acumulación a lo largo del perfil y en color amarillo la línea de las pérdidas. En todos los casos son evoluciones superiores a cinco años de forma consecutiva. Puede comprobarse que tanto la acumulación como la pérdida de material siguen la misma secuencia, esto es un retroceso o avance de 50 metros en 5 años o 60 metros en 6 años.

| Intervalos (m) | 2010-09 | 2011-10 | 2012-11 | 2013-12 | 2014-13 | 2015-14 | 2016-15 | 2017-16 | 2018-17 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0-10 | Red | Blue | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Red |
| 10-20 | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Red |
| 20-30 | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red |
| 30-40 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |
| 40-50 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |
| 50-60 | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue |
| 60-70 | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red |
| 70-80 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |
| 80-90 | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue |
| 90-100 | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red |
| 100-110 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |
| 110-120 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |
| 120-130 | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue |
| 130-140 | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red |
| 140-150 | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue | Red | Blue | Blue |

Figura 5. Evolución anual del perfil 3 (Cono A) para intervalos de distancias de 10 metros. Los valores de la figura 4 coinciden con la columna del periodo anual 2011-10.

Tanto en el Cono A, como en el Cono B se han seleccionado los perfiles 2, 3, 4 y 5 (Figura 2). Se ha realizado la comparativa de 9 perfiles como el obtenido en la figura 4 para cada uno de los perfiles de máxima pendiente.

También, se ha analizado el comportamiento de un año con respecto al año anterior y posterior, de manera que se han cogido tripletas de años. Así por ejemplo, se compara el perfil del periodo 2013-2012 con el perfil 2014-2013 (Figura 6). De igual modo, se precede con el resto de tripletas para cada perfil, quedando indicado en la figura 5, la tripleta 2014-13 con 2015-14 y la tripleta 2015-14 con 2016-15.

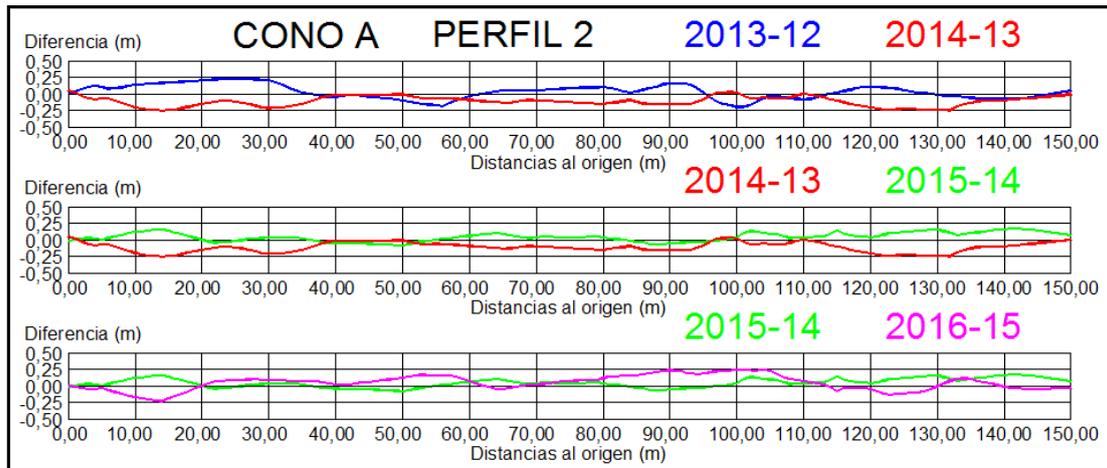


Figura 6. Representación perfil 2 del Cono A, por tripleta de años (2013-12 y 2014-13; 2014-13 y 2015-14; 2015-14 y 2016-15).

Este estudio nos permite analizar cómo se van compensando las pérdidas y ganancias de material a lo largo del tiempo. En general, los años que tiene pérdida queda compensado con el siguiente periodo anual. Pero no siempre ocurre esto, y ello es lo que provoca las tendencias lineales de la figura 5.

3.2. Modelización matemática

Para predecir los valores de los perfiles para el año 2018 se utilizan los datos de los conos de derrubios recogidos anualmente de los perfiles (Tabla 1) desde el año 2009 hasta el año 2017. Para estos cálculos se ha tenido en cuenta que, aunque los datos obtenidos en años anteriores forman un conjunto discreto de valores, realmente son valores pertenecientes a las curvas anuales que representan la evolución de un proceso continuo. Por la naturaleza del fenómeno, se considera que son adecuadas las técnicas introducidas en los últimos años para la predicción y análisis de datos funcionales [14] [15] [16].

Estas técnicas respetan la naturaleza continua del fenómeno en contraposición con las técnicas estadísticas aplicadas a datos multivariantes. Es decir, la muestra de datos que estaba formada por vectores, ahora está formada por curvas. Para el análisis predictivo se va a utilizar un modelo autorregresivo de primer orden, desarrollado por Bosq (2000) [14] y que está dado por la siguiente ecuación:

$$X_{n+1} = \Psi(X_n) + \varepsilon_{n+1}$$

Donde el error ε_{n+1} y las observaciones X_n son curvas. Ψ es un operador lineal que transforma una curva en otra curva.

