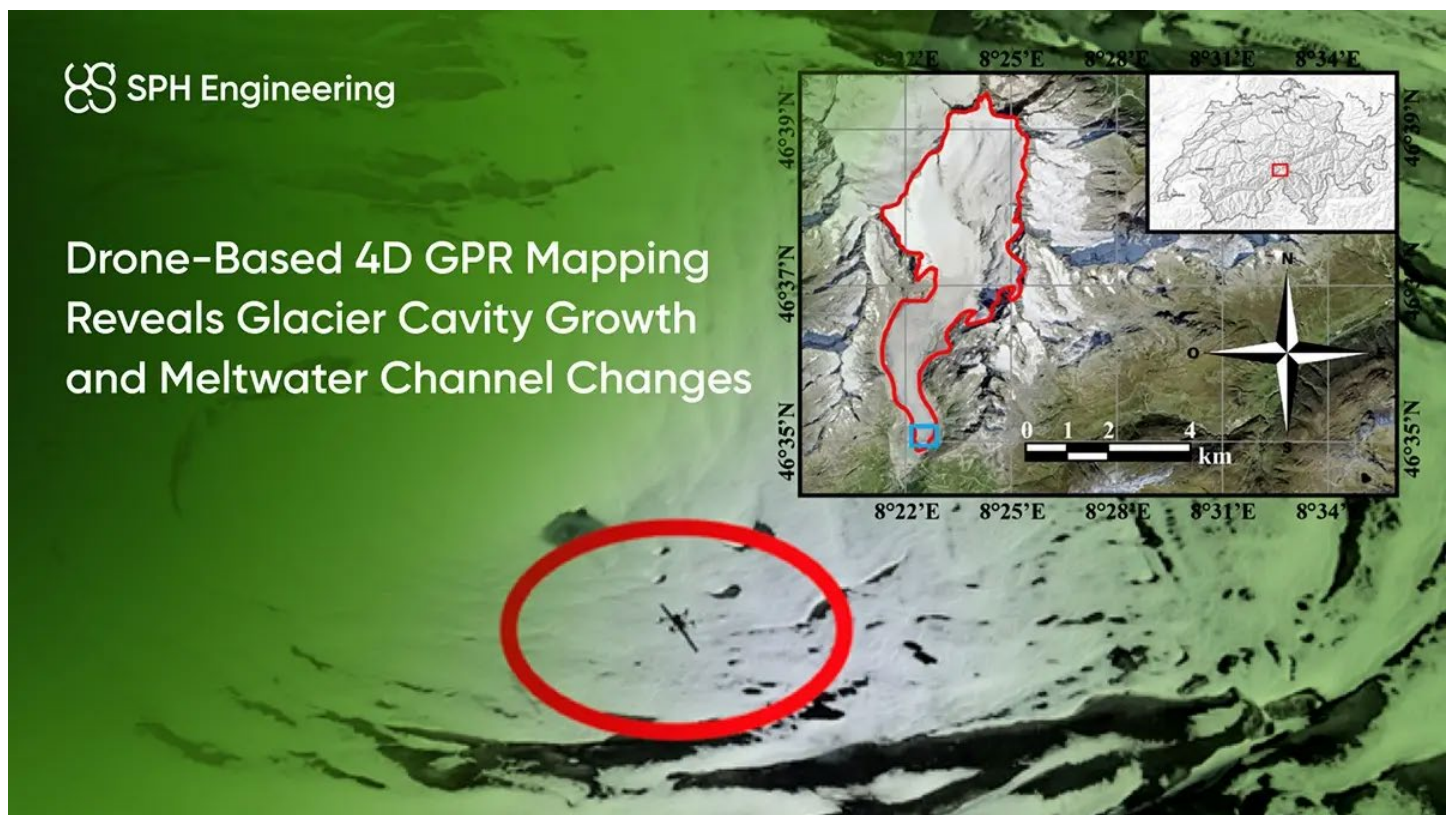


Mapeo 4D con GPR Basado en Drones del Glaciar del Ródano: Revelando el Crecimiento de Cavidades y Cambios en los Canales de Deshielo

