



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE MEDIO AMBIENTE  
Y MEDIO RURAL  
Y MARINO

SECRETARÍA DE ESTADO  
DE MEDIO RURAL Y AGUA

DIRECCIÓN GENERAL  
DEL AGUA

**ESTUDIO DE LA CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS  
PROCEDENTES DE LA FUSIÓN NIVAL Y SU INFLUENCIA SOBRE EL  
MEDIO AMBIENTE EN LAS PRINCIPALES CORDILLERAS ESPAÑOLAS  
(PROGRAMA ERHIN)**

**INFORME**

**DETERMINACIÓN DE LOS ESPESORES DE HIELO EN LOS GLACIARES DEL ANETO  
Y LA MALADETA MEDIANTE GEO-RADAR. Septiembre de 2008**

## **OBJETIVOS**

El Programa ERHIN (Evaluación de los Recursos Hídricos procedentes de la Innivación) de la DGA, viene realizando desde 1990 un seguimiento sistemático de los glaciares, atendiendo a sus dinámicas morfométricas, evolutivas, climáticas, nivológicas e hidrológicas con el objeto de controlar y cuantificar las variaciones tanto en su extensión como en su naturaleza.

A las campañas de campo de observación y topográficas junto a los vuelos fotogramétricos y de control mediante imágenes satélite, se suma ahora un estudio geofísico sobre los propios glaciares con el objeto de determinar el estado actual de los glaciares.

Así, a finales de septiembre de 2008 se llevó a cabo el estudio mediante geo-radar por RES (Radio Echo Sounding) de los glaciares de Aneto y La Maladeta. Los principales objetivos del presente estudio fueron, por una parte, la determinación de los espesores de hielo y topografía del lecho y superficie de ambos glaciares, así como la definición de sus estructuras internas.

## **METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS**

Para la toma de ensayos en campo se empleó el geo-radar de ultra-alta frecuencia (UHF) por pulsos TGU. El método de trabajo consistió en la toma de señales que de forma continua provenían del geo-radar en su desplazamiento sobre la superficie del glaciar a lo largo de unos ejes longitudinales y transversales, de forma que se cubriese la mayor superficie glaciar posible.

Esta forma de trabajo difiere de las utilizadas hasta ahora, puesto que ha permitido la toma de un número mucho mayor de puntos de sondeo lo que determina de forma decisiva la calidad de los resultados.

Para el glaciar del Aneto se definieron un total de 31 ejes y para el de La Maladeta 20. La resolución espacial utilizada para la toma de datos depende de las condiciones del terreno para cada eje, pero puede decirse que como media se registraba un dato cada 5 cm de desplazamiento, lo que ha proporcionado un conjunto significativo de estos puntos de sondeo, que se pueden cifrar en unos 150.000 puntos para el glaciar de La Maladeta y unos 200.000 para el glaciar del Aneto.

Además de la toma de datos de espesores de hielo, se registraron mediante la utilización de un GPS diferencial de gran precisión, un conjunto importante de puntos de control para los que se tomaron de forma muy precisa sus coordenadas de localización sobre el glaciar. Además, la utilización de las bases topográficas definidas en otros trabajos de campo llevados a cabo en estos glaciares, ha permitido la traslación de todos los puntos tomados con geo-radar a coordenadas absolutas, lo que ha supuesto poder obtener todos los mapas de resultados sobre las imágenes satélite de las zonas estudiadas, proporcionando así mayor realidad a los mismos.

También han sido de gran utilidad para la calibración de los datos obtenidos con el geo-radar, los puntos en los que se hicieron prospecciones (ensayos de campo de espesor) mediante sonda de vapor y sobre la superficie del glaciar para atestiguar así el dato de la profundidad del glaciar en cada uno de ellos. Se realizaron un total de 4 ensayos en el glaciar de La Maladeta y 4 en el de Aneto.

Con todos estos elementos de trabajo y una vez establecidos todos los puntos de control a sus coordenadas reales, y tomando como condición de contorno el conocido del perímetro del límite glaciar, se calcula mediante un proceso de interpolación, el mapa completo del fondo y espesor glaciar a una resolución de 1 x 1 m.

Configurado el mapa completo de espesor glaciar, se pueden realizar, como se ha comentado antes, representaciones muy visuales sobre imágenes de satélite de la zona, lo que permite localizar de forma inmediata las zonas de máximo espesor de hielo y las zonas más débiles y por tanto más propensas a su desaparición en el corto plazo.

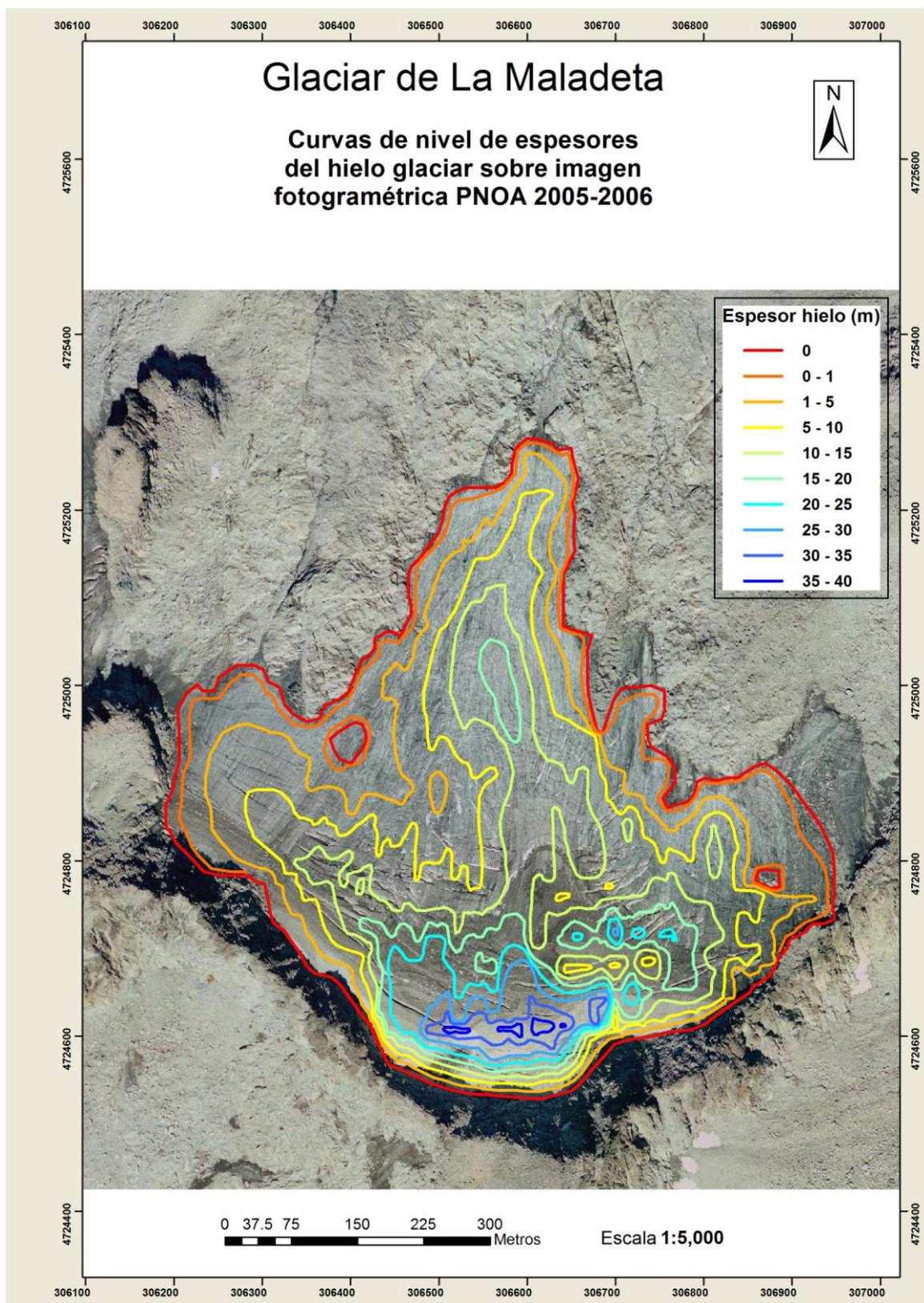
Con el método de trabajo realizado, se pueden obtener posteriormente un amplio abanico de resultados tanto numéricos como gráficos.