Lo que se hará es obtener un estimador $\hat{\Psi}$ del operador Ψ (ajustado gracias al histórico de la muestra funcional $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$) y dar la predicción de X_{n+1} como $\hat{X}_{n+1} = \hat{\Psi}(X_n)$.

El operador funcional Ψ actuando sobre una curva X se considera un operador integral, es decir, de la forma:

$$\Psi(X)(t) = \int_0^1 \psi(t, s)X(s)ds$$

donde $\psi(t, s)$ es el llamado núcleo del operador.

Los diferentes métodos de predicción que existen en la literatura difieren entre sí en la elección del estimador del núcleo del operador $\hat{\psi}(t, s)$. Tras varias comparaciones iniciales, con diferentes estimadores del núcleo, se ha optado por la estimación denominada EK desarrollada en la sección 2 de Didericksen et al. (2011) [17] y con la que se obtiene muy buenos resultados.

Hay que realizar algunos cambios en la muestra original para poder aplicar el método mencionado. La muestra inicial de datos, en nuestro caso particular, está formada por valores discretos obtenidos anualmente en periodo de años 2009-2017. Los valores correspondientes a cada uno de esos años los distribuimos uniformemente en el intervalo $[0,1]$ y los interpolamos por splines formando 9 curvas que dan lugar a la muestra funcional $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9\}$.

Como ya se ha comentado en secciones anteriores, trabajaremos con las diferencias entre años consecutivos. Por otro lado, la muestra debe estar centrada, es decir, a cada curva se le resta la media muestral funcional. De esta forma partimos de una muestra funcional de 9 curvas $\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ con $X_i = (C_{i+1} - C_i) - \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 (C_{j+1} - C_j)$, con $i = 1, \dots, 8$.

A partir de la muestra $\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ obtenemos el estimador del núcleo del operador $\hat{\psi}(t, s)$, obtenemos la estimación del operador $\hat{\Psi}(X)$ y, por tanto, la predicción de X_{10} (año 2018) dada por $\hat{X}_9 = \hat{\Psi}(X_8)$.

Esta metodología puede ser aplicada a cualquiera de los perfiles de los que se han tomado datos. Por ejemplo, se ha aplicado al perfil 3 del Cono A (Figura 5) y al perfil 3 del Cono B y sobre los cuales se ha desarrollado el proceso analítico.

3.2.1. Análisis del perfil 3 del Cono A

La muestra $\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ está formada por las 8 curvas pertenecientes al espacio de Hilbert $L^2_{[0,1]}$ y están representadas en la Figura 7, siendo la predicción (año 2018) obtenida \hat{X}_9 , la que aparece en color rojo.

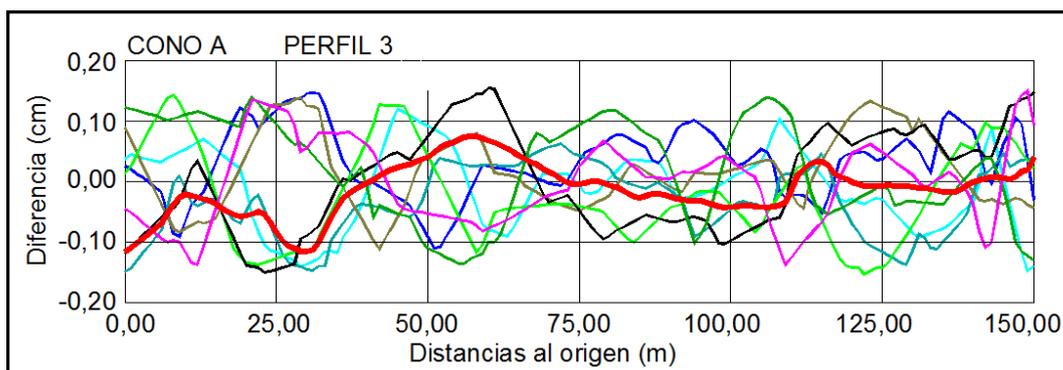


Figura 7. Representación predictiva (color rojo) del perfil 3 del Cono A.

Si a \hat{X}_9 le sumamos la media $\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 X_j$ se obtiene la predicción de la diferencia entre el año 2018 y 2017. Y por tanto sumándole los datos de 2017 podemos dar una predicción de los valores discretos de 2018.

