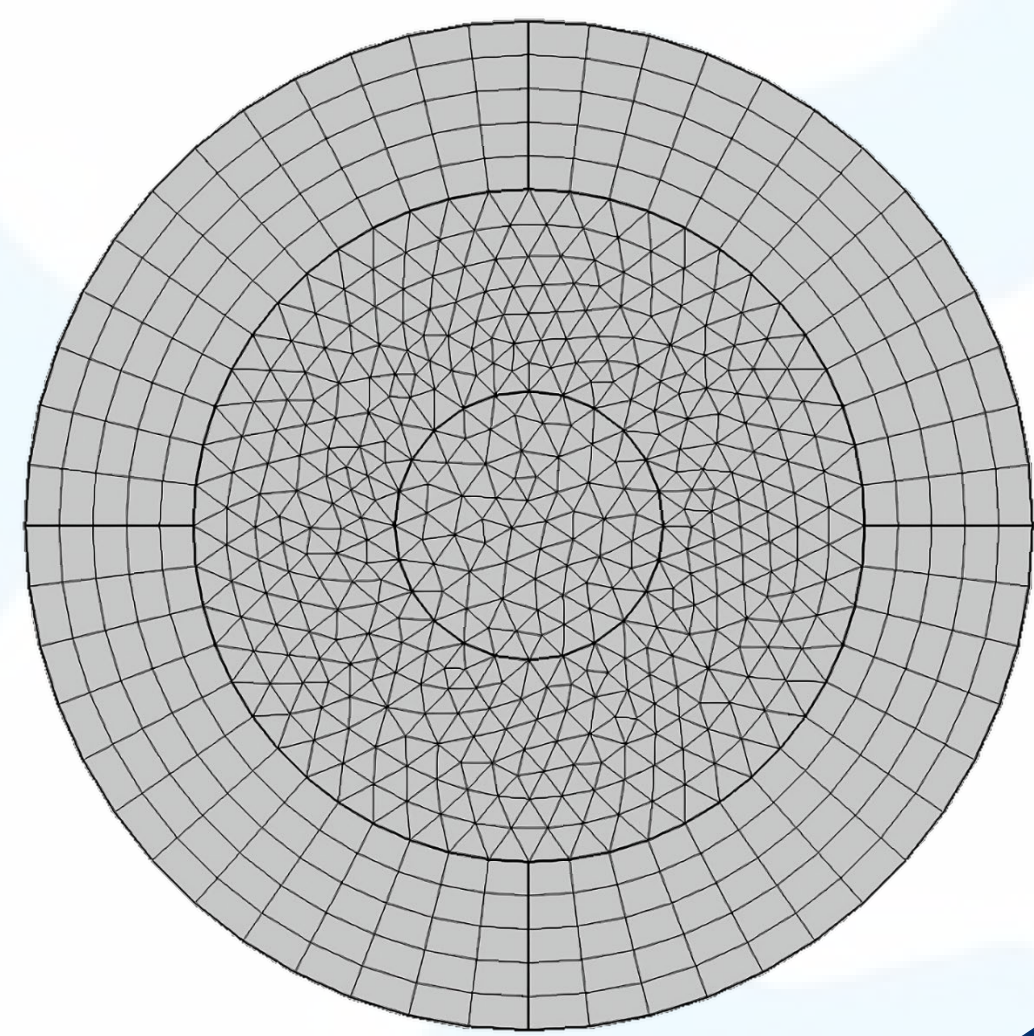