Una vez completados estos mapas se obtienen ya los primeros resultados de espesores de hielo máximos en ambos glaciares, resultando un valor de 40 m para el glaciar de La Maladeta y de 30m para el de Aneto.

De forma análoga, se puede extender el mapa de resultados, calculando un modelo digital de espesores glaciares, de resolución 1x1 m, utilizando en este caso herramientas de SIG que nos permitirán además realizar una representación tridimensional de estos resultados distribuidos.

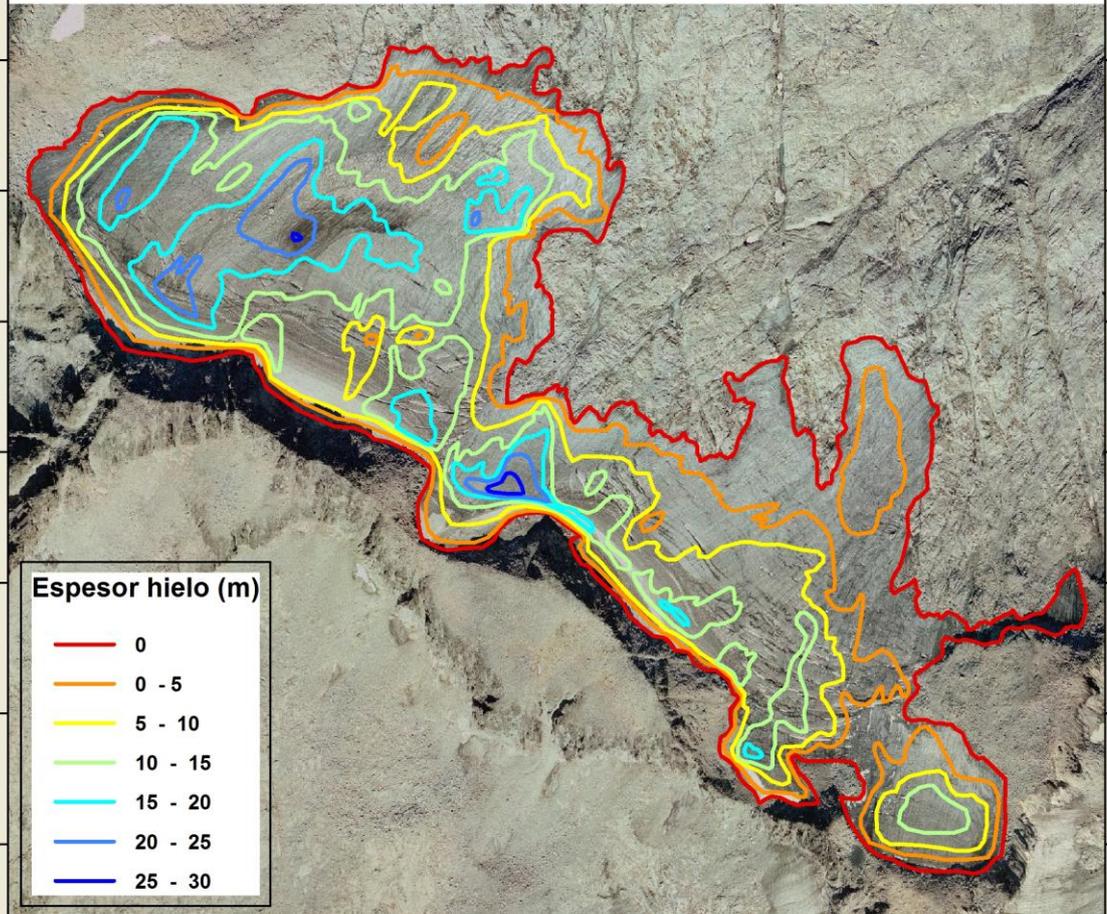
En los siguientes mapas se muestran las curvas de nivel del espesor del hielo sobre las imágenes PNOA, facilitando así la localización de las zonas con mayor espesor y las zonas con menor espesor y por tanto con mayor riesgo de desaparición en el corto plazo de tiempo.