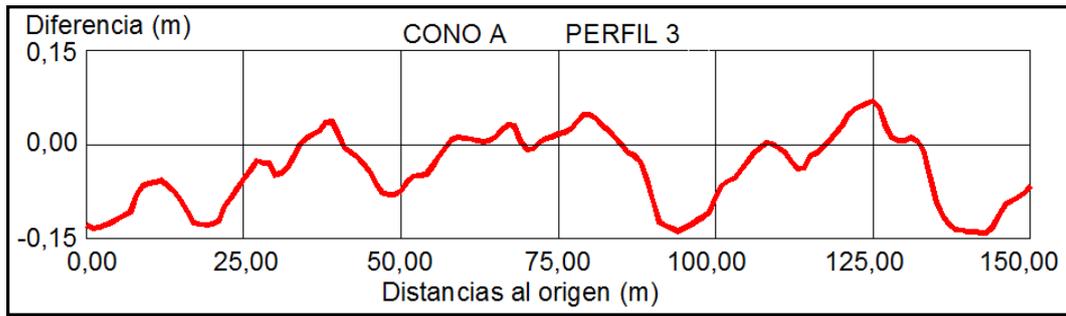


Figura 8. Representación de la diferencia de dos curvas: La curva obtenida como predicción del año 2018 y curva de los valores reales medidos del año 2018, del perfil 3 del Cono A.

Mientras tanto, por otra parte se disponen de los datos de campo para el año 2018. La figura 8 recoge la diferencia entre las gráficas de la predicción para el año 2018 ($f(t)$) y los datos reales medidos para el mismo periodo ($g(t)$) (Tabla 2). Como puede observarse en la figura 8, las diferencias para el perfil 3 del Cono A, y en general para los seis perfiles del Cono A no es superior a los 15 cm.

Tabla 2. Valores numéricos de la figura 8 sobre la diferencia entre los datos predictivos y los obtenidos en campo para el año 2018.

| Distancia (m) | Diferencia (m) |
|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| 1 | -0,138 | 26 | -0,041 | 51 | -0,058 | 76 | 0,019 | 101 | -0,065 | 126 | 0,058 |
| 2 | -0,133 | 27 | -0,025 | 52 | -0,049 | 77 | 0,026 | 102 | -0,057 | 127 | 0,027 |
| 3 | -0,128 | 28 | -0,029 | 53 | -0,048 | 78 | 0,036 | 103 | -0,054 | 128 | 0,010 |
| 4 | -0,124 | 29 | -0,029 | 54 | -0,047 | 79 | 0,047 | 104 | -0,039 | 129 | 0,001 |
| 5 | -0,118 | 30 | -0,047 | 55 | -0,034 | 80 | 0,046 | 105 | -0,026 | 130 | 0,003 |
| 6 | -0,112 | 31 | -0,046 | 56 | -0,019 | 81 | 0,046 | 106 | -0,013 | 131 | 0,011 |
| 7 | -0,106 | 32 | -0,035 | 57 | -0,004 | 82 | 0,029 | 107 | 0,001 | 132 | 0,004 |
| 8 | -0,087 | 33 | -0,017 | 58 | 0,008 | 83 | 0,021 | 108 | 0,001 | 133 | -0,009 |
| 9 | -0,065 | 34 | 0,001 | 59 | 0,011 | 84 | 0,012 | 109 | -0,008 | 134 | -0,047 |
| 10 | -0,062 | 35 | 0,009 | 60 | 0,010 | 85 | 0,001 | 110 | -0,004 | 135 | -0,087 |
| 11 | -0,059 | 36 | 0,016 | 61 | 0,008 | 86 | -0,011 | 111 | -0,012 | 136 | -0,113 |
| 12 | -0,057 | 37 | 0,020 | 62 | 0,006 | 87 | -0,017 | 112 | -0,027 | 137 | -0,125 |
| 13 | -0,066 | 38 | 0,035 | 63 | 0,004 | 88 | -0,027 | 113 | -0,038 | 138 | -0,134 |
| 14 | -0,076 | 39 | 0,046 | 64 | 0,006 | 89 | -0,054 | 114 | -0,037 | 139 | -0,136 |
| 15 | -0,087 | 40 | 0,016 | 65 | 0,012 | 90 | -0,087 | 115 | -0,016 | 140 | -0,138 |
| 16 | -0,106 | 41 | -0,029 | 66 | 0,022 | 91 | -0,123 | 116 | -0,012 | 141 | -0,143 |
| 17 | -0,123 | 42 | -0,012 | 67 | 0,032 | 92 | -0,129 | 117 | -0,003 | 142 | -0,148 |
| 18 | -0,138 | 43 | -0,019 | 68 | 0,029 | 93 | -0,133 | 118 | 0,004 | 143 | -0,146 |
| 19 | -0,155 | 44 | -0,038 | 69 | 0,005 | 94 | -0,138 | 119 | 0,018 | 144 | -0,131 |
| 20 | -0,128 | 45 | -0,043 | 70 | -0,018 | 95 | -0,133 | 120 | 0,030 | 145 | -0,113 |
| 21 | -0,121 | 46 | -0,061 | 71 | -0,006 | 96 | -0,128 | 121 | 0,046 | 146 | -0,094 |
| 22 | -0,098 | 47 | -0,076 | 72 | 0,004 | 97 | -0,121 | 122 | 0,055 | 147 | -0,089 |
| 23 | -0,083 | 48 | -0,079 | 73 | 0,010 | 98 | -0,112 | 123 | 0,060 | 148 | -0,091 |
| 24 | -0,069 | 49 | -0,078 | 74 | 0,012 | 99 | -0,106 | 124 | 0,065 | 149 | -0,079 |
| 25 | -0,055 | 50 | -0,072 | 75 | 0,017 | 100 | -0,079 | 125 | 0,068 | 150 | -0,066 |