UgCS: Planificación y Control de Vuelo

13 de octubre de 2025



Este estudio de caso muestra cómo se utilizó un sistema de Radar de Penetración Terrestre (GPR) basado en drones para mapear con precisión las estructuras subterráneas del Glaciar del Ródano, en Suiza. Al integrar un radar montado en un dron con la planificación de vuelos automatizada y el seguimiento del terreno en tiempo real, los investigadores capturaron datos 4D de alta densidad, revelando el crecimiento de cavidades, el adelgazamiento del hielo y los canales dinámicos de agua de deshielo que antes estaban fuera del alcance de los métodos tradicionales.

Este estudio de caso se basa en el artículo científico de [Ruols et al. \(2025\)](#), del grupo [CRAG](#) de la Universidad de Lausana.

Resumen del Proyecto

- **Ubicación y Fecha:** Glaciar del Ródano, Suiza, julio-octubre de 2022
- **Aplicación:** Radar de Penetración Terrestre (GPR) basado en drones para mapeo criosférico
- **Industria:** Glaciología e Investigación Climática
- **Hardware:** VANT equipado con antena GPR de 80 MHz hecha a medida + GPS RTK

- **Software:** UgCS con Seguimiento Real del Terreno (TTF)
- **Densidad del Estudio:** Espaciado de líneas de 1 m en cuatro vuelos de inspección
- **Resultado:** Modelo de cavidad 4D que muestra un adelgazamiento del techo del 68% y un crecimiento de la cavidad del 16%

Este proyecto demostró el valor inigualable de combinar sensores GPR con la automatización de drones para lograr un mapeo criosférico seguro y de alta resolución.

Antecedentes: ¿Por qué estudiar el interior de los glaciares?

Los glaciares son sistemas naturales dinámicos moldeados por complejas interacciones entre el hielo, el agua, el aire y el lecho rocoso subyacente. Estas interacciones influyen enormemente en el movimiento, la estabilidad y los patrones de deshielo de los glaciares. Bajo ellos, se desarrollan características ocultas como canales de drenaje y cavidades que afectan su comportamiento, pero que son extremadamente difíciles de monitorear de forma directa.

Comprender lo que ocurre bajo la superficie es fundamental para predecir el comportamiento de los glaciares y el impacto climático. Las prospecciones terrestres tradicionales y las perforaciones proporcionan un acceso limitado y a menudo peligroso a estas características ocultas, ya que las grietas, el hielo inestable y la baja resolución de los datos dificultan la detección de cambios subglaciales sutiles.

El Glaciar del Ródano, en Suiza, ha experimentado recientemente varios eventos de colapso significativos cerca de su extremo (término). Estos colapsos fueron causados principalmente por un deshielo rápido, el debilitamiento estructural debido al adelgazamiento del hielo y los cambios en las rutas de flujo de agua subglacial.

Por ello, un equipo del grupo CRAG de la Universidad de Lausana recurrió al Radar de Penetración Terrestre (GPR) montado en vehículos aéreos no tripulados (VANT) para revelar la evolución oculta de la estructura interna del glaciar.