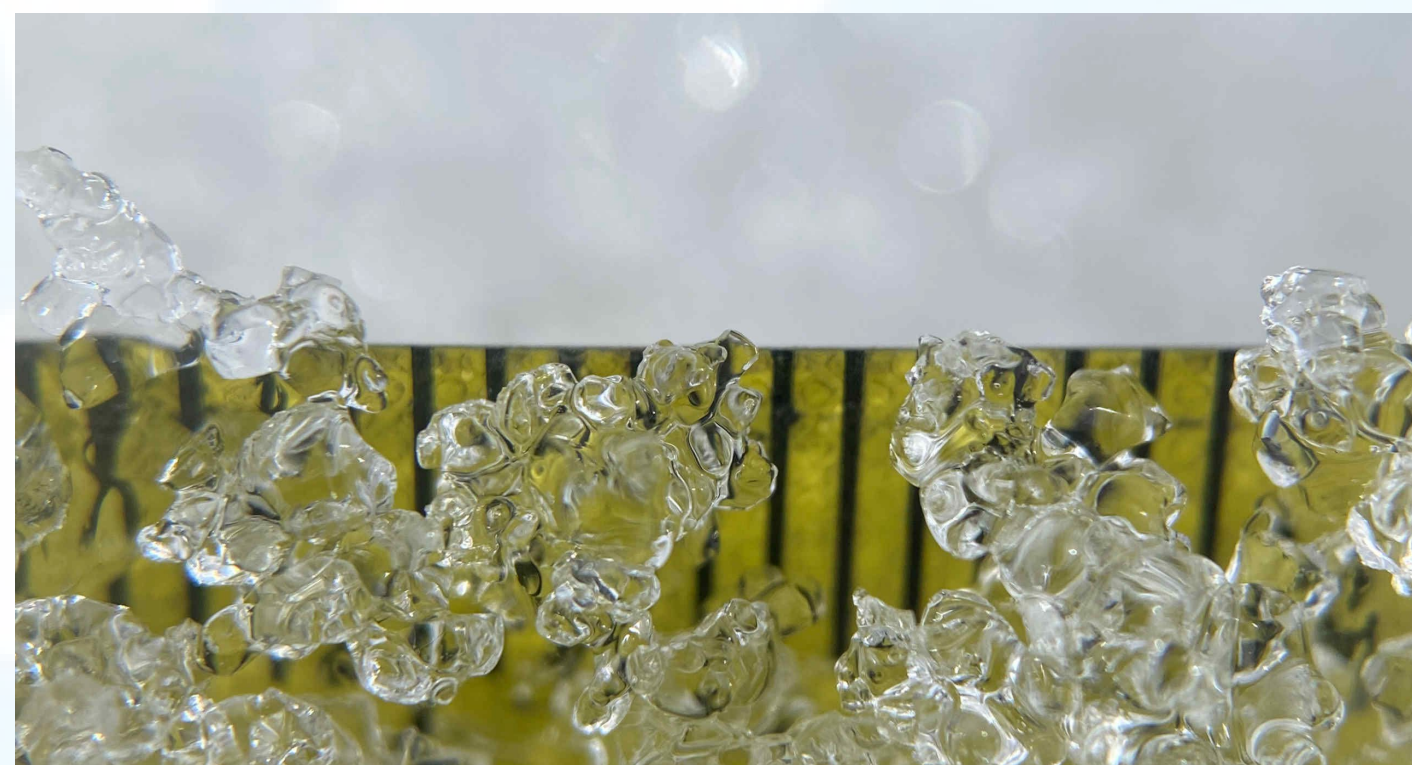