Existen diferentes medidas de error entre la predicción de la curva obtenida por predicción y la real. Las más frecuentes son el error cuadrático medio funcional y promedio integral de la diferencia:

- El error cuadrático funcional medio que obtenemos es:

$$\frac{1}{151} \sqrt{\int_1^{151} (f(t) - g(t))^2 dt} = 0.081 \text{ m}$$

- El promedio integral de la diferencia es:

$$\frac{1}{151} \int_1^{151} (f(t) - g(t))dt = 0.051 \text{ m}$$

3.2.2. Análisis del perfil 3 del Cono B

Repitiendo el proceso anterior, se parte nuevamente de la muestra $\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$ que está formada por las 8 curvas representadas en la figura 9, donde la predicción \hat{X}_9 , obtenida, es la que aparece en color rojo.

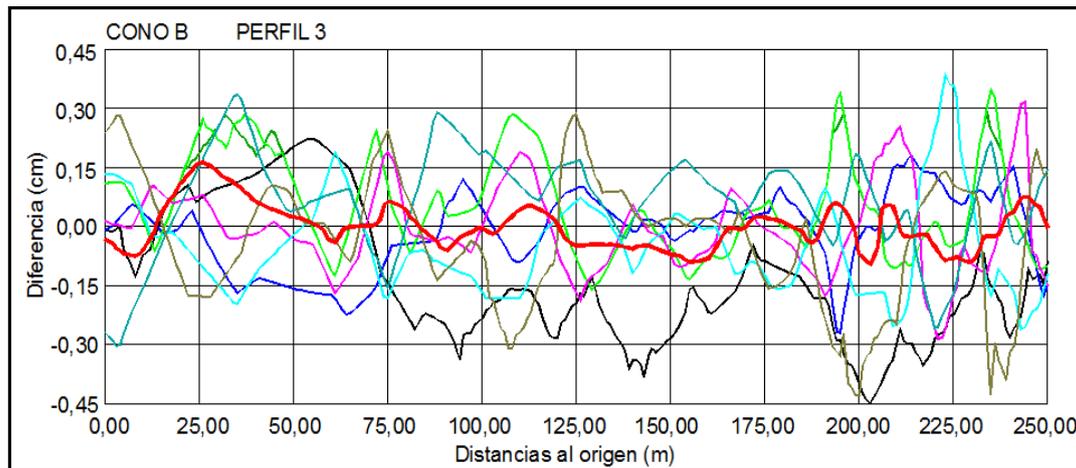


Figura 9. Representación predictiva (color rojo) del perfil 3 del Cono B.

Nuevamente, si a \hat{X}_9 le sumamos la media $\frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 X_j$ se obtiene la predicción de la diferencia entre el año 2018 y 2017. Y por tanto, sumándole los datos de 2017 podemos dar una predicción de los valores discretos de 2018. La figura 10 recoge la diferencia entre las gráficas de la predicción para el año 2018 ($f(t)$) y los datos reales medidos para el mismo periodo ($g(t)$). Como puede observarse en la figura 10, las diferencias para el perfil 3 del Cono B, no es superior a los 30 cm.

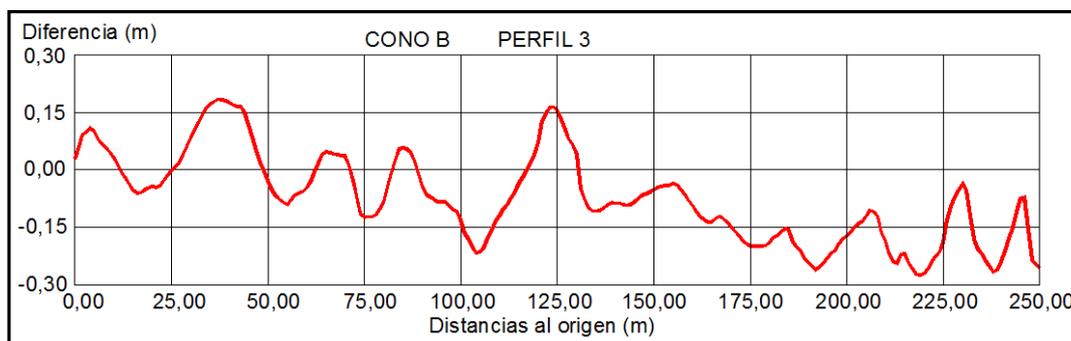


Figura 10. Representación de la diferencia de dos curvas: La curva obtenida como predicción del año 2018 y curva de los valores reales medidos del año 2018, del perfil 3 del Cono B.

