APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LÁSER ESCÁNER TERRESTRE GEORREFERENCIADA PARA LA MONITORIZACIÓN DEL MANTO DE NIEVE Y LOS GLACIARES

Jesús REVUELTO BENEDÍ[1], Juan I. LÓPEZ MORENO[1], César AZORÍN MOLINA[1], Sergio M. VICENTE SERRANO[1], Alfredo SERRETA OLIVÁN[2]

[1]*Dpto. de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca*

[2]*Dpto. de Geografía. Universidad de Salamanca*

jrevuelto@ipe.csic.es, nlopez@ipe.csic.es, cazorin@ipe.csic.es, svicen@ipe.csic.es, serreta@unizar.es

RESUMEN

El manto de nieve y los glaciares son dos componentes de la criosfera que resultan de gran interés para el estudio del clima de zonas de alta montaña, pues responden de forma directa a la variabilidad espacial e interanual de la precipitación y temperatura en zonas donde apenas se disponen de observaciones instrumentales. Además, su seguimiento resulta de gran interés para comprender la respuesta hidrológica, riesgos naturales y la fenología animal y vegetal en zonas de montaña. La utilización de un Laser Escáner Terrestre (TLS) para su monitorización resulta una aplicación novedosa que permite conocer la variabilidad espacial del manto de nieve, o la evolución de los glaciares a una resolución espacial de gran detalle y disponer de información de zonas, en las que por su complicado acceso, son de muy difícil monitorización. En este trabajo se presenta un protocolo completo y detallado para la adquisición de las nubes de puntos que la tecnología TLS proporciona, su georreferención y el postproceso de las imágenes obtenidas para el estudio de la nieve y los glaciares. Así mismo, se presentan distintos ejemplos de aplicación en diferentes ambientes de montaña (forestal, subalpino y de alta montaña) que actualmente se están realizando en el Pirineo.

Palabras clave: Láser Escáner Terrestre, Nieve, Glaciares, Pirineo.

ABSTRACT

Snow cover and glaciers are two components of the cryosphere that are of great interest to study the climate of high mountain areas, because they respond directly to the spatial and interannual variability of precipitation and temperature in areas with few available instrumental observations. In addition, monitoring is of great interest to understand the hydrologic response, natural hazards and animal and plant phenology in mountain areas. The use of a terrestrial laser scanner for monitoring is a novel application that allows to know the spatial variability of snow cover, or the evolution of glaciers to a spatial resolution of fine detail and provide information in areas in which it is difficult to access, and are very difficult to monitor. This paper presents a complete and detailed protocol for the acquisition of point clouds, georeferencing and post-processing of images obtained for the study of snow and glaciers. Likewise, there are several examples of application in different mountain environments (forest, subalpine and alpine) currently underway in the Pyrenees.

Key words: Terrestrial Laser Scanner, Snow, Glaciers, Pyrenees.

1. INTRODUCCIÓN

Desde un punto de vista hidrológico y de gestión de los recursos hídricos, la nieve supone una variable muy relevante pues condiciona la cantidad de agua disponible durante los meses de

primavera, y altera notablemente los regímenes fluviales independientemente de la estacionalidad de la precipitación (López-Moreno *et al*., 2004). La nieve juega además un papel fundamental para explicar otros procesos que ocurren en montaña, como la fenología animal o vegetal, o la ocurrencia de riesgos naturales como avalanchas y avenidas fluviales. Además, en las últimas décadas la nieve ha incrementado su importancia desde un punto de vista socioeconómico, pues en la montaña española se ha convertido en un importante motor de desarrollo turístico en relación a la práctica de deportes de invierno (Bürki et al., 2003). Sin embargo, se trata de un turismo muy dependiente de la climatología de cada año, lo que explica el interés creciente en comprender los procesos que explican la cantidad y calidad de nieve acumulada anualmente en relación a las condiciones térmicas y pluviométricas. Por todo ello resulta importante avanzar en el conocimiento de los procesos que controlan la variabilidad espacial del manto de nieve (espesor y propiedades físicas), así como su evolución estacional e interanual en respuesta a las condiciones climáticas y de entorno (existencia de vegetación, topografía, exposición al viento). Este avance es clave para conocer como distintas proyecciones de variables climáticas y de cubierta vegetal disponibles para las próximas décadas y de este modo simular el efecto del cambio global sobre el manto de nieve, pudiéndose valorar adecuadamente los posibles impactos (López-Moreno *et al*., 2009).

