

## APLICABILIDAD DE LA TÉCNICA LIDAR PARA LA MODELIZACIÓN DEL ESPESOR DEL MANTO NIVOSO MEDIANTE SIG

I. Moreno <sup>(\*)</sup>, A. Ruiz <sup>(\*\*)</sup>, J. Marturià <sup>(\*)</sup>, P. Oller <sup>(\*)</sup>, J. Piña <sup>(\*)</sup>, C. García <sup>(\*)</sup>, P. Martínez <sup>(\*)</sup> y J. Talaya <sup>(\*\*)</sup>.

*(\*) Institut Geològic de Catalunya (IGC), C/ Balmes, 209-211. E08006-Barcelona. imoreno@igc.cat*

*(\*\*) Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), Parc de Montjuïc - 08038 Barcelona.*

### RESUMEN

El Institut Geològic de Catalunya (IGC) conjuntamente con el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) han puesto en marcha un estudio cuyo objetivo es establecer una metodología que permita modelizar el volumen de nieve a partir de datos puntuales obtenidos mediante la técnica LIDAR lo que, en un futuro próximo, posibilitará el cálculo de la cantidad de agua almacenada en forma de nieve. La obtención, mediante el láser aerotransportado, de dos modelos digitales de elevaciones (con y sin cubierta nival) permite obtener una densa malla de datos puntuales del grosor de nieve (cada 1m<sup>2</sup>). La obtención de diversas variables topográficas (orientación, radiación solar, *upwind index*,...) mediante SIG y la utilización del *stepwise regression tree* como método de extrapolación dan como resultado una cartografía de precisión sobre el volumen de nieve. El ajuste del modelo (explica un 53% de la variación del espesor de nieve) y la diferencia en volumen de nieve respecto los datos LIDAR originales (tan sólo del 1.42%) validan el SRT y la técnica LIDAR como métodos para estudiar el manto nivoso.

### ABSTRACT

Institut Geològic de Catalunya (IGC) jointly with Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) have begun a project to model snowpack depth distribution at the study site of Vall de Núria (15 Km<sup>2</sup> basin located in eastern Pyrenees) in order to evaluate water reserves in mountain watersheds. Remote sensing airborne LIDAR survey and field work validations were performed to make this calculation. Two high resolution Digital Elevation Models (1m<sup>2</sup>), with and without snow, were obtained for snow depth calculations. GIS allowed to model topographical variables (aspect, solar radiation, *upwind index*,...) and extrapolation was made through an *stepwise regression tree*. The resulting model can explain up to 53% of snow depth variability and differences between snow volumes calculated from raw LIDAR and from modeling process only differ 1.42%. These results validate SRT and airborne LIDAR as a good methodology for snow depth studies.

**Palabras Clave:** Pirineos, manto nivoso, LIDAR, SIG, árbol de regresión.

### INTRODUCCIÓN

Una de las principales características del clima mediterráneo es su variabilidad pluviométrica. Esta variabilidad explica que la Península Ibérica, y Catalunya en particular, se vean afectadas por graves periodos de sequía. A esta variabilidad natural hay que añadir la presión social sobre los recursos hídricos. Presión que se ve incrementada en las cuencas internas de Cataluña que, aunque ocupan un 52% de la superficie total, albergan a un 92% de la población de esta región. La gestión de los recursos hídricos es, debido a ello, una prioridad y por tanto es necesario cuantificar los recursos hídricos que hay almacenados en forma de nieve.

La elevada variabilidad espacial de la distribución de la nieve (Elder, 1995) junto con los escasos datos disponibles hacen de la teledetección una técnica imprescindible de modelización para extensas áreas.

El uso del LIDAR aerotransportado supone un salto cualitativo en el estudio del manto nivoso puesto que permite abarcar grandes áreas con una elevada resolución y un coste relativamente reducido. Es en este sentido que el IGC junto con el ICC han puesto en marcha el proyecto: *Aplicabilidad de la técnica LIDAR para evaluar los recursos hídricos en forma de nieve* que consta de diversas fases y cuya fase inicial tiene como principal objetivo modelizar la distribución y espesor del manto nivoso de un área piloto para, en fases posteriores del proyecto, calcular el volumen de agua almacenada en forma de nieve en un área más extensa.