Se vuelven a calcular las mismas medidas de error que en el apartado anterior, entre la predicción de la curva y la real, siendo:

- El error cuadrático funcional medio que obtenemos es:

$$\frac{1}{251} \sqrt{\int_1^{251} (f(t) - g(t))^2 dt} = 0.170 \text{ m}$$

- El promedio integral de la diferencia de:

$$\frac{1}{251} \int_1^{251} (f(t) - g(t)) dt = 0.110 \text{ m}$$

La muestra del perfil 3 del Cono B tiene una predicción menos precisa (los errores son mayores) que la obtenida en el perfil 3 del Cono A. En este caso, el método es sensible a algún acontecimiento excepcional (grandes bloques de piedras), principalmente en la zona final de los perfiles, como puede comprobarse en la figura 9. Por ello, la diferencia entre las curvas (predicción y medida) del perfil 3 del Cono B (Figura 10) es mayor que las variaciones del perfil 3 del Cono A (Figura 8). Las diferencias del perfil 3 del Cono B son de + 16 cm y - 27 cm y del perfil 3 del Cono A son de + 7 cm y -15 cm.

4. Discusión

Los clastos que componen un cono de derrubios pueden dar la sensación que no se mueven sino son provocadas por algún elemento externo (caída de material de las paredes que la rodean, animales principalmente rebecos, acumulación de nieve,...). Pero, cuando se miden con equipos topográficos de precisión y se hacen perfiles de máxima pendiente durante un periodo continuado de tiempo, entonces puede determinarse su dinamismo.

Los tamaños de los clastos que componen los conos de derrubios analizados en La Vueltona son heterogéneos, aunque el tamaño normalizado es de 30 cm existen rocas de grandes dimensiones (superiores al metro) en el Cono B. Este asunto condiciona la realización de los MDE, los cuales tienen una diferencia máxima de 15 cm para la generación del mismo modelo con una malla de medida de 3x3 metros. En la comparación anual de los MDE hay diferencias máximas de 30 cm.

Analizando los perfiles de máxima pendiente de ambos conos de derrubios se puede indicar:

- El comportamiento de los conos de derrubios es ondulatorio, esto es, un determinado punto situado en el perfil respecto a su altitud en el año anterior o posterior sufre variaciones (Figura 4). Si estos cambios se analizan en la línea de máxima pendiente, puede comprobarse que hay zonas que pierden material y otras que lo ganan, pero las mismas zonas no siempre pierden o ganan material sino que se van compensando esas variaciones (Figura 6). Por tanto, todo indica que si se suman para cada intervalo de distancia los periodos anuales de acumulaciones y de pérdidas, muestran valores que siempre son de 4 o 5 periodos (acumulación, pérdida), para el total de 9 periodos estudiados (2010-2009,... 2018-2017) (Figura 5).
- La interpretación analógica de los perfiles de máxima pendiente analizados y representados como ejemplo en la figura 5, es la siguiente:
 1. Las variaciones en los perfiles son heterogéneas, esto es no existe una acumulación o pérdida general de material con el paso del tiempo. En el perfil donde un año hay pérdida de material, en el año siguiente o sucesivos tiende a

rellenarse pero manteniendo la pendiente y cota. Así, si analizamos parejas anuales (Figura 6), se comprueba que se van compensando las acumulaciones de un periodo con las pérdidas de periodos anteriores y posteriores. Siendo estos perfiles simétricos con respecto al valor cero.

2. En ningún caso, para un mismo intervalo de distancia hay más de tres periodos (columnas) seguidos que sea de acumulación (A) o de pérdida (B). Esto corrobora lo explicado anteriormente, y es que no existe una continuidad en el tiempo de acumulación o pérdidas de material en determinadas zonas, sino que en periodos donde existe acumulación se compensan con periodos de pérdidas de material.
3. Se han cogido secuencias superiores a cinco periodos anuales donde existan valores continuos de acumulación "A" (líneas moradas) o pérdida "B" (líneas amarillas) (Figura 5). Las tendencias de estas secuencias siempre es la misma (retroceso en el tiempo), así por ejemplo, en la figura 5, la secuencia "B" (línea amarilla) que empieza en el periodo 2010-2009 y a una distancia entre 80 y 90 metros del origen del perfil, para el periodo siguiente (2011-10) se encuentra 10 metros más atrás (70-80 metros), y este proceso continúa hasta el periodo 2015-2014 para un intervalo de distancia de 30-40 m. En este caso es una secuencia de pérdida de material o erosión. Lo mismo ocurre con las secuencias de acumulación "A" (líneas moradas).
4. Siguiendo con el ejemplo de la figura 5: La erosión en retroceso se puede interpretar como que un pequeño deslizamiento que se produce a una determinada distancia es rellenada con material que se encuentra por detrás; y deja el hueco de material que se ha movido hacia delante para el siguiente año. Este proceso se va realizando de forma continua hasta que se estabiliza el perfil (Figura 11).