Por otro lado, los glaciares son unos excelentes indicadores de la evolución climática de los sectores más elevados del Pirineo, precisamente dónde apenas se disponen de registros climáticos fiables (Chueca *et al*., 2005). El balance de masa de los glaciares responde de una forma muy directa a la cantidad de nieve que se acumula sobre ellos durante buena parte del invierno y la primavera, y las temperaturas que se registran durante el periodo de fusión. Sin embargo, realizar mediciones directas del balance de masa de los glaciares pirenaicos resulta sumamente complejo debido a la inaccesibilidad de muchas de las masas heladas y su inestabilidad como consecuencia de su elevado grado de degradación.

La adquisición de nubes de puntos mediante el uso de láser escáner se trata de una técnica precisa para la obtención de modelos digitales del terreno, cuyo uso está siendo muy creciente en distintos ámbitos ambientales y en concreto el estudio de la criosfera (Schwalbe et al., 2008, Egli *et al*., 2011). Si bien, la información proporcionada por el TLS es muy precisa y de alta calidad, existen fuentes de error en la adquisición de datos y su postproceso que deben ser tenidos en cuenta y minimizados. De aquí se deduce la importancia de establecer un protocolo de operación que combina la utilización del laser escáner con técnicas de posicionamiento GPS. El trabajo que se presenta describe la metodología empleada para la monitorización con un Laser Escáner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanner,* TLS) en cuatro zonas del Pirineo Central para el estudio del mato de nieve (bajo distintas condiciones ambientales y distancias de escaneo) y la evolución del hielo de un glaciar, pudiendo servir de ejemplo para su aplicación bajo distintas condiciones en zonas de montaña.

FIG. 1: *Tecnología tiempo de vuelo (Fuente: Prokop, 2008).*

2. METODOLOGÍA

En los últimos años la tecnología LIDAR (*Laser Distance and ranging* o *Light Detecting and Ranging*) ha experimentado un gran desarrollo. Actualmente existen numerosos modelos de laser escáner con un amplio espectro de tecnologías de trabajo para distintas aplicaciones, diferenciándose a efectos prácticos por su velocidad de muestreo, distancia a la que se puede medir y por la longitud de onda con la que trabajan. En este trabajo se ha empleado, el modelo LPM-321 de RIEGL que emplea la tecnología de tiempo de vuelo (Fig. 1) para determinar la distancia de los distintos puntos de la zona de escaneo y obtener la nube de puntos tridimensional del área deseada. Las especificaciones técnicas de este modelo son las óptimas para el propósito con el que sea empleado; según las mismas la distancia máxima a la que puede trabajar es de 6 kilómetros, con una resolución angular límite de 0,018º. Además, la longitud de onda en la que trabaja es 905nm, la cual resulta ideal para no ser absorbida por la superficie del hielo o la nieve (Prockop, 2008), habiéndose detectado problemas de pérdida de señal únicamente por un elevado ángulo de incidencia entre el haz de luz laser emitida por el dispositivo y la superficie escaneada en distancias superiores a 3.000m o por condiciones meteorológicas adversas.

Al emplear una técnica en su fase inicial de aplicación para el estudio de la cobertura nivosa es de vital importancia establecer una serie de pasos que ayuden a minimizar cualquier fuente de error y a su vez aseguren una buena calidad en los datos. En este apartado van a diferenciarse dos metodologías, una empleada con el TLS y la otra con un uso mucho mas extendido como es el de GPS, por lo que de esta última tan solo se harán ciertas matizaciones relacionadas con las singularidades de las zonas de estudio.