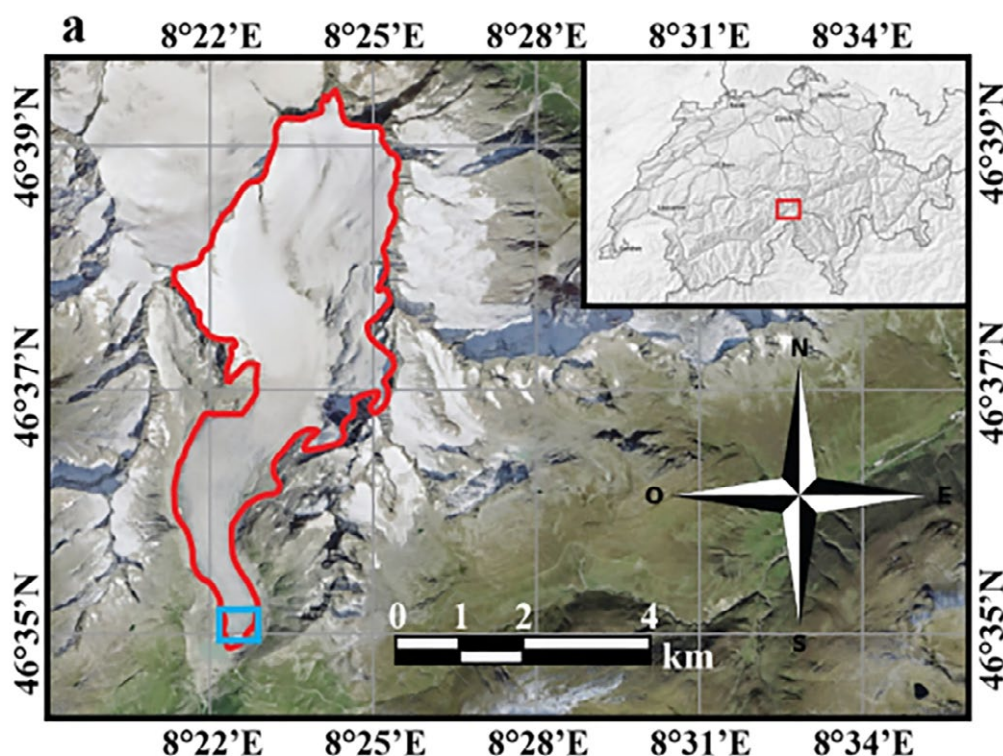


Ilustración: Ubicación del glaciar del Ródano (contorno rojo) en el centro de Suiza. El cuadrado azul indica la región de nuestros estudios con GPR - Figura de Ruols et al., 2025

Retos del Mapeo Subglacial

Monitorear el interior oculto de un glaciar con **sensores de radar de precisión** implica superar varios desafíos ambientales y técnicos:

- **Dificultades de acceso.** Las grietas y las superficies inestables hacen que sea peligroso y difícil para los equipos llegar con seguridad y estudiar áreas clave del glaciar.
- **Requisitos de alta precisión de datos.** Entender las características del glaciar bajo la superficie exige datos de alta resolución. Los métodos tradicionales a menudo no proporcionan suficiente detalle, dejando vacíos críticos en el conocimiento.
- **Cambios rápidos a lo largo del tiempo.** Las estructuras internas del glaciar, como los canales de agua y las cavidades, pueden cambiar drásticamente en períodos cortos, a veces en cuestión de días o semanas. Esto requiere un monitoreo frecuente y constante.
- **Complejidad en la interpretación de datos.** Diferenciar entre características subterráneas como cavidades, fracturas y canales de agua es complicado. Las malas interpretaciones pueden llevar a evaluaciones erróneas sobre la estabilidad y los procesos del glaciar.



Ilustración: A la izquierda: Etapa temprana de la zona de colapso con una clara depresión en la superficie del glaciar (28 de julio de 2022). A la derecha: Etapa avanzada del colapso, visible desde la distancia y cubierta de nieve (4 de octubre de 2022) - Fotos de Ruols et al., 2025

Solución de Inspección GPR Basada en Drones

Para superar estas barreras, los investigadores implementaron un **sistema de Radar de Penetración Terrestre (GPR) basado en drones**, diseñado para la toma de imágenes de hielo profundo.

El dron transportaba una **antena de 80 MHz** hecha a medida con posicionamiento preciso GPS RTK para detectar estructuras a decenas de metros bajo la superficie.

Los vuelos se automatizaron a través del **software de planificación de vuelo UgCS** con el **Seguimiento Real del Terreno (TTF)** de SPH Engineering, manteniendo el dron a **5 m sobre el nivel del suelo (AGL)** incluso sobre terrenos muy irregulares. Esto garantizó un acoplamiento constante del radar y una alta calidad de la señal, minimizando al mismo tiempo los riesgos para los operadores en el hielo inestable.