# CURVAS DE NIVEL DE ESPESORES DE HIELO



# Glaciar de Aneto

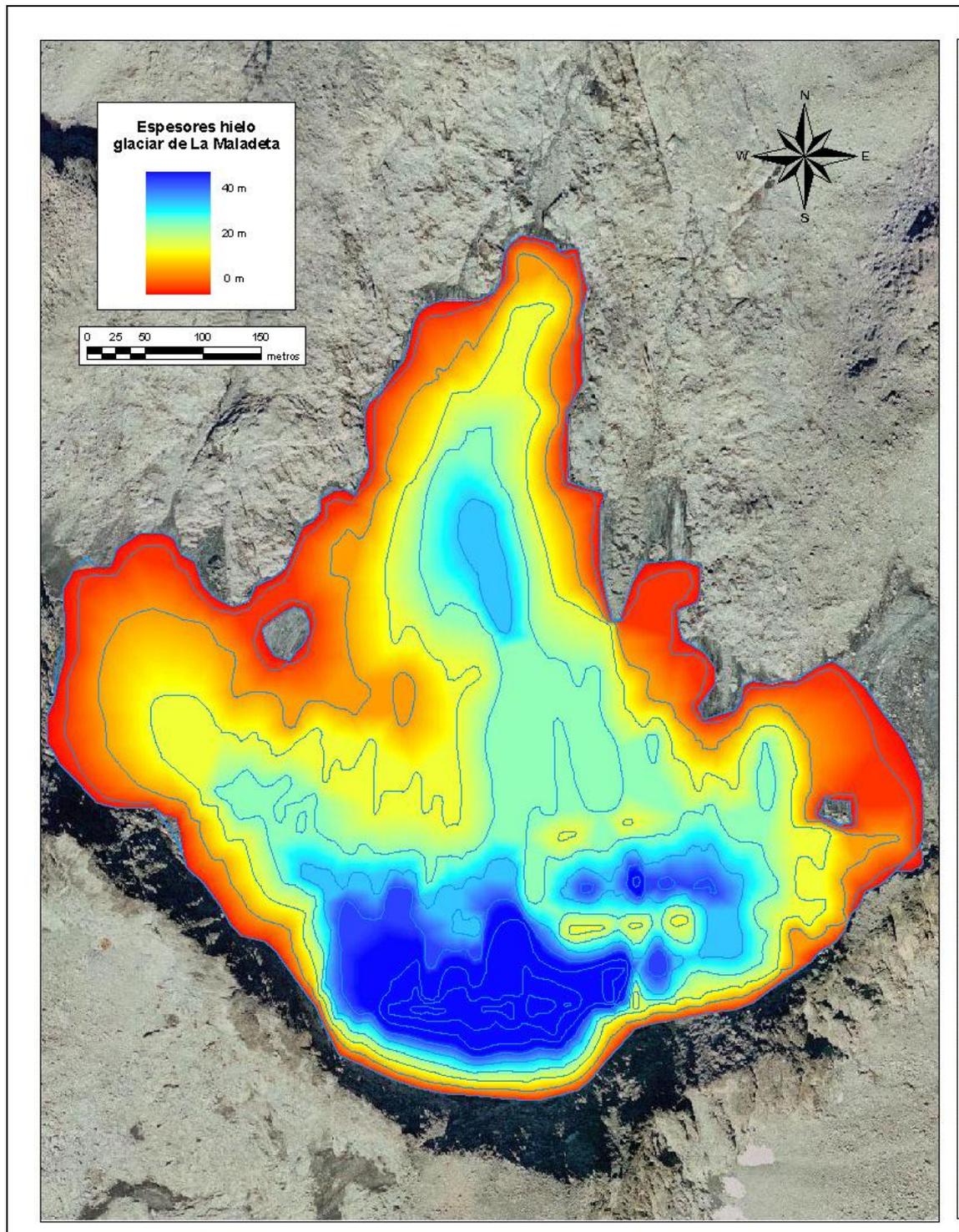
Curvas de nivel de espesores  
del hielo glaciar sobre imagen  
fotogramétrica PNOA 2005-2006