ESTUDIO DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA DE LA NIEVE HÚMEDA MEDIANTE SIMULACIÓN FEM DE MEZCLAS ALEATORIAS DE MATERIALES DIELECTRICOS

Víctor Herráiz-López, Adrián Subías Martín, Iñigo Salinas, Rafael Alonso
Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF), Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

INTRODUCCIÓN

- Conocer la permitividad dieléctrica de la nieve es necesario para numerosas aplicaciones de sensado remoto de la criosfera.
- Durante las décadas de 1980 y 1990 se propusieron diversos modelos para la permitividad de la nieve húmeda basados en medidas experimentales, siendo uno de los más habituales el presentado en [1]. Los modelos de distintos autores difieren significativamente entre sí.
- Recientemente se ha sugerido el empleo de métodos numéricos para abordar el problema [2]. Presentamos los primeros pasos para llevar a cabo simulaciones FEM de la permitividad de la nieve húmeda.



MICROESTRUCTURAS ALEATORIAS

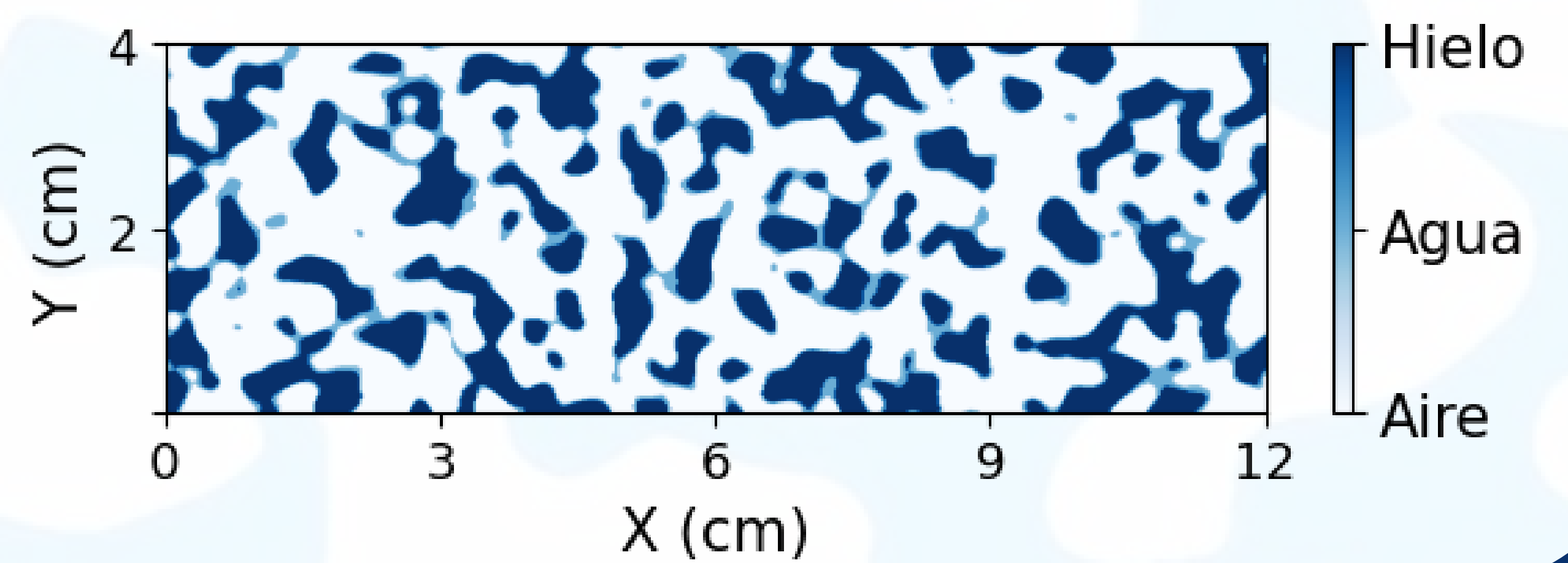
- Se generan aleatoriamente microestructuras que imitan la de la nieve húmeda.
- Se define en el espacio una suma armónica estocástica [2]

$$S(\vec{r}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n^N \cos(k_n \hat{s}_n \cdot \vec{r} + \phi_n),$$

- El material en cada punto viene dado por

$$\text{Material}(\vec{r}) = \begin{cases} \text{Aire,} & \text{si } S(\vec{r}) < \alpha_1 \\ \text{Agua,} & \text{si } \alpha_1 < S(\vec{r}) < \alpha_2 \\ \text{Hielo,} & \text{si } \alpha_2 < S(\vec{r}) \end{cases}$$

- Donde $f_h = 1 - \text{erf}(\alpha_1)$ y $f_h + f_a = 1 - \text{erf}(\alpha_2)$, siendo f_h , f_a las fracciones volumétricas que ocupan el hielo y el agua en la mezcla.