Entre **julio y octubre de 2022**, el equipo llevó a cabo **cuatro estudios de alta densidad** con un **espaciado de líneas de 1 m**, creando un **conjunto de datos 4D** (3D a lo largo del tiempo) de la estructura del colapso.

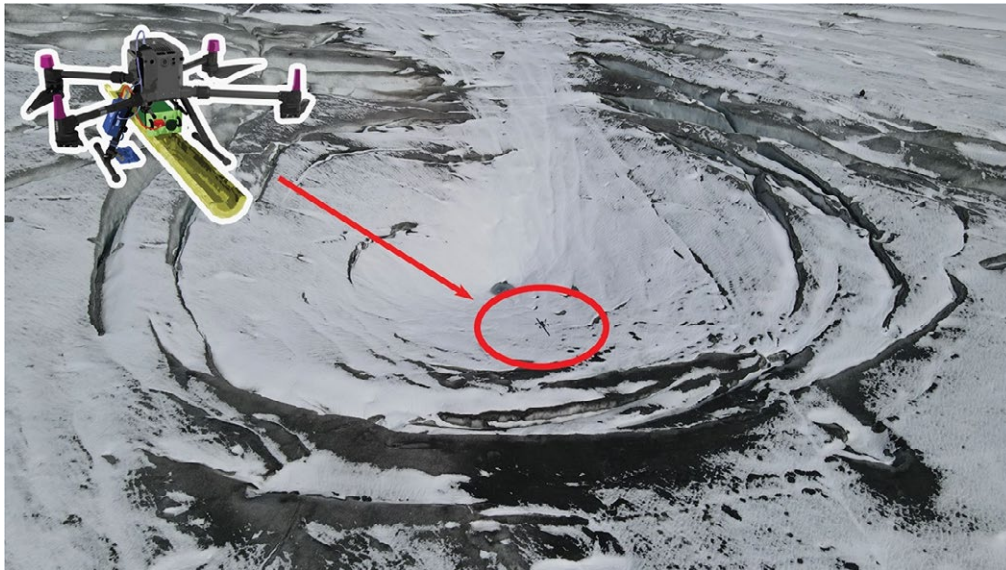


Ilustración: El sistema GPR basado en drones adquiriendo datos sobre la zona de colapso del Ródano el 4 de octubre de 2022 - Foto de Ruols et al., 2025

Resultados e Información de los Datos

Medición Precisa de la Formación de Cavidades

Los datos del GPR basado en drones mostraron claramente el crecimiento de una cavidad bajo la superficie del glaciar, capturando el adelgazamiento del techo de hielo de 9.6 metros en julio a solo 3.0 metros en octubre. Al mismo tiempo, la altura de la cavidad se expandió de 15.9 a 18.4 metros, lo que destaca un deshielo significativo y un fuerte debilitamiento estructural.

Mes	Grosor mínimo del techo de hielo (m)	Altura máxima de la cavidad (m)
Julio	9.6	15.9
Agosto	6.1	16.8
Septiembre	5.3	16.9
Octubre	3.0	18.4