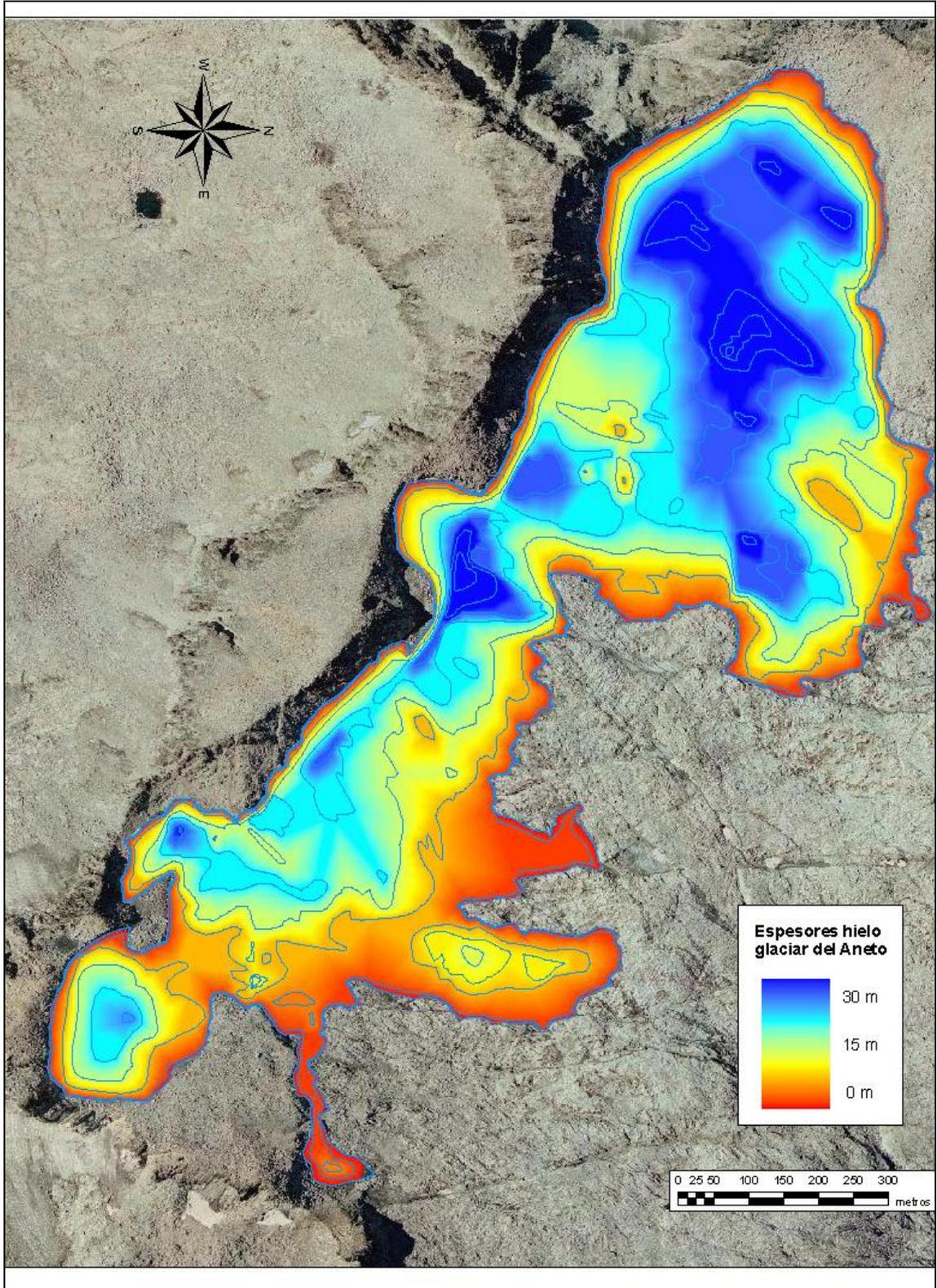


0 70 140 280 420 560 Metros

Escala 1:9,000

## MODELOS DIGITALES DE ESPESORES DE HIELO

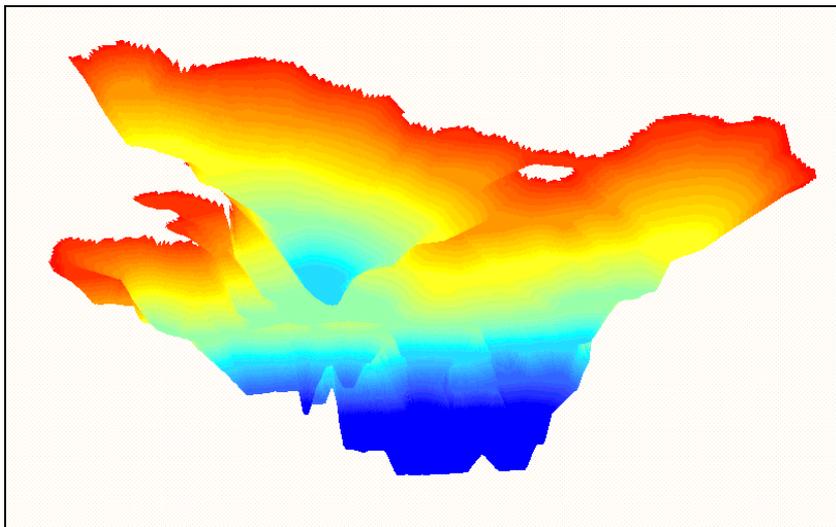
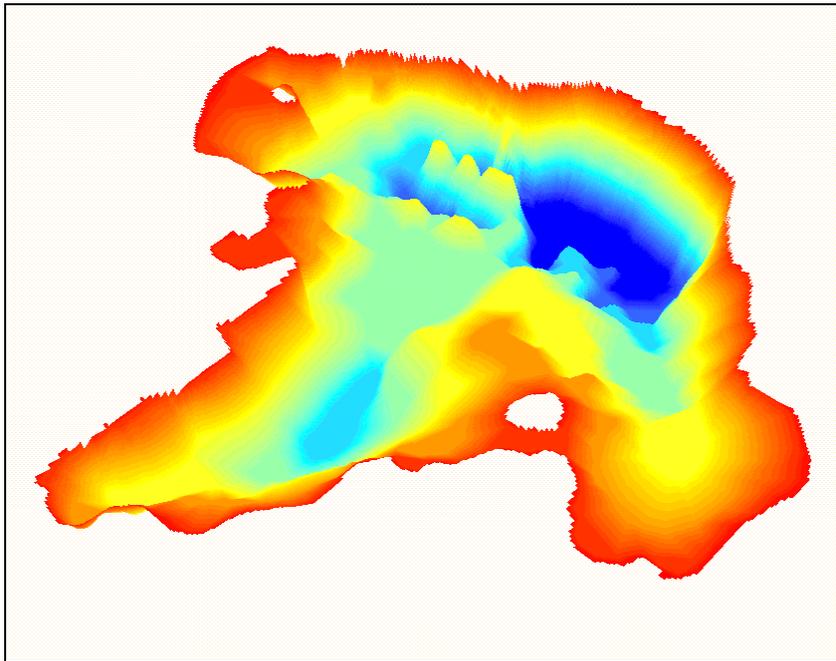


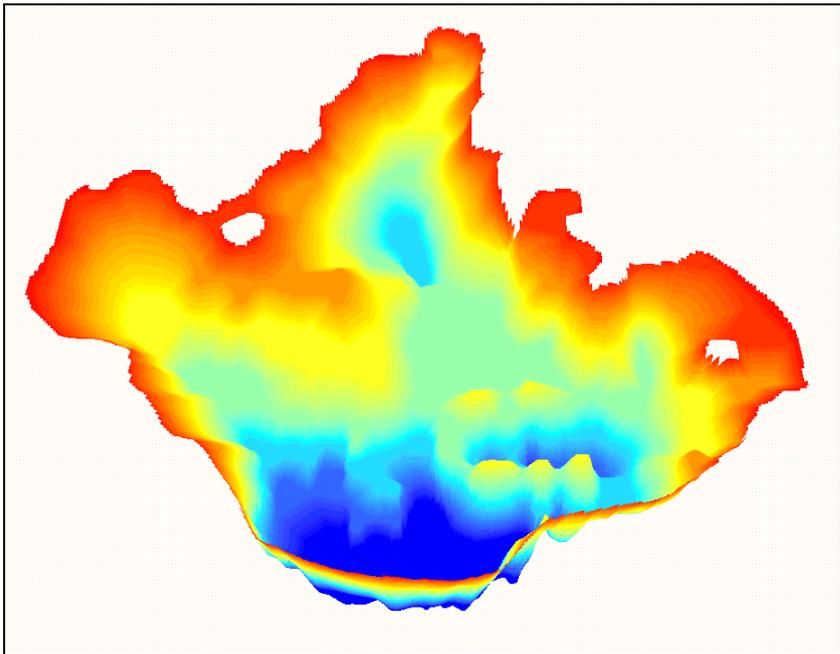
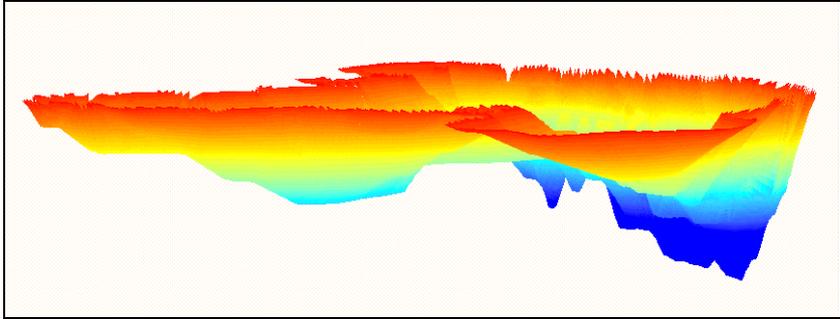