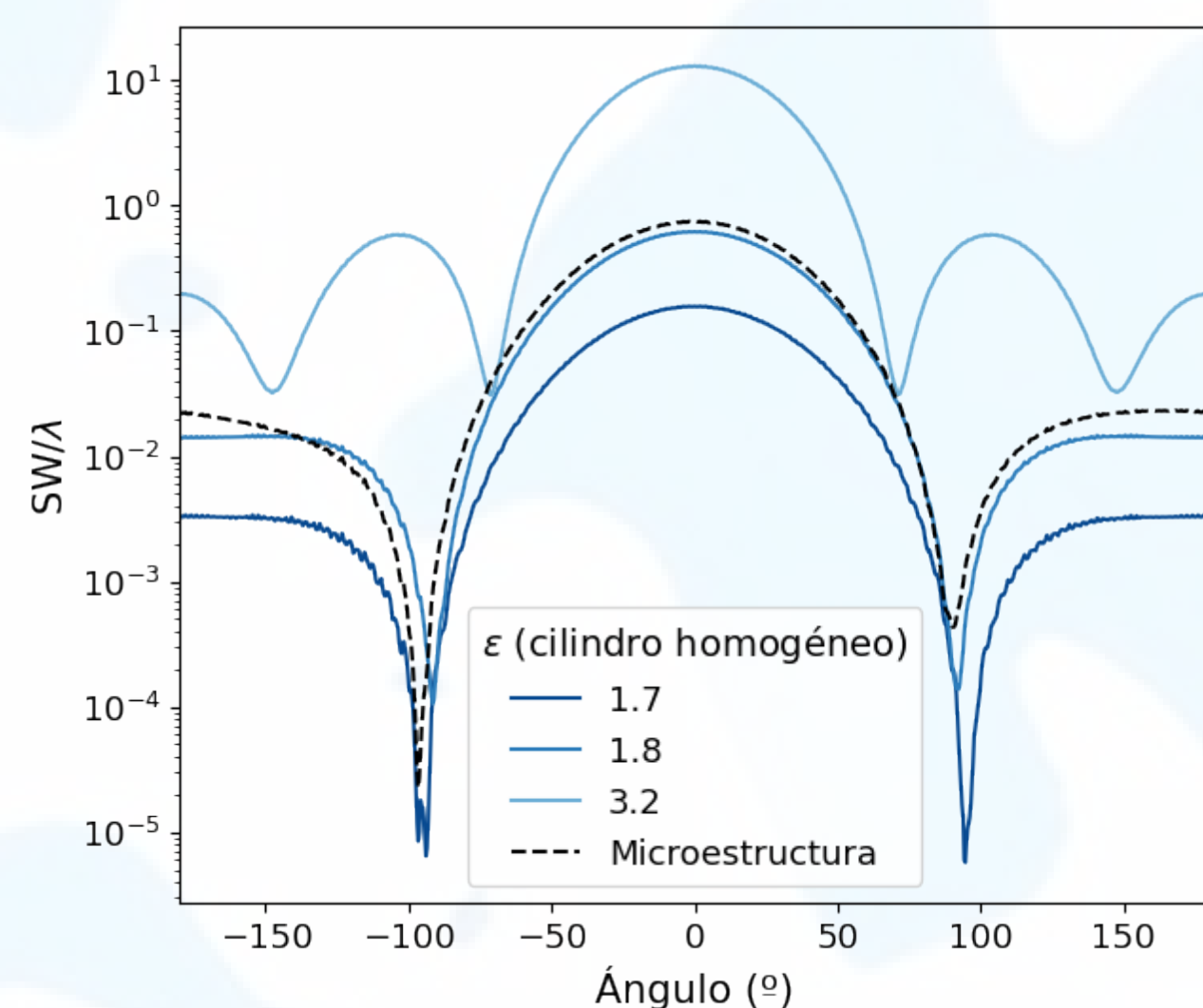
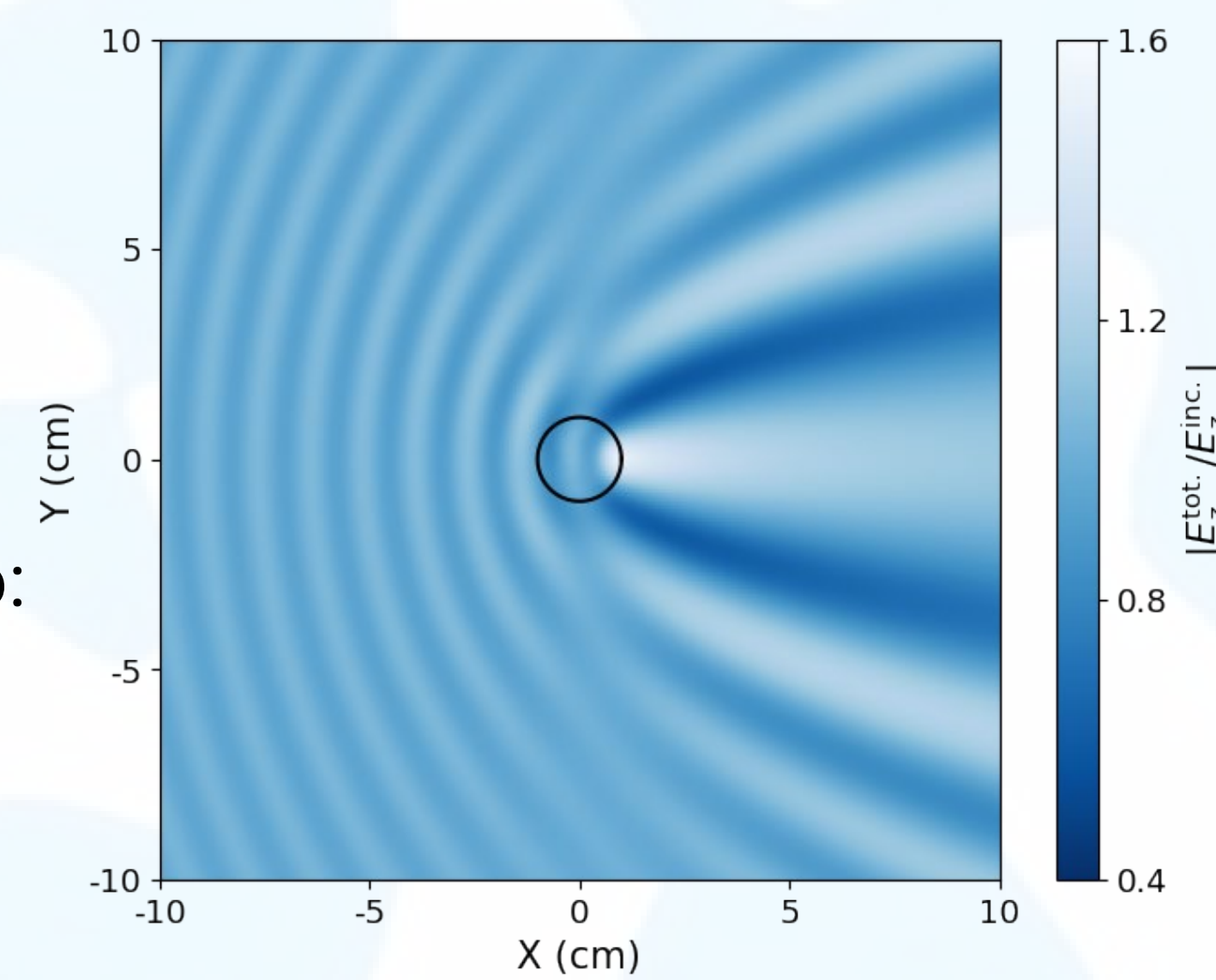
SIMULACIÓN FEM DE LA PERMITIVIDAD EFECTIVA