2. 1. Adquisición de datos con Láser Escáner Terrestre de largo alcance

El trabajo con un equipo de largo alcance tiene grandes ventajas como la recogida de miles, incluso de millones de puntos, en tiempos muy reducidos si son comparados con simples medidas manuales; o la posibilidad de obtener medidas en lugares que entrañarían un elevado riesgo para las personas e incluso la imposibilidad de medir directamente (Reshetyuk, 2006; Prokop y Panholzer, 2007). Sin embargo, al trabajar en distancias que fácilmente superan los 1.000 metros cabe la posibilidad de que diversas consideraciones técnicas o pequeños errores operativos no considerados en su debido momento, den lugar a grandes desviaciones de las mediciones reales; por ello se establecen el siguiente protocolo de operación.

2.1.a) Posicionamiento del escáner

En una fase inicial es muy importante establecer la localización en la que se va a montar el equipo pues desde la misma (*ScanPosition*) se definen las ventanas angulares para las que se realizan los distintos escaneos. En esta elección debe tenerse en cuenta la existencia de sombras que pueden originar elementos naturales, como un árbol o una colina, situada entre el TLS y el área sometida a estudio (Fig. 2). Además hay que tener en cuenta que desde esta posición se hará el seguimiento de la zona, con lo que debe ser accesible en distintas condiciones del terreno (nieve, hielo, etc,..). Para minimizar las zonas de sombra en la superficie de interés, se recomienda realizar diversos escaneos desde posiciones distintas.

Una vez establecida esta posición se empleará sistemáticamente, y en ella se emplazará el trípode topográfico que soporta el escáner. Conviene señalar que el trípode debe estar bien asentado sobre el terreno y una vez se ha fijado la posición de todo el montaje es extremadamente importante evitar cualquier pequeño movimiento o vibración del TLS que pueden originar importantes errores de medición. Además, conviene señalar que el TLS se acopla al trípode topográfico mediante una base nivelante, la cual debe ser de una elevada calidad para soportar de manera óptima el dispositivo. Otros autores, coincidiendo con nuestra experiencia, inciden en la importancia de la estabilidad del

conjunto señalado (Scaioni 2005) habiendo llegado paralelamente a la misma conclusión, en numerosas ocasiones los dispositivos de acoplamiento proporcionados por los distribuidores no tienen la calidad suficiente como para asegurar la estabilidad necesaria en la adquisición de datos, haciendo inservibles las imágenes adquiridas.

2.1.b) Registro de la posición del escáner

Tras colocar el escáner sobre su soporte, se registra la posición del mismo por medio de una serie de reflectores previamente posicionados sobre el terreno que son escaneados. Dichos reflectores pueden permanecer fijos durante todo el periodo de monitorización, o se ubican en cada momento de escaneo, pero conociendo exactamente las coordenadas de su localización. Esto permite que durante el post-proceso, las diferentes nubes de puntos tengan una referencia común que oriente y posicione todos los datos recogidos en las distintas fases de la investigación.

Los reflectores pueden tener distintas características, en función de los requerimientos de distancia y posicionamiento; para grandes distancias (entre 500 y 1.000m) se emplean planchas de 50cm de longitud fijadas directamente al terreno, mientras que para distancias menores se pueden emplear cilindros de entre 10 y 25 cm de diámetro que son registrados desde cada posición y de este modo sirven de referencia para solapar las nubes de puntos obtenidas desde cada una de ellas. El número mínimo de reflectores necesarios para solapar escaneos es de tres, pero se están empleando un mínimo de 7 para aumentar el grado de confianza en este proceso.

Ligado al registro de la posición por medio de los reflectores, se realiza una corrección atmosférica en el software que controla desde un portátil el escáner. Esta corrección es rápidamente justificada por el mero hecho de que los pulsos de luz laser emitidos por el TLS viajan a través de un medio que es el aire y su velocidad de propagación depende de la temperatura, humedad y presión de este.

Desviaciones observadas en las primeras medidas realizadas han mostrado la importancia de repetir este paso cada hora y media de trabajo como máximo, evitando así variaciones atmosféricas que influyen en la medida y posibles problemas de estabilidad originados por la propia vibración del equipo.