## VISTAS 3D DE LOS CUENCOS GLACIARES

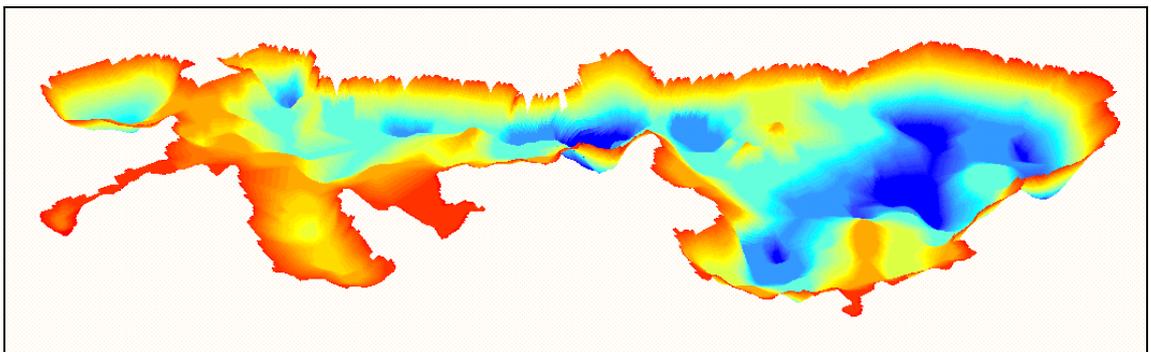
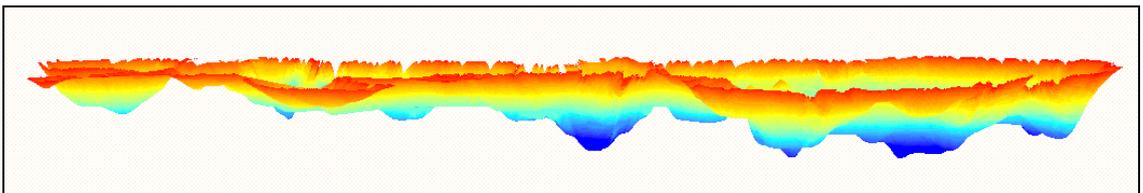
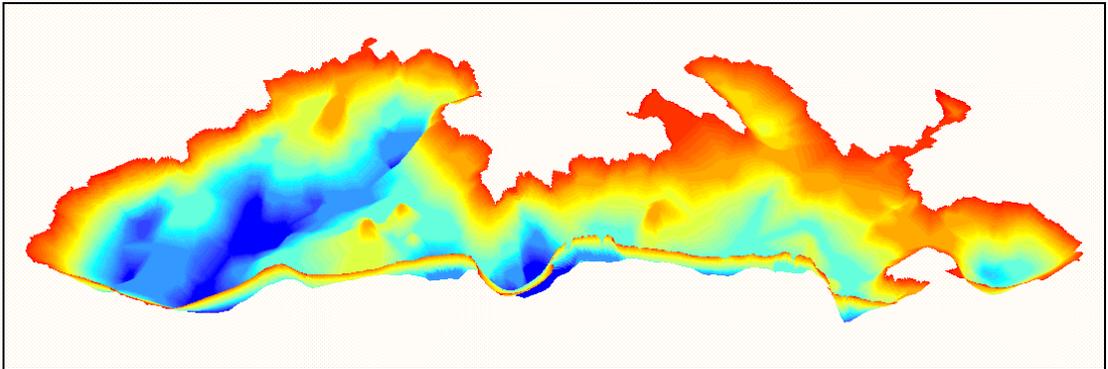
En los siguientes esquemas, se presentan diversas vistas en 3D del cuenco glaciar, para el caso de La Maladeta, desde diferentes puntos de vista.

El rango de colores va desde el azul (máximo espesor) hasta el rojo (espesor mínimo).



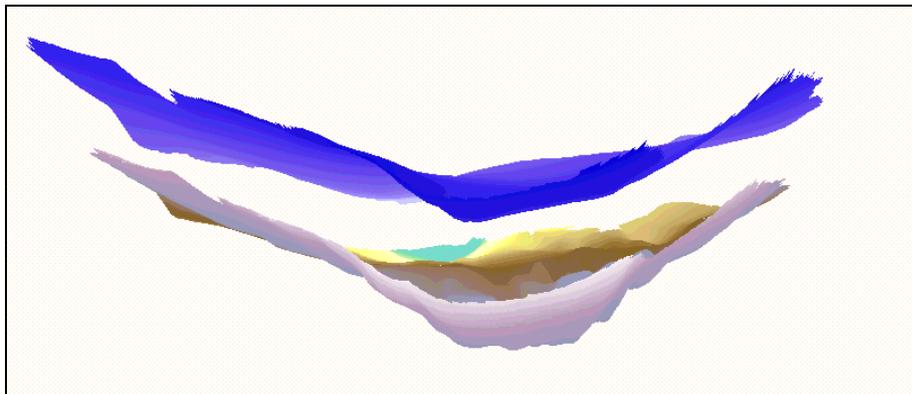
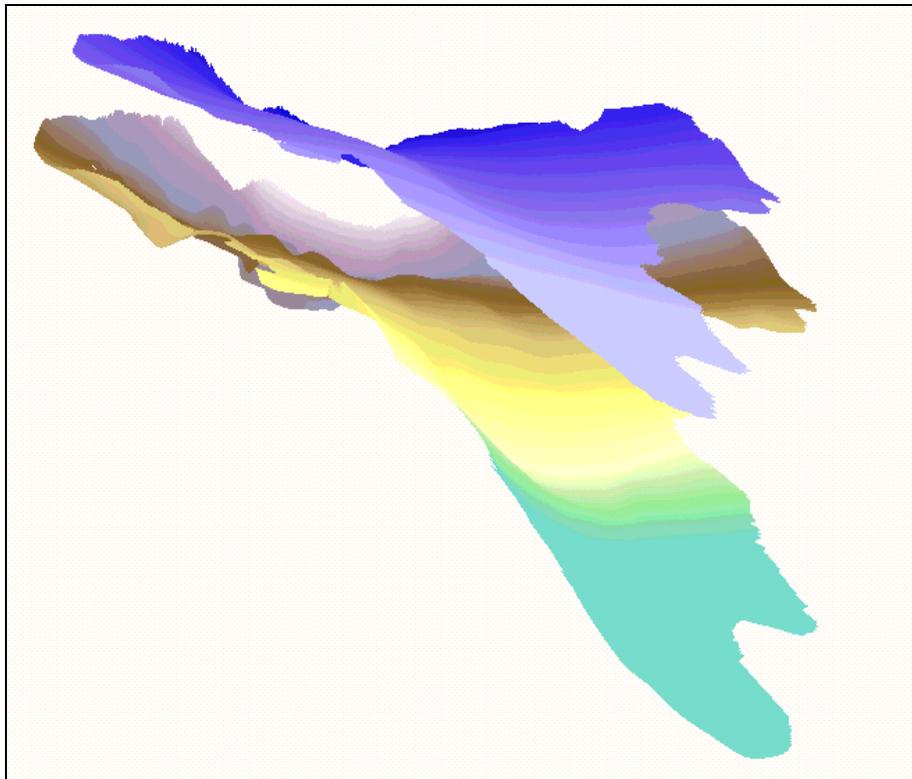


Y los equivalentes para el glaciar de Aneto son los siguientes:

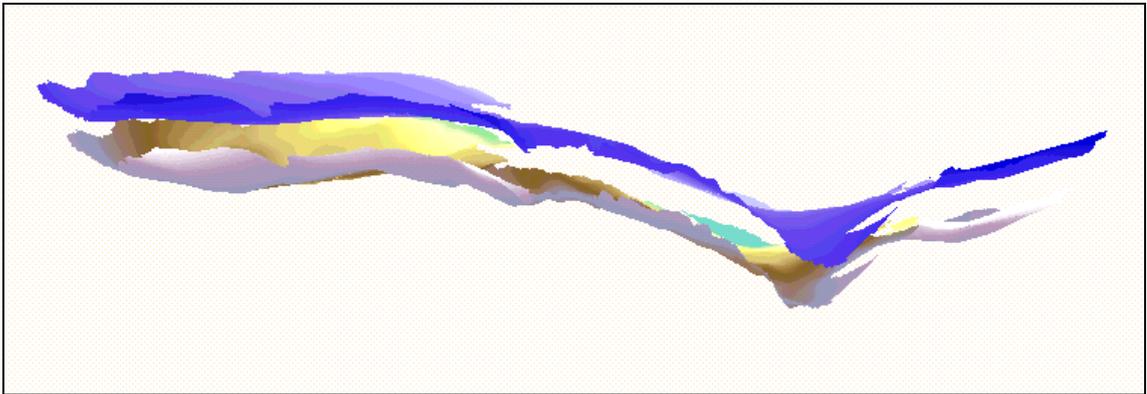
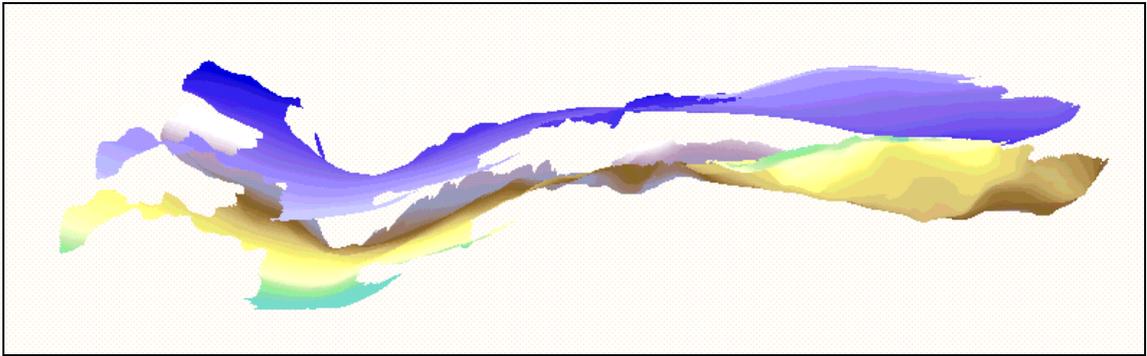


## MODELOS DIGITALES TRIDIMENSIONALES DE ESPESORES DE HIELO

Basándose en los puntos tomados en campo mediante GPS, se procede a desplazar y proyectar los anteriores modelos digitales de espesores, sobre el modelo digital del terreno, lo que permite obtener de una representación tridimensional distribuida real del zócalo subglaciar. El modelo digital del terreno (capa superior) está desplazada respecto de la capa del fondo glaciar para una mejor visualización.



Y de forma análoga para el glaciar de Aneto.

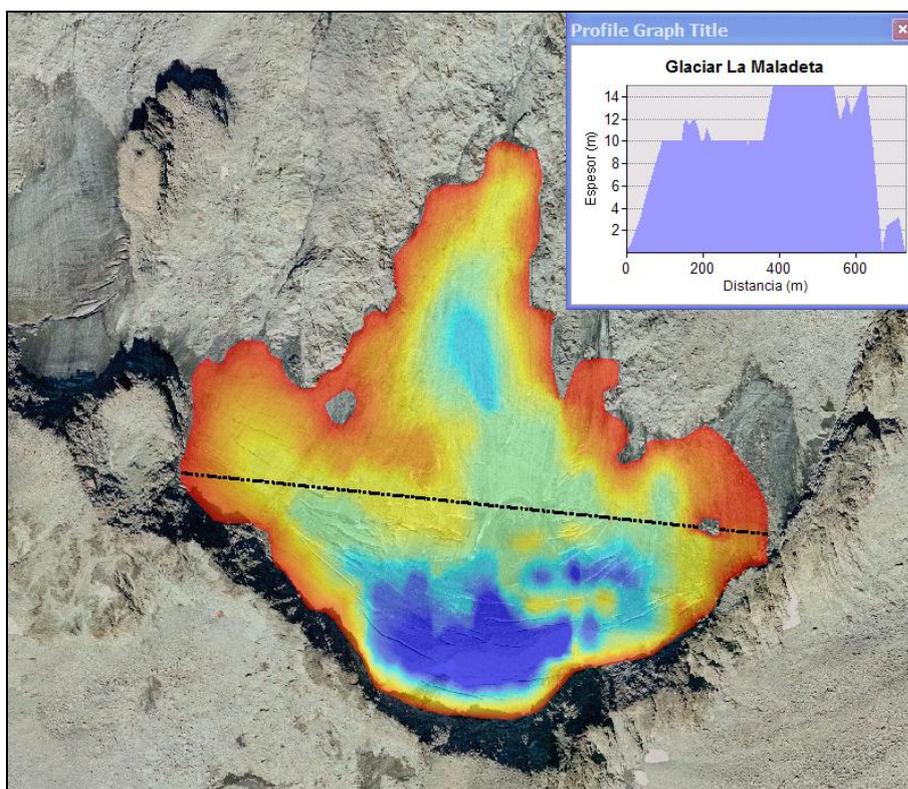
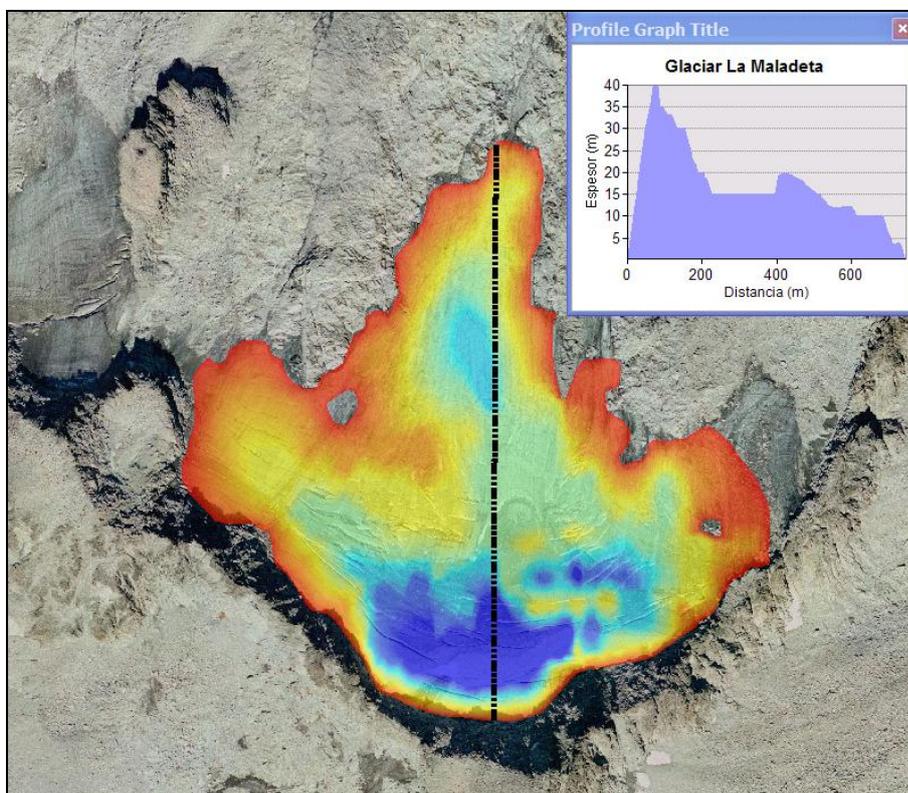


A partir de estos modelos digitales de espesores de hielo, se pueden obtener los perfiles de variación del espesor de hielo para cualquier eje a lo largo de la superficie del glaciar.