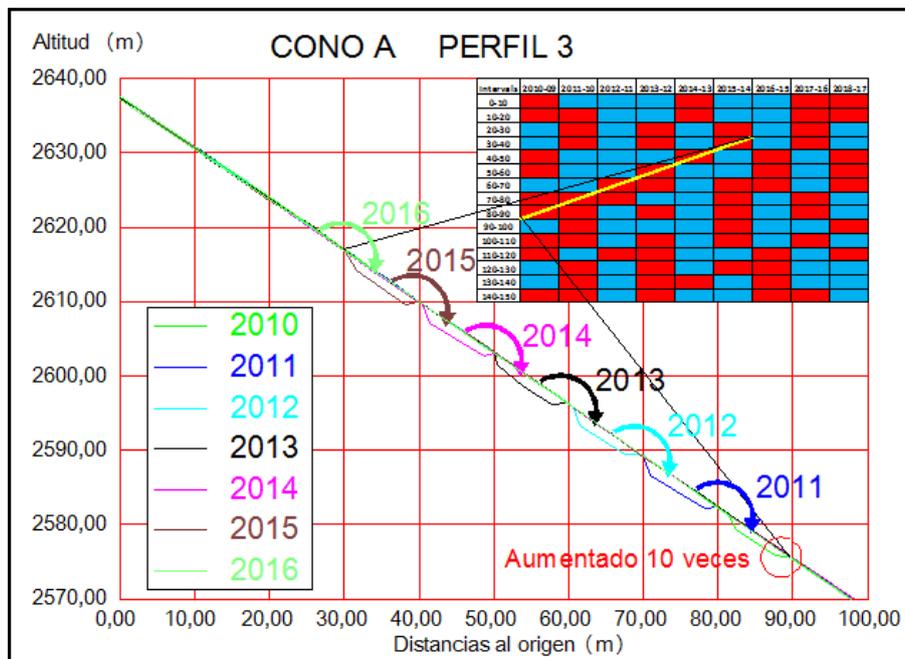


Figura 11. Perfil que señala la erosión en retroceso, a lo largo de un periodo de 6 años (2010-15). El efecto de retroceso está aumentado 10 veces.

5. La acumulación de material rocoso en retroceso se puede interpretar como que una pequeña acumulación de material que se produce a una distancia hace "TOPE", y produce una acumulación por detrás al año siguiente; y producirse este efecto en años sucesivos. El proceso se va realizando de forma continua hasta que se estabiliza, y en la figura 12, esto ocurre el año 2015.

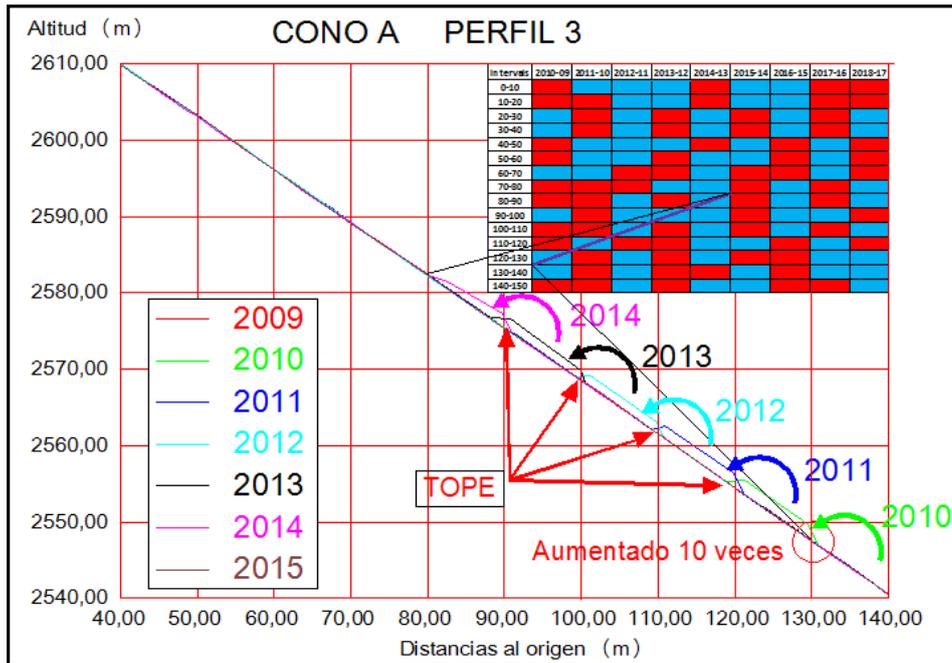


Figura 12. Perfil que señala la acumulación de material rocoso en retroceso, a lo largo de un periodo de 5 años (2010-14). El efecto de acumulación está aumentado 10 veces.

6. También se producen secuencias de erosión y acumulación en el sentido de avance de los conos, pero en este caso no hay periodos anuales continuados que sean superiores a cuatro años. Es posible que pudieran producirse, pero por ahora en los ocho perfiles analizados (cuatro perfiles en cada cono) no ha ocurrido.