La elevada precisión de la técnica LIDAR, con errores verticales de tan sólo 15cm en condiciones óptimas, posibilita su aplicación al cálculo del manto nivoso tal y como muestran diversos estudios (Hopkinson 2001, Fassnacht 2005 y Deems 2006).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de validar la técnica LIDAR y establecer una metodología aplicable a una extensa área del Pirineo se establece un área piloto en el Valle de Núria (Figura 1).



Figura 1. Situación del Valle de Núria.

El área que comprende la zona de estudio es de 38 Km<sup>2</sup> y se encuentra en su mayor parte por encima del límite del bosque. Roquedos y prados cubren la mayor parte del suelo lo que favorece el transporte de la nieve por parte del viento.

El vuelo LIDAR en presencia de nieve se realiza el día 9-3-2004 y el día 9-8-2006 se realiza un vuelo sobre la misma área en ausencia de nieve. Para la realización de los distintos vuelos se ha utilizado el láser, modelo Optech ALTM3025.

Mediante el software de procesado de datos TerraScan (desarrollado por Terrasolid) se han obtenido dos Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de malla de 1m<sup>2</sup> uno, con el manto nivoso y el otro en ausencia de éste, cuya resta permite obtener el espesor de nieve.

Paralelamente a la captura de datos LIDAR se realiza una campaña de medida de espesores de nieve manuales para poder validar los espesores calculados mediante LIDAR. A tal efecto se crean dos equipos de campo dotados de GPS submétricos cuya tarea es medir el espesor de nieve de forma puntual. El medio de transporte utilizado (esquí) y el elevado tiempo necesario para obtener la posición GPS tan sólo posibilitan la captura de 19 puntos con los que validar los datos LIDAR. La escasa representatividad de estos datos motiva la utilización, en el proceso de validación, de métodos indirectos (fotografías de campo).

Una vez procesados y validados los datos LIDAR se procede a su modelización mediante una extrapolación. Durante la fase operativa del

proyecto, para el cálculo del volumen de agua almacenado, se partirá de un vuelo LIDAR que tan sólo cubrirá una pequeña parte del territorio (Figura 2), lo que justifica la necesidad de una extrapolación que permitirá cubrir el total del área de estudio.

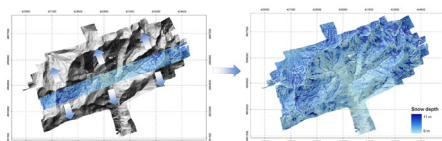


Figura 2. Proceso de extrapolación de los datos para cubrir el total del área de estudio.

Para la modelización se ha hecho uso de los *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) y técnicas geoestadísticas. Mediante el software ArcGIS 9.3 se han calculado las diferentes variables topográficas que intervienen en la distribución del espesor de nieve (Marchand 2005, López-Moreno 2006 y Elder 1998 entre otros): pendiente, orientación, altitud y radiación solar.

Así mismo autores como Molotch (2005) ponen de manifiesto la importancia que factores como el viento tienen sobre la redistribución de la nieve y es por ello que a las variables topográficas ya mencionadas se ha añadido el *upwind index* (Winstral 2002). Este índice permite medir la exposición de una celda del MDE respecto a la dirección del viento predominante. Su cálculo se efectúa mediante la siguiente fórmula (Figura 3):

$$SX_{A,dmax}(x_i, y_i) = \max \left[ \tan \left( \frac{ELEV(x_v, y_v) - ELEV(x_i, y_i)}{[(x_v - x_i)^2 + (y_v - y_i)^2]^{0.5}} \right) \right]$$

Figura 3. Fórmula de cálculo del *Upwind index*. A es la posición de la celda de interés. ELEV es la altitud de esta misma celda y  $(x_i, y_i)$  sus coordenadas.  $(x_v, y_v)$  representa el conjunto de coordenadas de las celdas localizadas según el viento predominante.