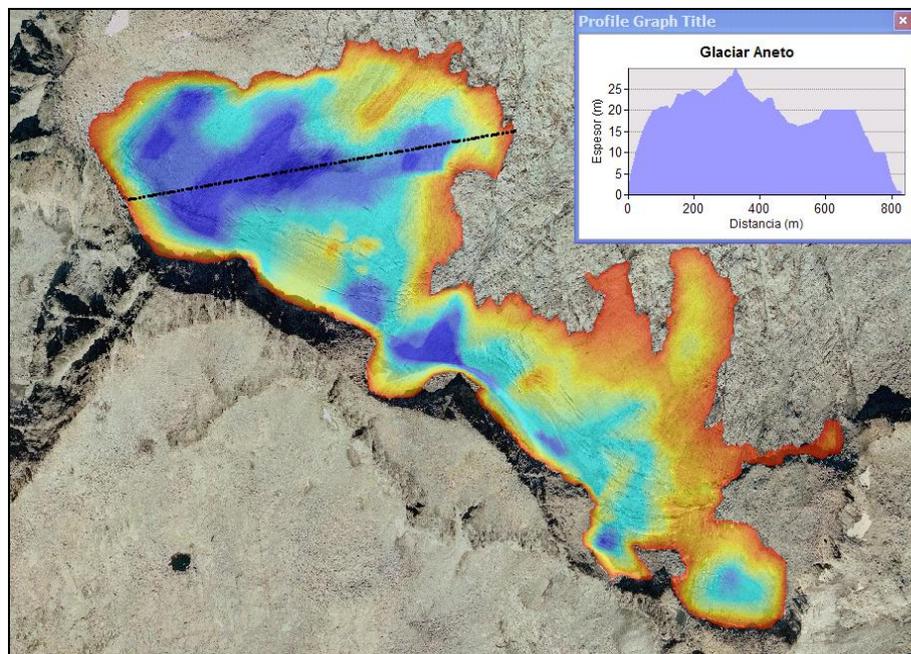
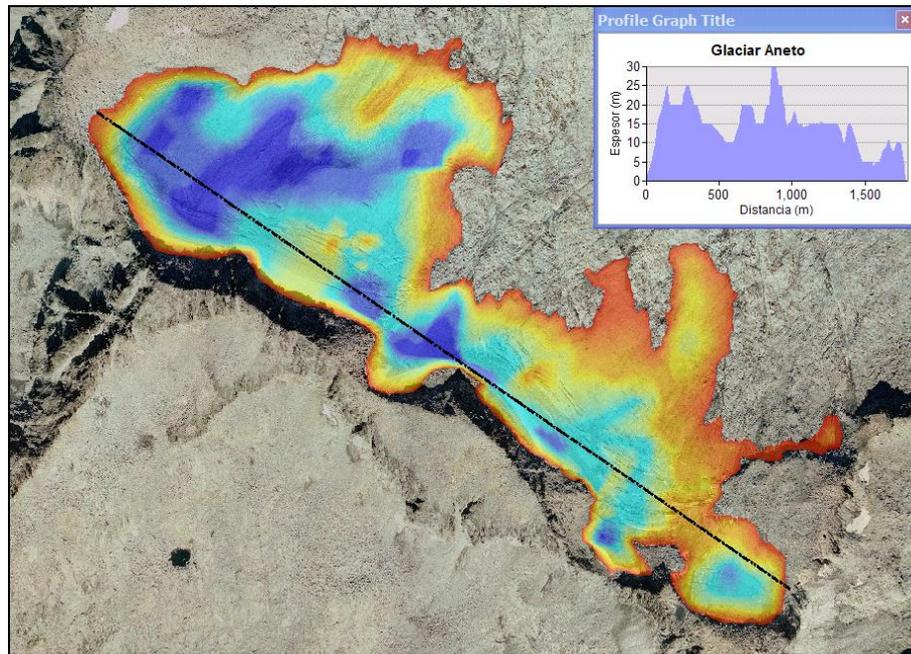
En el siguiente punto se muestran dos ejemplos para los dos glaciares estudiados.

## PERFILES DE ESPESORES DE HIELO

En los siguientes esquemas, se muestran los perfiles de espesores de hielo a lo largo de unos ejes cualesquiera sobre la superficie glaciar.



Y de forma análoga para el glaciar de Aneto.



## DATOS NUMÉRICOS DE SUPERFICIES Y VOLÚMENES GLACIARES

Por último dentro del apartado de resultados, cabe destacar los datos numéricos obtenidos respecto de las superficies y volúmenes de los cuencos glaciares y su comparación con los obtenidos a través de las mediciones llevadas a cabo en 2007 dentro del programa ERHIN.

Glaciar	ERHIN 2007	Resultados del presente estudio			
	Superficie (ha)	Máximo espesor hielo (m)	Superficie en 2D (ha)	Superficie en 3D (ha)	Volumen cuenco glaciar (hm <sup>3</sup> )
Aneto	69	30	68.72	70.62	7.62
La Maladeta	28	40	28.97	30.31	3.36

## **CONCLUSIONES**

Los objetivos iniciales del presente estudio abarcaban el conocimiento detallado de la distribución del espesor del hielo glaciar y la topografía del lecho del mismo.

El interés por conocer estas importantes magnitudes radica en primer lugar en el conocimiento de las actuales reservas de hielo presentes en cada glaciar y la distribución espacial de las mismas, lo que permitirá evaluar tanto las variaciones futuras del volumen glaciar como estimar las zonas más propensas a su posible desaparición, en caso de seguir la tendencia actual de pérdida continua de superficie glaciar.

La colección de mapas y esquemas obtenidos proporcionan información más que suficiente para cubrir estos objetivos, con la vista puesta en futuros trabajos de parecida naturaleza, destinados a estudiar la evolución espacio-temporal de los cuencos glaciares.