Partiendo de los datos anuales del periodo 2009-2017, también se ha realizado la predicción del año 2018 utilizando procedimientos matemáticos. En el año 2018 se han medido en el campo los conos de derrubios. Por tanto, se puede obtener la diferencia entre la curva predictiva y la medida, resultando:

- Cono A: Es un cono muy uniforme en la composición de material rocoso y las diferencias no son superiores a los 15 cm entre ambas curvas (Figura 8). El ajuste integral del cono es de 5 cm.
- Cono B: es un cono que está compuesto por grandes bloques de piedras, principalmente en la zona inferior del cono, lo cual ha generado que las diferencias entre la curva predictiva de 2018 y la medición real muestre diferencias de 27 cm, principalmente en

esta zona inferior del cono (Figura 10). Aunque el promedio integral de todo el ajuste es de 11 cm.

Evidentemente, el promedio integral de la curva del Cono A es de una calidad mayor que la curva del Cono B. Siendo el ajuste del Cono A cercano a la precisión del instrumental (2 cm). Y las curvas de ambos conos están por debajo del error producido en la generación de un mismo MDE, que es de 15 cm. Es de esperar que, a medida que el número de mediciones de campo aumente (actualmente sólo se dispone de 10 mediciones), la curva de predicción se ajuste mejor a la curva de medida. Esto debe ocurrir siempre y cuando no se produzcan acontecimientos extraordinarios, como grandes deslizamientos o desprendimientos de rocas, que por ahora (2009-2018) no han sucedido.

5. Conclusiones

La técnica del escáner láser terrestre (TLS) se ha mostrado muy eficaz para el control de los cambios superficiales y volumétricos anuales, y las tendencias a corto y medio plazo con precisiones adecuadas al movimiento superficial. Esta técnica permite el conocimiento detallado de los procesos de transferencia de sedimentos en sistemas de ladera de alta montaña. Las precisiones que permiten las características técnicas del TLS es de ± 2 cm en la medición del punto. Cuando se observa un mismo cono de derrubios dos veces en la misma fecha se obtienen diferencias en la generación del MDE que son inferiores a los ± 15 cm, excepto situaciones puntuales donde no se sobrepasa de los 20 cm; y en la zona inferior del Cono B, donde existen piedras de grandes dimensiones (superiores a 1 metro). Las diferencias anuales entre los MDE tiene valores por debajo de los ± 30 cm, excepto en las áreas de los grandes bloques de piedras del Cono B.

Por tanto, estos valores han condicionado el resultado de cada cono:

- Cono A: Posiblemente tiene la configuración de la mayoría de los conos en zonas de alta montaña templada. Tiene una distribución uniforme del material rocoso, o sea las piedras tienen un tamaño muy similar en todo el cono (30 cm). Por ello, los resultados de los perfiles de máxima pendiente y los volúmenes son muy estables con el paso del tiempo. Cuando se realiza un estudio predictivo del año 2018, con los datos de 2009-2017, y se comparan con los datos de campo de 2018, muestra diferencias que no superan los 5 cm. En este cono existe un equilibrio entre la acumulación y la transferencia de sedimentos.
- Cono B: Es un cono que está compuesto por grandes bloques de piedras, principalmente en la zona inferior del cono, donde la comparación de los perfiles muestran diferencias de 45 cm. Todo ello, provoca que la diferencia entre la curva predictiva de 2018 y la medición real muestre un ajuste de ± 11 cm. Este cono tiene un flujo de derrubios que afecta a sus cálculos, ya que tiene grandes cambios, siendo de erosión en la zona superior y de sedimentación en la inferior.

En general, a medida que el número de datos aumente con la toma de datos de más campañas (actualmente sólo se dispone de 10 mediciones), es de esperar que la predicción mejore. Será así, siempre y cuando no se produzca algún acontecimiento brusco, no ocurrido hasta ahora (2009-2018), como la caída de material excepcional de las paredes de los conos o un deslizamiento extraordinario del material rocoso de los conos [18].

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los proyectos TIN2016-76843-C4-2-R (AEI/FEDER, UE) y CGL2015-68144-R (MINECO/FEDER). También agradecemos a la Junta de Extremadura y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) la ayuda de referencia GR18053 para la investigación del grupo de investigación NEXUS.