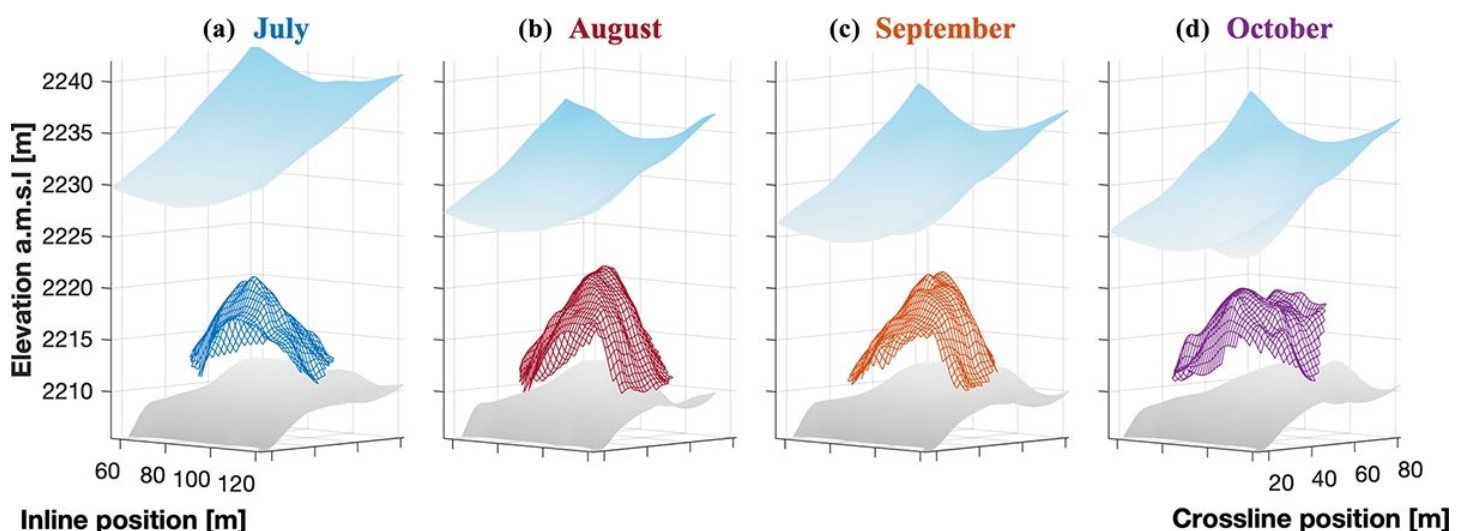


Ilustración: Visualización 4D de la cavidad subglacial en evolución entre julio y octubre de 2022, mostrando un claro crecimiento en la altura de la cavidad y el adelgazamiento del techo de hielo - Figura de Ruols et al., 2025

Seguimiento Claro de los Canales Subglaciales

Utilizando análisis de amplitud, los investigadores mapearon con precisión las rutas y las transformaciones de los canales de agua bajo el glaciar. A lo largo del verano, se documentaron claramente cambios significativos, incluido el ensanchamiento y la alineación de los canales, lo que se correlaciona con un mayor flujo de agua de deshielo y la exposición del frente del glaciar al aire cálido.

Visualización Detallada del Interior del Glaciar

Los perfiles de GPR de alta densidad proporcionaron vistas detalladas del interior del glaciar, revelando nuevas fracturas, capas de hielo desprendiéndose y el hundimiento gradual del techo de la cavidad. Estas imágenes ofrecieron una claridad sin precedentes sobre cómo ocurren los colapsos de los glaciares.