FIG. 2: *Nube de puntos con colores del canal visible donde se observan sombras originadas por la topografía (Cuenca experimental de Izas).*

2.1.c) Escaneado de la zona de interés y adquisición de imágenes

La recogida de puntos propiamente dicha comienza en este punto; para ello se selecciona por medio de la mirilla telescópica del instrumento y un *joystick* dos vértices opuestos de la ventana deseada, teniendo en cuenta: la resolución del mallado de puntos que se quiere obtener, el tiempo de medida y el modo de operación en que debe trabajar el escáner (Manual instrucciones RIEGL). Es conveniente resaltar la importancia de encontrar un compromiso entre la resolución, el área y el tiempo de escaneo, que nunca debe exceder la hora, según el modo de operación empleado.

La resolución angular mínima es de 0,018º lo que se traduce en una separación de aproximadamente 15 mm entre puntos consecutivos a 50m de distancia (según manual instrucciones RIEGL LPM-321). Sin embargo hay que tener en cuenta el solapamiento que se produce por la divergencia del haz de luz, hace que determinadas resoluciones no sean útiles para determinadas distancias. Así, Lichte (2006) sugiere que el solapamiento entre puntos consecutivos no debe ser superior al 86%. En la práctica supone que para áreas escaneadas a unos 500m el espaciado mínimo admisible entre puntos es de 0,17m, pero al ir a distancias de 2.000m es de 0,68m, pasando a ser de 1,79m a 4.000m del punto de escaneo.

El último paso del proceso es la adquisición de imágenes de la zona escaneada mediante una cámara digital acoplada al instrumento, lo que proporciona información RGB para cada punto (Fig. 2). Dicha información resulta de interés para validar las mediciones (discriminación entre áreas cubiertas y libres de nieve), además de la posibilidad de asignar a cada punto de la nube obtenida su color en el canal visible.

Puesto que el TLS emite pulsos de luz laser, cuando las condiciones meteorológicas son adversas, la señal puede ser o bien absorbida (niebla) o reflejada (lluvia o nieve intensas) dando como resultado mediciones erróneas de puntos, por lo que se hace obligatorio descartar dichas condiciones durante el periodo de adquisición de datos.

2.2. Georeferenciación de la nube de puntos

Para poder relacionar la información adquirida mediante TLS con otras fuentes de información (p.ej. otras capas de cartografía digital o imágenes de satélite), resulta necesario convertir las coordenadas relativas del escaneo (distancia de cada punto a la posición del láser escáner) en un sistema de coordenadas absoluto, adquiriendo las coordenadas de los reflectores para posteriormente realizar la conversión a coordenadas globales con el software del escáner *Riprofile*.

Existen diversas técnicas para la adquisición de coordenadas GPS, como RTK, postproceso realizando la corrección atmosférica con estaciones fijas de GPS o el modo de trabajo con GPS diferencial (este método y el RTK han sido empleados en el Glaciar de Monte Perdido).

También existen otras técnicas para georreferencias como la taquimetría o una estación total, siendo esta última la que se aplicará en las algunas de las zonas de estudio.

2.3. Post-proceso

Los escaneos obtenidos en una campaña desde distintas posiciones deben solaparse empleando para ello el software del escáner que calcula una matriz de traslación y rotación basada en las posiciones de los reflectores comunes visibles entre dos escaneos Tras ello se filtran los datos eliminando puntos no deseados, como la vegetación. El fichero de puntos obtenido puede ser utilizado para obtener una malla de datos regular (raster), bien mediante técnicas de triangulación, o asignando directamente los valores de cada punto a una celda regular del tamaño deseado. Cuando se disponen de mallas regulares de dos momentos de mediciones distantes en el tiempo, pueden compararse directamente. Así, la Figura 6 muestra un ejemplo de las diferencias de espesor de nieve en dos escaneos consecutivos. Si dicha información se combina con mediciones manuales de densidad del manto de nieve, se puede conocer exactamente los cambios sucedidos en la reserva de agua de la

zona de interés, y reaccionándolos con las condiciones climáticas ocurridas durante el periodo entre ambos escaneos, analizar las condiciones que han dado lugar a los cambios registrados.

3. APLICACIONES DE LA TÉCNICA LÁSER ESCÁNER PARA EL ESTUDIO DE LA CRIOSFERA EN EL PIRINEO

A continuación se muestran unos ejemplos de aplicaciones del TLS para el seguimiento del manto de nieve y evolución glaciar en el Pirineo.