Referencias

- [1] GARDNER, J.S. ACCRETION RATES ON SOME DEBRIS SLOPES IN THE MT. RAE AREA, CANADIAN ROCKY MOUNTAINS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 347-355. 1983.
- [2] LUCKMAN, B.H. DEBRIS ACCUMULATION PATTERNS ON TALUS SLOPES IN SURPRISE VALLEY, ALBERTA. *Géographie physique et Quaternaire*, 42 (3): 247-278. 1988.
- [3] BALLANTYNE, C.K. PARAGLACIAL GEOMORPHOLOGY. *Quaternary Science Reviews*, 21 (18-19): 1935-2017. 2002.
- [4] FRANCOU, B. *L'ÉBOULISATION EN HAUTE MONTAGNE*. Editec. Grenoble. 1988.
- [5] DELALOYÉ, R., REYNARD, E., LAMBIEL, C., MARESCOT, L. & MONNET, R. THERMAL ANOMALY IN A COLD SCREE SLOPE, CREUX DU VAN, SWITZERLAND. In *Proceeding 8th Int. Conf. Perm., IPA, Zurich*. Pp. 175-180. 2003.
- [6] HERZ, T., KING, L. & GUBLER, H. MICROLIMATE WITHIN COARSE DEBRIS OF TALUS SLOPES IN THE ALPINE PERIGLACIAL BELT AND ITS EFFECT ON PERMAFROST. In *Proceeding 8th Int. Conf. on Permafrost, IPA, Zurich*. Pp. 383-388. 2003.
- [7] SCAPOZZA, C., LAMBIEL, C., BARON, L., MARESCOT, L. & REYNARD, L. INTERNAL STRUCTURE AND PERMAFROST DISTRIBUTION IN TWO ALPINE PERIGLACIAL TALUS SLOPES, VALAIS, SWISS ALPS. *Geomorphology*, 132: 208-221. 2011.
- [8] SERRANO, E., SANJOSÉ, J.J., GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A. & GÓMEZ-LENDE, M. SURFACE MOVEMENT AND CASCADE PROCESSES ON DEBRIS CONES IN TEMPERATE HIGH MOUNTAIN (PICOS DE EUROPA, NORTHERN SPAIN). *Science of the Total Environment*, 649: 1323-1337. 2019.
- [9] GONZÁLEZ-TRUEBA, J.J. *GEOMORFOLOGÍA DEL MACIZO CENTRAL DEL PARQUE NACIONAL DE PICOS DE EUROPA*. OAPN-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 231 pp. 2007b.
- [10] SERRANO, E., GONZÁLEZ-TRUEBA, J.J. & GONZÁLEZ GARCÍA, M. MOUNTAIN GLACIATION AND PALEOCLIMATE RECONSTRUCTION IN THE PICOS DE EUROPA (IBERIAN PENINSULA, SW EUROPE). *Quaternary Research*, 78: 303-314. 2012.
- [11] GONZÁLEZ-TRUEBA, J.J. *EL PAISAJE NATURAL DEL MACIZO CENTRAL DE LOS PICOS DE EUROPA*. CIMA, Consejería de Medio Ambiente, Santander. 330 pp. 2007a.
- [12] SERRANO, E. & GONZÁLEZ-TRUEBA, J.J. LA DINÁMICA GEOMORFOLÓGICA ACTUAL DE ALTA MONTAÑA Y MONTAÑA MEDIA. EN *GEOMORFOLOGÍA DEL MACIZO OCCIDENTAL DEL PARQUE NACIONAL DE PICOS DE EUROPA*. OAPN-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. pp. 79-108. 2010.
- [13] GONZÁLEZ-TRUEBA, J.J.; SERRANO, E.; GARCÍA GONZÁLEZ, M.; GOMÉZ LENDE, M. & RUIZ, J. *GEOMORFOLOGÍA DEL MACIZO OCCIDENTAL DEL PARQUE NACIONAL DE PICOS DE EUROPA*.

OAPN-Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. 2012.

- [14] BOSQ, D. *LINEAR PROCESSES IN FUNCTION SPACES: THEORY AND APPLICATIONS*. Vol. 149. Springer Verlag. 2000.
- [15] RAMSAY, J.O. & SILVERMAN, B.W. *FUNCTIONAL DATA ANALYSIS*. Springer Verlag. 2005.
- [16] MAS, A. & PUMO, B. *LINEAR PROCESSES FOR FUNCTIONAL DATA*. arXiv:0901.2503. 2009.
- [17] DIDERICKSEN, D., KOKOSZKA, P. & ZHANG, X. Empirical properties of forecast with the functional autoregressive model. *Comput Stat*. DOI 10.1007/s00180-011-0256-2. 2011.
- [18] DE SANJOSÉ-BLASCO, J.J., LÓPEZ-GONZÁLEZ, M., ALONSO-PÉREZ, E. & SERRANO, E. MODELLING AND TERRESTRIAL LASER SCANNING METHODOLOGY (2008-2019) ON DEBRIS CONES IN TEMPERATE HIGH MOUNTAINS. *Remote Sensing*, 12: 632-654. 2020.

Sobre los autores:

Nombre: José Juan de Sanjosé Blasco

Correo Electrónico: jjblasco@unex.es

Institución: Universidad de Extremadura

Nombre: Mariló López González

Correo Electrónico: marilo.lopez@upm.es

Institución: Universidad Politécnica de Madrid

Nombre: Estrella Alonso Pérez

Correo Electrónico: ealonso@icai.comillas.edu

Institución: Universidad Pontificia de Comillas

Nombre: Enrique Serrano Cañadas

Correo Electrónico: serranoefyl.uva.es

Institución: Universidad de Valladolid