Para la extrapolación se ha utilizado el método de *Ordinary Least Squares* (OLS) implementado en ArcGIS 9.3 y el *stepwise regression tree* (SRT) propuesto por Huang (2003) como una evolución de la clasificación en árbol de Breiman (1984) e implementado en el algoritmo GUIDE por Loh (2002).

Mediante el algoritmo GUIDE (que se puede descargar gratuitamente del sitio web: <http://www.stat.wisc.edu/~loh/guide.html>) se efectúa una clasificación en árbol según las

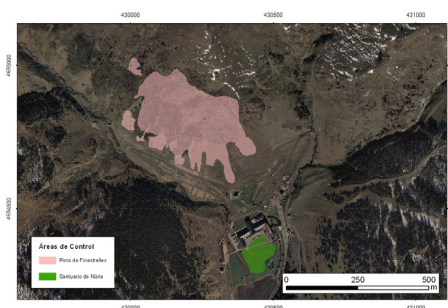
variables topográficas antes mencionadas y una regresión al final de cada nodo. De este modo es posible obtener una detallada cartografía de la zona de estudio superando algunos inconvenientes de los árboles de regresión apuntados por López-Moreno (2006).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Modelo de innivación LIDAR.

A partir de los MDE obtenidos mediante el LIDAR y su resta se obtiene un modelo de espesor de nieve que debe ser validado. Debido a las dificultades antes expresadas se utilizan métodos de validación indirectos. Éstos son:

1. Creación de áreas de control con espesor de nieve conocido (Figura 4) Esto es, zonas donde el espesor de nieve es 0 identificados mediante fotografías de campo.
2. Estudio de espesor de nieve a través de perfiles de control que se trazan en zonas con grandes acumulaciones de nieve.



**Figura 4.** Localización de las diversas zonas de control.

Fruto de esta validación se calcula un *Root Mean Square Error* (RMSE) de 0.33m. Este valor se calcula para el conjunto de las zonas de control. Si diferenciamos entre las diferentes zonas se comprueba como la pendiente tiene una gran influencia sobre este error (Tabla 1).

**Tabla 1.** RMSE según diferentes áreas de control.

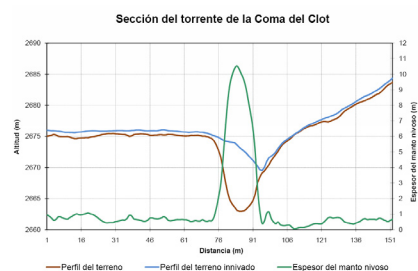
Zona de control	RMSE (m)
Santuario de Níria	0.315
Pista de Finestrelles	0.103

El área de control de la Pista de Finestrelles está cubierta por matorrales y roquedo con una pendiente elevada (38° de media). En contraposición, el área del Santuario es

prácticamente llana (2.5°) y se encuentra cubierta por prados de porte bajo.

En conclusión, tal y como apunta Hopkins (2001) y Deems (2006) en sus estudios la pendiente y la cubierta del suelo son factores que influyen en la calidad de los datos LIDAR.

La realización de perfiles a partir de los MDTs originales, también ha permitido validar los datos originales. En concreto se han trazado un total de 12 perfiles (la Figura 5 presenta uno de ellos) que han mostrado que los valores más altos de espesor de nieve para el área de estudio son de hasta 11 metros. Valor que ha sido utilizado como extremo superior durante la validación.



**Figura 5.** Perfil que muestra una acumulación de hasta 11 metros en un torrente.

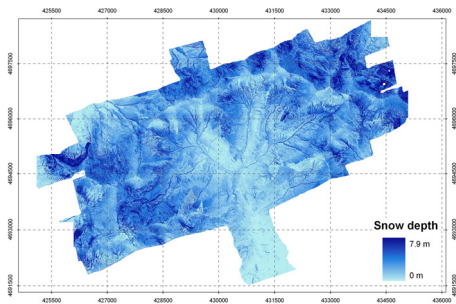
### Modelización del espesor de nieve.