3.1. Bosque balneario de Panticosa

En las inmediaciones de este balneario, a 1.650 m s.n.m., se está monitorizando una superficie relativamente reducida (aproximadamente 1 hectárea) con una elevada variabilidad en cuanto a cubierta forestal, alternando zonas abiertas, con zonas cubiertas por un denso dosel forestal (pino silvestre). El principal objetivo de monitorizar el manto de nieve en este sector es conocer como interactúa la cubierta forestal con las condiciones climáticas dominantes para explicar la variabilidad espacial y temporal del manto de nieve a escala de detalle; brindando la posibilidad de estudiar la interacción de la cobertura arbórea en la captación de precipitación en forma de nieve y la sublimación de la misma, así como cuantificar las diferencias en los procesos de fusión que el manto de nieve sufre en zonas cubiertas por coníferas o zonas abiertas.

Para evitar la inferencia de los árboles en la zona de escaneo, resulta necesario escanear desde tres ángulos distintos bien contrastados, y posteriormente eliminar la vegetación en la fase de postproceso. Debido a las reducidas dimensiones de la zona de estudio y la enorme variabilidad espacial del manto de nieve inducida por la vegetación circundante se están realizando los escaneos a una muy elevada resolución espacial (3cm de separación media entre puntos, ver Fig. 3). Además, se trata de una zona en la que el manto de nieve no tiende a ser muy profundo y puede registrar variaciones muy notables en periodos de tiempo cortos, por lo que se realizan mediciones cada una o, máximo, dos semanas representando una elevada resolución temporal.

FIG. 3: *Nube de puntos obtenida desde una de las tres posiciones de escaneo del bosque donde se aprecia la resolución en los detalles de la vegetación.*

3.2. Macizo de Garmo Negro-Argüalas

En la zona Oeste del balneario se encuentran cimas que superan los 3.000m de elevación, que escaneadas desde un único punto elevado de la vertiente opuesta del circo glaciar del emplazamiento y gracias al largo alcance del TLS, permiten monitorizar el gradiente altitudinal en la acumulación de nieve, puesto que se toman datos desde los 1.600 hasta los 3.000 m.s.n.m. La posibilidad de obtener información para un rango de altitudes tan amplio desde una única posición de escaneo da idea del gran potencial de la instrumentación (Fig. 4). En este caso la resolución espacial del escaneo es notablemente menor (1 metro de resolución media entre puntos) y la resolución temporal entre escaneos es aproximadamente mensual.

FIG. 4: *Nube de puntos de la zona de estudio macizo Garmo Negro-Argüalas.*

3.3. Cuenca experimental de Izas

Entre 2.000 y 2.300m sobre el nivel del mar se encuentra una pequeña cuenca hidrológica de pasto subalpino, que desde hace mas de 25 años viene siendo una zona de estudio del Instituto Pirenaico de Ecología para investigaciones hidrológicas y climáticas (Figs. 2 y 6). Con una extensión aproximada de 33ha resulta de un elevado interés cuantificar las diferencias de acumulación de la nieve condicionados por múltiples factores como la curvatura del terreno, la pendiente o la exposición a la radiación solar así como relacionarlo con la meteorología y la climatología local. Se escanea a una resolución espacial mínima de 50 centímetros, siendo la resolución promedio de 30cm entre puntos; la resolución temporal es mensual, incrementándose a quincenal durante el periodo de fusión (abril y mayo).

3.4. Glaciar norte de Monte Perdido

Ubicado en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, el glaciar norte de Monte Perdido es uno de los mayores glaciares que aún perdura en la cordillera pirenaica. En esta área se pretende escanear el glaciar dos veces al año, uno en el momento de máxima acumulación de nieve anual (normalmente a lo largo del mes de mayo), y otra en otoño, cuando prácticamente ha finalizado el

periodo de ablación. De esta forma se puede reconstruir anualmente el balance de masa del glaciar y ponerlo en relación la evolución climática observada. El escaneo del glaciar requiere mediciones entre 1.000 y 2.500 metros de distancia, con un espaciado medio de 1 metro. La Figura 5 muestra el aspecto del escaneo de un sector frontal del glaciar inferior, pudiéndose observar cómo a pesar de la elevada distancia a la que se escanea el grado de detalle obtenido puede ser muy elevado. En este caso se han tomado las coordenadas de cada reflector con dos métodos distintos, en post-proceso con GPS diferencial y en RTK, con una precisión ligeramente inferior a 2cm y una exactitud de 2cm en coordenadas UTM, WGS84.