- Simulación del comportamiento difusivo empleando COMSOL Multiphysics. Simulación 2D.

- Nieve seca ($f_a = 0$), cilindro infinito de diámetro $D = 2$ cm.

- Onda plana incidente:
 $\vec{E}_{\text{inc.}} = E_0 e^{i(kx - \omega t)} \hat{e}$

- Se analiza el campo difundido:
 $\vec{E}_{\text{tot.}} = \vec{E}_{\text{inc.}} + \vec{E}_{\text{dif.}}$

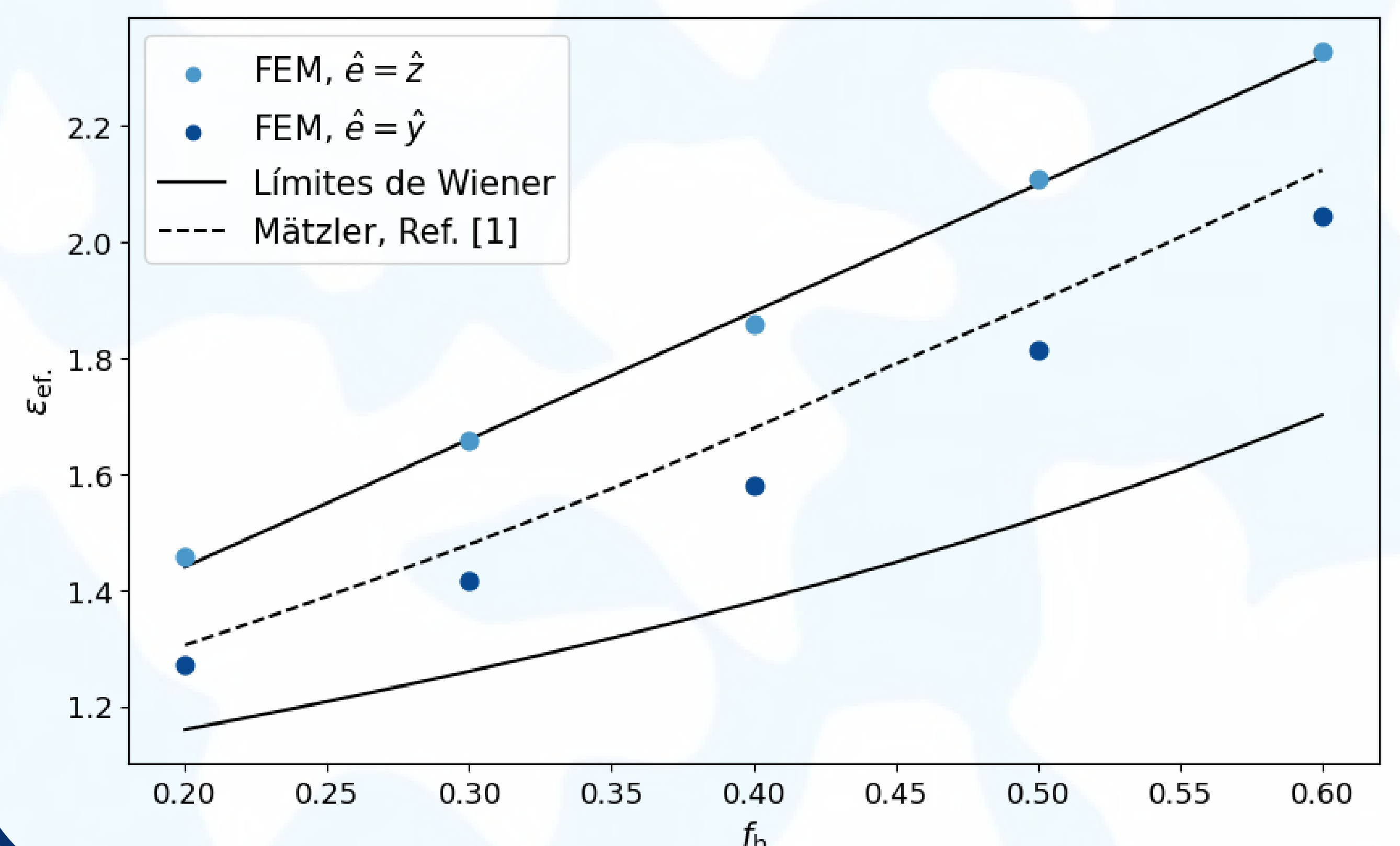


$$SW = \lim_{r \rightarrow \infty} 2\pi r \frac{|\vec{E}_{\text{dif.}}(r, \theta)|^2}{|\vec{E}_{\text{inc.}}|^2}$$

- Se compara el patrón angular del campo difundido con el que producirían cilindros homogéneos de distinta permitividad.
- El valor de la permitividad efectiva de la estructura es aquel que produce el patrón de difusión más cercano.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- Se analizan dos polarizaciones diferentes. La comparación con modelos experimentales de la permitividad de la nieve seca es mejor para $\hat{e} = \hat{y}$.
- Para $\hat{e} = \hat{z}$, la obtención del límite superior de Wiener [3] se debe a la geometría considerada, bidimensional con el campo eléctrico polarizado en la dirección de simetría.
- Se estudiará si la consideración de un modelo tridimensional incrementa el acuerdo del modelo con las medidas experimentales.
- La simulación FEM del comportamiento difusivo resulta un método sencillo y computacionalmente eficiente para estudiar el comportamiento dieléctrico de la nieve.



REFERENCIAS

- MÄTZLER, C. *Thermal Microwave Radiation: Applications for Remote Sensing*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- HUANG, Zhenming y otros. *L-Band Full-Wave Simulations of the Effective Permittivity of Bi/Tri-Continuous Media With Applications to Firn Aquifer in Polar Regions and Terrestrial Wet Snow*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2024, vol. 62.
- MILTON, Graeme W. *The Theory of Composites*. Salt Lake City: Cambridge University Press, 2002. ISBN 9780521781251.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto PID2021-124451OB-I00, cofinanciado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, FEDER UE, y por la Unión Europea Next Generation EU/PRTR. También ha sido financiado por el Gobierno de Aragón (Grupo de Referencia T20-23R).