

# Análisis con un radar SFCW de la estructura del manto nivoso: medidas experimentales y simulación

Adrián Subías Martín, Víctor Herráiz-López, Iñigo Salinas Ariz, Rafael Alonso.

Grupo de Tecnologías Fónicas (GTF)  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)  
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.  
Tel. +34-976762707, e-mail: [asubias@unizar.es](mailto:asubias@unizar.es)

## Resumen

En este trabajo se analizan las propiedades físicas de las capas que conforman el manto nivoso y se comparan las medidas experimentales realizadas con un radar con las simuladas mediante los datos climatológicos del entorno del radar. Las medidas se han realizado en la estación experimental AEMET-Formigal, situada a 1880 metros de altitud.

## Introducción

La nieve, como reserva de agua, juega un papel relevante en el ciclo hidrológico de los Pirineos. Su estructura interna está muy condicionada por las situaciones climáticas en cada momento. Haciendo que las propiedades electromagnéticas de las capas sean variables. El efecto más importante es la aparición de agua líquida (LWC, Liquid Water Content) en el interior de las diferentes capas.

En la figura 1, se muestra la ubicación del radar SFCW (Stepped Frequency-Continuous Wave) utilizado en la estación experimental. La técnica se fundamenta en el análisis de la reflectancia espectral [1] en el rango de 0,6 – 6 GHz del cuál se obtiene información geométrica y estructural del manto nivoso de forma no destructiva.

## Perfil de propiedades físicas

Los datos experimentales recogidos en este trabajo son del día 13 de marzo de 2024. La altura del corte transversal es de 183 cm, mientras que la altura total medida por el radar es de 161,5 cm. Esta diferencia se debe a la orografía de la estación experimental

La figura 2a muestra la altura total de la cata así como una versión simplificada de la estructura interna de capas, obtenida por inspección visual. También, muestra el perfil de la parte real de la constante dieléctrica del medio. Esta magnitud se obtiene por medio de un resonador electromagnético diseñado específicamente para esta aplicación [2]. La frecuencia de resonancia se puede relacionar con la

parte real de la constante dieléctrica del medio [3] mediante la expresión:  $\epsilon' = \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-2}$ , donde  $f$  es la frecuencia de resonancia en GHz y  $f_0$  es la frecuencia de resonancia del aire en GHz.

En paralelo, la AEMET realiza simulaciones de la estructura del manto nivoso, con el software SnowPack [4], cuyo forzamiento se realiza mediante diferentes variables climatológicas medidas. La figura 2b y 2c muestran los resultados de densidad y LWC de la simulación el día del corte transversal. Se observa paralelismo de las capas observadas con las diferencias de las propiedades físicas.

## Resultados

El radar nos proporciona información, en el dominio espacial, mediante la transformada de Fourier de la reflectancia espectral, distinguiendo las reflexiones debidas a los cambios bruscos en el índice de refracción. Así se obtienen los resultados que aparecen en la figura 3, donde la línea naranja es la medida directa y la línea amarilla la obtenida aplicando la técnica zero Padding. Los picos más intensos son la reflexión en la interfase aire-nieve y el suelo. Lo que se encuentra entre estos dos picos es la información de las diferentes capas del manto nivoso. La línea azul muestra la información de reflectancia de las capas simuladas. Se observa una concordancia en los picos de reflectancia de las diferentes curvas con la estructura visualizada en el corte transversal.

## Conclusiones

Se ha conseguido clarificar una estructura interna del manto nivoso con la comparación de los datos experimentales y simulados. De esta manera, el radar puede estudiar la estructura interna sin la necesidad de perturbar el manto con un corte transversal. Además, es posible hacer un seguimiento de las principales superficies: el manto nivoso y el suelo. Lo que permite realimentar el software de simulación.