FIG. 5: *Nube de puntos con su color en RGB de la parte inferior del glaciar de Monte Perdido.*

4. RESULTADOS

A lo largo del invierno 2011-2012 y la primavera consecutiva, se han realizado seis mediciones en las zonas de estudio del bosque de Panticosa y de la Cuenca experimental de Izas respectivamente, y cuatro en la zona Garmo Negro-Argüalas. Las resoluciones obtenidas han sido establecidas de manera que se cumpla el criterio de solapamiento entre puntos contiguos señalado en el apartado 2.1.c, y se han obtenido los siguientes resultados en las distintas áreas de estudio.

Zona de estudio	Res. angular media	Res. lineal media
Bosque Panticosa	0,047º	0,03 m
Garmo Negro-Argüalas	0,036º	1 m
Cuenca exp. de Izas	0,027º	0,3 m
Glaciar Monte Perdido	0,036º	1 m

TABLA 1: *Resolución media de las nubes de puntos en las áreas de estudio.*

Es relevante señalar que estos resultados son óptimos para los propósitos del trabajo que se está desarrollando y se han establecido por motivos operativos, por un lado para que los tiempos de medida

no excedan el límite de una hora y media así como por el propio post-proceso de los puntos a la hora de su rasterización.

En todas las campañas realizadas se han solapado los distintos escaneos obtenidos, así como se ha analizado los errores de solapamiento derivados de pequeñas desviaciones en el posicionamiento de los reflectores, descartando aquellos en los que existían errores de posicionamiento de las coordenadas superiores a 10cm para un mismo reflector. Para calificar la calidad de los datos recogidos se ha empleado como indicador la desviación estándar en la posición de los reflectores calculada por el software del escáner. Lógicamente, a menor distancia entre el escáner y los reflectores, menor error se ha detectado en el posicionamiento de los reflectores. Así, en el Balneario de Panticosa, el error medio estimado es de 0,004m. Cuando la distancia entre las posiciones de escaneo y la topografía del terreno supera los 500m este límite no es tan restrictivo, ascendiendo a 0,05m de desviación estándar, pues la resolución media de los puntos tomados, 0,3m en el caso de Izas-Ibón de la Peña y 1m en el macizo Garmo Negro-Argüalas, permite un margen mayor en este parámetro. Este límite ha permitido descartar aquellas campañas de medición que no han superado este control de calidad habiéndose desechado numerosos escaneos. Conviene destacar que los mayores errores obtenidos han coincidido con escaneos en los que no se ha respetado convenientemente el criterio de tiempo en el posicionamiento con los reflectores y la corrección atmosférica (ver apartado 2.1.c), o cuando las condiciones meteorológicas han sido adversas (viento intenso, precipitación en forma de lluvia o nieve, niebla, etc…). En este punto conviene señalar que debido al movimiento inherente a la operatividad del TLS se produce una vibración en todo el sistema que puede originar, y de hecho así ha ocurrido en alguno de los escaneos realizados, inestabilidad en todo el sistema lo cual se traduce en una desviación de los datos recogidos haciendo inservible la medición, en la mayoría de los casos esto queda solucionado al respetar el límite de una hora y media de trabajo entre dos registros consecutivos de la posición del escáner.

FIG. 6: *Diferencias de espesor nieve entre 02/05/2012 y 17/04/2012 en la cuenca experimental de Izas.*

Como ejemplos de medición real de diferencias de espesor de las distintas superficies originadas por la acumulación de nieve se muestran dos casos. Sirva para ello la Figura 6, donde queda claro la mayor acumulación que se produce en las vaguadas del terreno (zonas rojas) o como en las caras sur en lugar de haberse producido una acumulación de nieve, se ha producido una disminución (zonas azules) debido a la mayor exposición a la radiación solar, así como el hecho de que la nieve precipitada entre ambas campañas de muestreo fuese acompañada de vientos de componente sur.