**GLACIAR DE LA MALADETA**  
**Trabajos de geofísica (septiembre de 2008)**



Glaciar de La Maladeta desde el helicóptero



Torre Cordier. Transporte de personal y material topográfico mediante helicóptero



Torre Cordier. Bases topográficas utilizadas



Glaciar de La Maladeta visto desde la base topográfica



Parte superior del glaciar. Preparando los GPS diferenciales para la obtención de puntos de la superficie del glaciar y su contorno



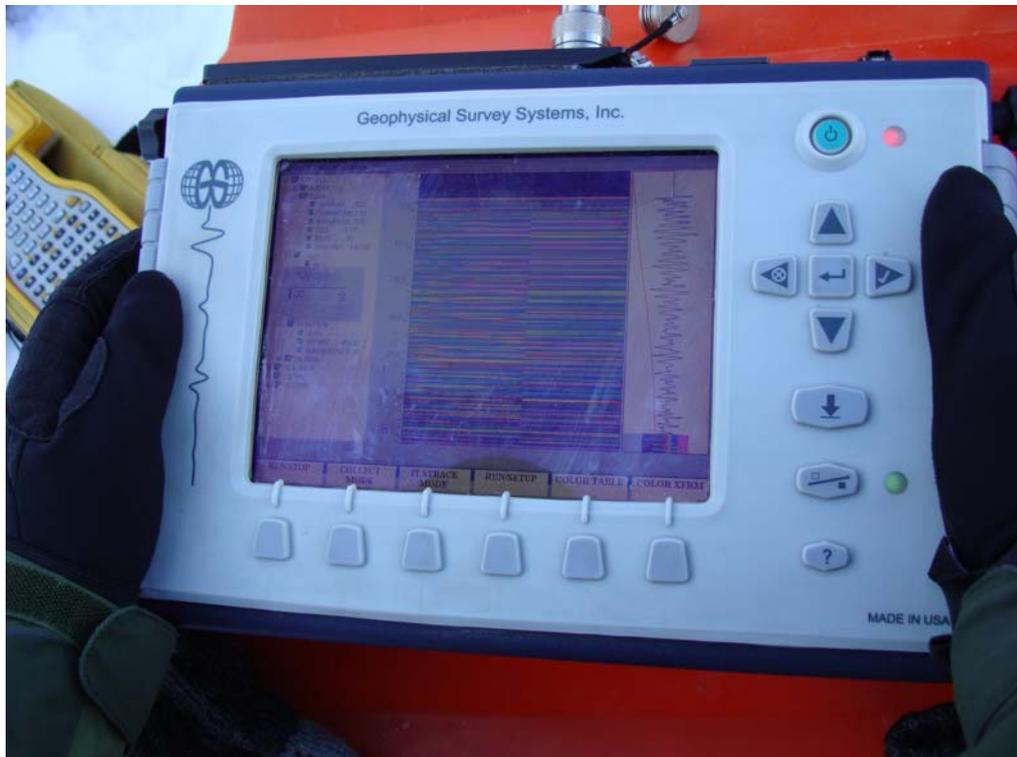
Parte superior del glaciar. Toma de puntos por topografía clásica y GPS diferencial



Parte baja del glaciar. Medida de puntos de la superficie mediante GPS diferencial



Parte alta del glaciar. Rimaya. Preparando los aparatos de geofísica (geo-radar)



Pantalla de registro del geo-radar



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos. Parte alta del glaciar



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos. Parte alta del glaciar. Perfil longitudinal



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos. Parte intermedia del glaciar



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos. Parte baja del glaciar



Medida in situ del espesor del glaciar en una grieta de la parte baja, para calibración del georadar

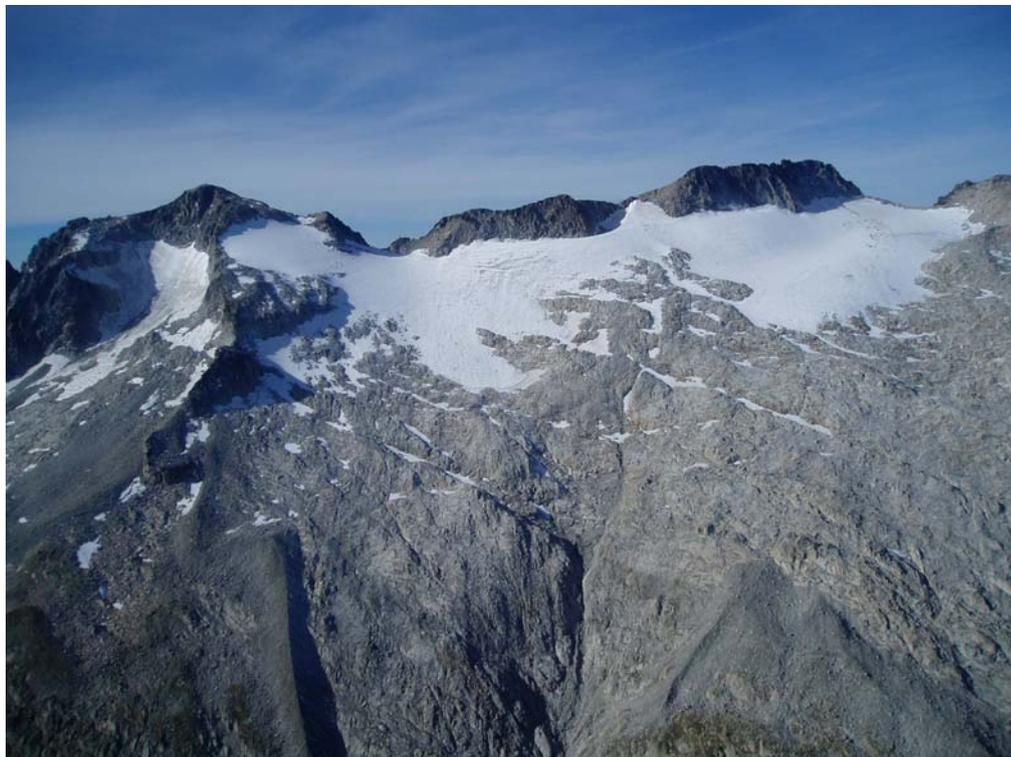


Realización de los perfiles-sondeos geofísicos. Parte baja del glaciar. Comprobación mediante un segundo aparato de medida



Parte baja del glaciar. Cueva formada en el hielo

**GLACIAR DEL ANETO**  
**Trabajos de geofísica (septiembre de 2008)**



Glaciar del Aneto desde el helicóptero



Transporte de personal y material mediante helicóptero



Base topográfica



Medida de puntos de la superficie mediante GPS diferencial



Medida de puntos de la superficie mediante GPS diferencial



Medida de puntos de la superficie mediante GPS diferencial en la rimaya



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos en la rimaya



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos



Realización de los perfiles-sondeos geofísicos



Medida in situ del espesor del glaciar mediante sondeo por sonda de vapor, para calibración del geo-radar



Recogida de personal y material mediante helicóptero