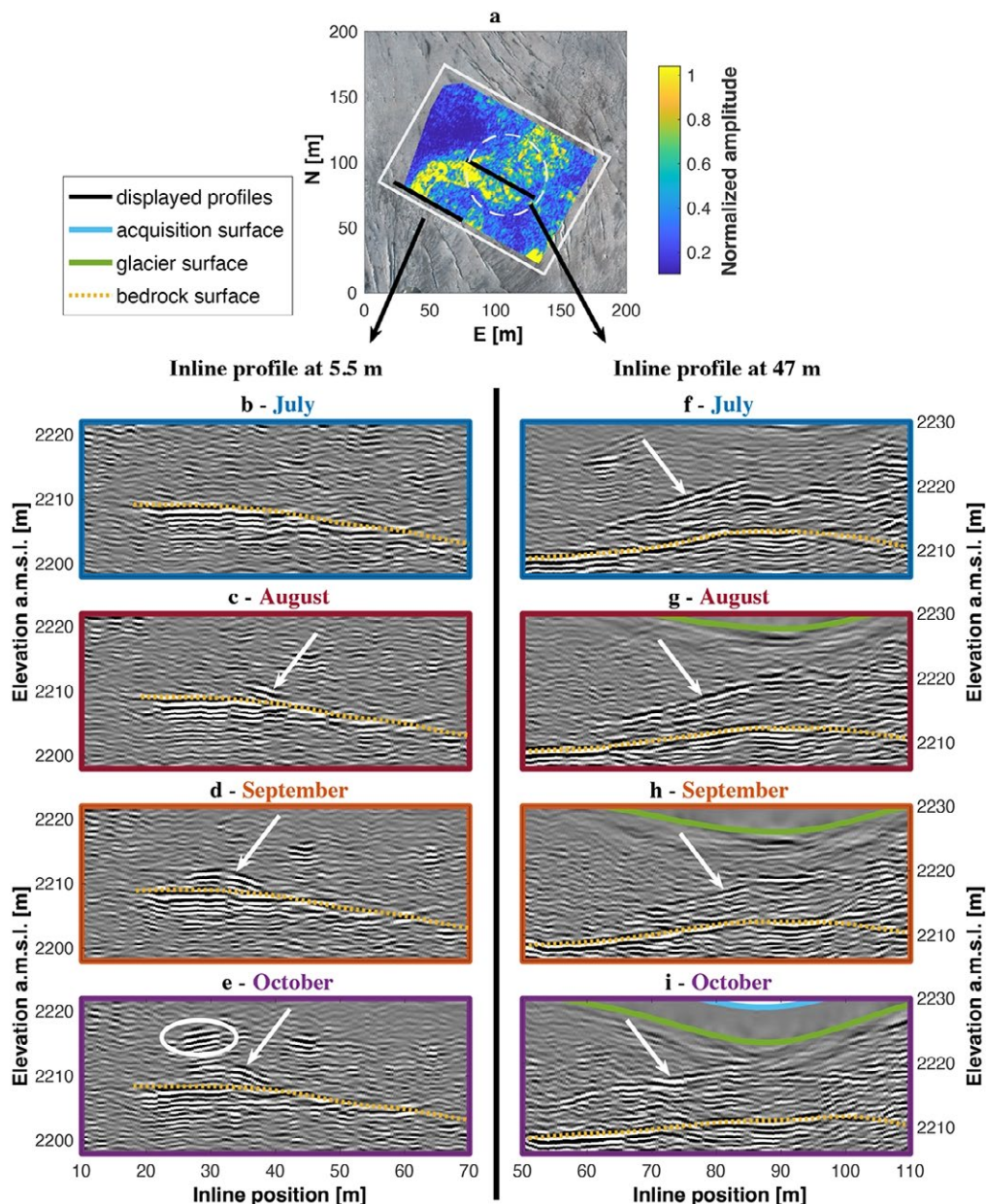


Ilustración: Perfiles GPR en línea que muestran cambios internos detallados de julio a octubre de 2022. Los perfiles (a–e) resaltan la evolución del canal subglacial, mientras que los perfiles (f–i) ilustran el hundimiento gradual y la fracturación del techo de la cavidad bajo la superficie del glaciar - Figura de Ruols et al., 2025

Conclusión

Este proyecto demuestra el gran potencial del uso de la avanzada **tecnología 4D GPR basada en drones** para el mapeo de glaciares de alta resolución. Los investigadores lograron capturar con éxito la evolución detallada del colapso del glaciar del Ródano, superando ampliamente las limitaciones de los métodos topográficos tradicionales.

El estudio proporcionó **mediciones precisas del rápido adelgazamiento del hielo, la expansión de las cavidades y la evolución de los canales de agua** bajo el glaciar. Estos hallazgos reafirman el valioso papel de los sistemas GPR basados en drones en futuros estudios glaciológicos, mejorando nuestra comprensión sobre la estabilidad de los glaciares y su respuesta ante el cambio climático.

Referencia

Ruols, B., Klahold, J., Farinotti, D., & Irving, J. (2025). 4D GPR imaging of a near-terminus glacier collapse feature. *The Cryosphere*, 19, 4045–4059. <https://doi.org/10.5194/tc-19-4045-2025>

Vídeos complementarios y animaciones de datos del estudio del Glaciar del Ródano:
<https://zenodo.org/records/15652968>

Más sobre el trabajo de Bastien Ruols: <https://www.linkedin.com/in/bastien-ruols/>

Saber Más