En la Figura 7 se muestra diferencias de espesor obtenidas en el bosque de Panticosa, apreciándose menores espesores en las zonas situadas bajo árboles (las zonas rojas representan puntos sin datos y representan la vegetación).

Fig. 7: *Diferencias espesor bosque Panticosa entre 21/12/2011 y 02/02/2012.*

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha pretendido mostrar el gran potencial de la metodología presentada para estudios de la criosfera, concretamente en investigaciones relacionadas con la monitorización del manto de nieve y glaciares en relación a la variabilidad climática. Se ha presentado un protocolo completo para la adquisición y tratamiento de las nubes de puntos medidas por el TLS. Como se ha mostrado, los errores en la adquisición de puntos se reduce drásticamente si se controla la estabilidad del escáner, la correcta georeferenciación de los reflectores y la consideración de las condiciones atmosféricas para calibrar el aparato (temperatura, presión atmosférica y humedad relativa) y elegir el momento de escaneo (evitando situaciones de viento intenso, precipitación, visibilidad limitada, etc). Un correcto equilibrio entre distancia de escaneo y resolución de puntos de medición son necesarios para optimizar los tiempos de escaneo, más aún cuando a determinadas distancias la divergencia del haz del láser impide disponer de una mayor resolución real. La elevada velocidad en la adquisición de puntos así como la posibilidad de recoger datos desde un punto seguro, situado a grandes distancias de la zona de muestreo permiten asegurar que el TLS combinado con técnicas de georreferenciación por medio de GPS, son muestra de la versatilidad de la combinación de ambas técnicas. Se puede asegurar que siguiendo la metodología y respetando los límites señalados, los datos recogidos tendrán una calidad óptima para multitud de aplicaciones de estudios climatológicos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos cicyt CGL2011-27574-CO2-02 y CGL2011-27536, el proyecto europeo ACQWA (FP7-ENV-2007-1- 212250), el proyecto DGA-La Caixa: “Efecto de los escenarios de cambio sobre la hidrología superficial y la gestión de embalses del Pirineo Aragonés, y el proyecto financiado por la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTTP01/10): “La Influencia del cambio climático en el turismo de nieve”.

REFERENCIAS

Bürki, R., Elsässer B., Abegg, B. (2003), *Climate change: Impacts on the Turism Industry in Mountain Areas*. Proceedings, 1st International Conference on Climate Change and Tourism.

Chueca Cía, J., Julián Andrés, A., Saz Sánchez, M.A., Creus Novau, J and López-Moreno, J.I. (2005). *Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Spanish Pyrenees)*. Geomorphology 68 (3-4): 167-182.

Egli, L., Jonas, T., Grünewald, T., Schirmer, M., Burlando, P. (2011) *Dynamics of snow ablation in a small Alpine cathment by repeated terrestrial laser scans*Hydrological Processes DOI: 10.1002/hyp. 8244

Lichte D. (2006), *Angular resolution of terrestrial laser scanners.* The Photogrammetric Record 21 (114): 141-160

López-Moreno, J.I. y García-Ruiz, J.M. (2004). *Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees* Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques, 49(5).

López-Moreno, J.I.; Goyette S. y Beniston M. (2009) *Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients* Journal of Hydrology 374 384–396.

Prockop, A. (2008) *Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements* Cold Regions Science and Technology 54 (2008) 155–163

Prokop, A., Panholzer, H., (2007).*Monitoring landslides using terrestrial laser scanning. Finalreport*: EU-Research Project ClimChAlp,Work, pp 31–34 and 108–112.

Reshetyuk, J., (2006). *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners.* PhD-thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Division of Geodesy, 100 44 Stockholm.

RIEGL, *Manual de isntrucciones LPM-321.*Scaioni, M., (2005) *Direct georreferencing of TLS in surveying of complex sites* Proceedings of the ISPRS Working Group, 2005

Schwalbe, E., H-G.Maas a, H-G., Dietrich, R., Ewert, H. (2008) *Glacier Velocity determination from multitemporal terrestrial long range laser scanner point clouds.* Commission V, WG V/3.