## Agradecimientos

Gracias a AEMET por permitir el uso de sus instalaciones y el acceso a sus datos para las simulaciones empleadas. Agradecer, también, a la estación de esquí de Formigal-Aramon su apoyo a esta investigación. Este trabajo se ha financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto PID2021-124451 OB-100 y por la DGA bajo el proyecto T20\_23R.

## Referencias

[1]. RAFAEL ALONSO, JOSÉ MARÍA GARCÍA DEL POZO SAMUEL T. BUISÁN and JOSÉ ADOLFO ÁLVAREZ. Remote sensing, MDPI. *Analysis of the*

*Snow Water equivalent at the AEMET-Formigal Field laboratory (Spanish Pyrenees) During the 2019/2020 Winter Season Using a Sypped-Frequency Continuous Wave Radar (SFCW)*. Remote Sens. 2021, 13, 616.

[2]. MARTTI E. TIURI, ARI H. SIHVOLA, EBBE G. NYFORS and MARTTI T. HALLIKAIKEN. IEEE. *The Complex Dielectric Constant of Snow at Microwave Frequencies*. Journal of Oceanic Engineering, vol. OE-9, NO. 5, December 1984.

[3]. ARI SIHVOLA and MARTTI TIURI. IEEE, transactions on geoscience and remote sensing. *Snow Fork for Field determination of the Density and Wetness Profiles of a Snow Pack*.

[4]. Página web oficial del software de simulación, última vez visitada 05/06/2024: <https://www.snowpack.dev/>

## Figuras / Leyendas

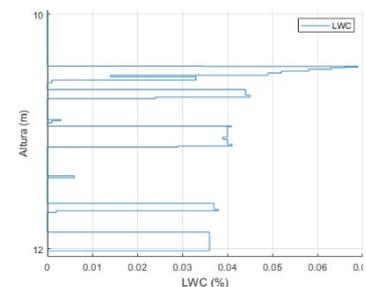
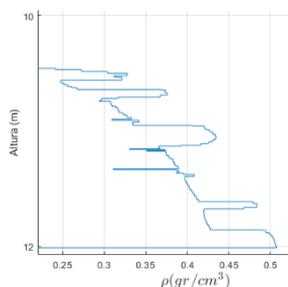
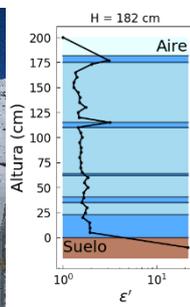


Figura 1: Instalación del radar SFCW en la estación experimental AEMET-Formigal situada en la zona de Sarríos de la estación de esquí Aramon-Formigal.

Figura 2: a) Distribución visual y simplificada de las capas internas junto con el perfil de la parte real de la constante dieléctrica, b) Perfil de densidades y c) Perfil de LWC.

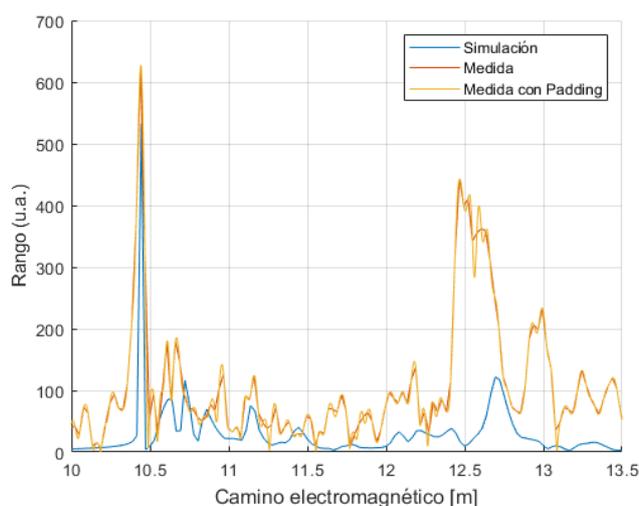


Figura 5: Reflectancia experimental medida con el radar SFCW comparado con la reflectancia de la estructura simulada por el SnowPack.