La extrapolación a partir del método de OLS permite estimar la importancia de cada variable para explicar el espesor de nieve así como comparar este método con el método definitivo de SRT.

Los resultados de la extrapolación mediante OLS muestran una baja correlación ( $R^2=0.292$ ) y una gran diferencia en volumen de nieve respecto al volumen de nieve calculado directamente a partir de los datos LIDAR (27.1%).

En cambio, a partir del método del SRT mediante el algoritmo GUIDE (Loh, 2008) se obtiene un árbol de clasificación de 33 nodos finales con un buen ajuste  $R^2=0.53$  y una diferencia en volumen de agua entre el modelo y los datos LIDAR de tan sólo el -1.42%.

A partir de la modelización mediante el método SRT se ha podido obtener un mapa del espesor de nieve de gran resolución tal y como muestra la Figura 6.



**Figura 6.** Espesor de nieve calculado con el método SRT (algoritmo GUIDE) a partir de LIDAR.

## CONCLUSIONES

La conjunción de un gran número de datos de partida, gracias a la técnica LIDAR, junto con el método de modelización utilizado, *stepwise regression tree*, permite obtener una cartografía de detalle que difícilmente se obtendría con métodos clásicos de interpolación de datos puntuales muy separados en el espacio.

El presente estudio ha demostrado la potencialidad del uso de la técnica LIDAR para el cálculo del espesor de nieve y su posterior utilización para evaluar los recursos hídricos disponibles. A pesar de ello será en próximas campañas, con un mayor número de datos de campo, cuando se valide la idoneidad de la técnica LIDAR para el cálculo del espesor de nieve.

## BIBLIOGRAFÍA

Deems, J., and T. H. Painter 2006. Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources, *International Snow Science Workshop*, Telluride, Colorado, USA.

Elder, K. ; Michaelsen, J. & Dozier, J. 1995. Small basin modelling of snow water equivalence using binary regression tree methods. *Biochemistry of seasonally snow-covered catchments*. Proceedings of a Boulder Symposium. IAHS publications no 228.

Fassnacht, S & Deems, J. (2005). Scaling associated with averaging and resampling of LIDAR-derived montane snow depth data. *62nd Eastern Snow conference*, Waterloo, Ontario, Canada.

Hopkinson, C et al 2001. Mapping the spatial distribution of snowpack depth beneath variable forest canopy using airborne laser altimetry. *59th eastern snow conference*, Ottawa, Ontario, Canada.

Huang, C & Townshend, J. R. G. 2003. A stepwise regression tree for nonlinear approximation: applications to estimating subpixel land cover. *International Journal on Remote Sensing*. Vol 24, No. 1, 75-90.

Loh, Wei-Yin. 2002 Regression trees with unbiased variable selection and interaction detection. *Statistica Sinica*, vol. 12, 361-386.

López Moreno, J; Nogués Bravo, D. 2006. Interpolating snow depth data: a comparison of methods. *Hydrological Processes* 20(10): 2217-2232.

Marchand, W. D. & Killingtonveit, A 2005. Statistical probability of snow depth at the model sub-grid cell spatial scale. *Hydrological Processes* 19, 355-369.

Molotch, N. P.; Colee, M. T.; Bales, R. C. & Dozier, J. 2005. Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in alpine basin using binary regression tree models: the impact of digital elevation data and independent variable selection. *Hydrological Processes*. 19, 1459-1479. Wiley Interscience.

Winstral, A.; Elder, K.; Davis, R. 2002. Spatial snow modeling of wind-redistributed snow using terrain-based parameters. *Journal of hydrometeorology*, vol 3, 54.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración prestada por los responsables del complejo de *Vall de Núria* por su amabilidad y predisposición, así como a A. Winstral por ceder amablemente el algoritmo que permite calcular el índice *upwind* y W. Loh por su algoritmo GUIDE.