

Drones y satélites se unen para caracterizar en tres dimensiones movimientos del terreno en zonas mineras

- **Un estudio del IGME-CSIC demuestra que la fotogrametría con drones y la correlación digital de imágenes complementan a la interferometría radar satelital cuando los movimientos son demasiado intensos para que esta técnica pueda medirlos con fiabilidad**
- **La investigación, realizada en la antigua mina de carbón El Feixolín (León), valida una metodología capaz de reconstruir desplazamientos tridimensionales mediante la combinación de datos obtenidos por satélite y por dron**

Madrid, 16 de septiembre de 2026

Un equipo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) ha desarrollado y validado una estrategia para monitorizar movimientos del terreno en tres dimensiones mediante la combinación de datos obtenidos por satélite y por dron. El estudio demuestra que la integración de técnicas de interferometría radar satelital (InSAR) con metodologías avanzadas de fotogrametría y correlación digital de imágenes permite mejorar la caracterización de estos procesos en zonas con gradientes de deformación elevados, donde la fiabilidad de las mediciones InSAR puede verse limitada.

La investigación se ha aplicado a la escombrera restaurada de la antigua mina de carbón El Feixolín, en el Valle de Laciana (León), donde el equipo analizó un deslizamiento lento de grandes dimensiones entre octubre de 2018 y septiembre de 2020. Los resultados muestran desplazamientos tridimensionales acumulados de hasta 3,16 metros en los puntos de validación, un valor muy próximo a los 3,23 metros medidos directamente sobre el terreno mediante GNSS diferencial y muy superior a la magnitud máxima de 1,22 metros registrada mediante InSAR en la línea de visión del satélite en esos mismos puntos. Esta comparación respalda la capacidad del enfoque propuesto para caracterizar grandes desplazamientos.

“Nuestra metodología no sustituye a la interferometría radar satelital, sino que aporta información complementaria precisamente donde los grandes gradientes de deformación pueden limitar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante satélite”, explica Juan López-Vinielles, investigador del IGME-CSIC.

“La combinación de datos de satélite y dron permite analizar los movimientos con mayor detalle, reconstruirlos en tres dimensiones y evaluar la fiabilidad de las mediciones InSAR”, añade.

Limitaciones de la interferometría radar satelital

Las técnicas InSAR se han consolidado durante las últimas décadas como una herramienta de referencia para monitorizar movimientos del terreno gracias a su capacidad para cubrir grandes extensiones con elevada frecuencia de observación y precisión milimétrica. Sin embargo, cuando los desplazamientos varían bruscamente en distancias cortas (es decir, cuando existen gradientes

de deformación elevados), la fiabilidad de las mediciones InSAR puede verse limitada por lo que se conoce como *aliasing de fase*, un fenómeno que dificulta determinar de forma inequívoca cuánto se ha desplazado el terreno.

Además, las observaciones radar satelitales registran únicamente el movimiento proyectado en la línea de visión del satélite, por lo que no permiten reconstruir directamente el desplazamiento tridimensional completo.

Para hacer frente a estas limitaciones, el equipo procesó imágenes multitemporales adquiridas mediante dron utilizando una técnica de fotogrametría digital conocida como estructura a partir del movimiento (*Structure from Motion*, SfM) y técnicas de correlación digital de imágenes (*Digital Image Correlation*, DIC). Esta metodología permitió obtener las dos componentes horizontales del movimiento y combinarlas con los modelos digitales de superficie generados mediante SfM para calcular la componente vertical y reconstruir así el movimiento tridimensional del talud estudiado. La investigación se basó en el análisis de 237 imágenes radar adquiridas por la constelación Sentinel-1, cuatro campañas de vuelo con dron y mediciones directas realizadas mediante GNSS diferencial en 22 puntos distribuidos por el área de estudio.

El estudio también evaluó cuatro formas de combinar los desplazamientos obtenidos por satélite y por dron. Para el talud analizado, la integración de los datos InSAR ascendentes con los desplazamientos horizontales obtenidos mediante SfM-DIC proporcionó el mejor equilibrio entre precisión y capacidad para reconstruir grandes desplazamientos.

Nuevas posibilidades para la monitorización de movimientos del terreno

El principal valor de esta investigación reside en su contribución al desarrollo de estrategias de monitorización capaces de caracterizar movimientos del terreno en zonas con gradientes de deformación elevados. La disponibilidad de información sobre la magnitud, la dirección y la evolución de estos movimientos puede facilitar su interpretación y servir de apoyo a la toma de decisiones en entornos afectados por inestabilidades.

La metodología propuesta puede aplicarse no solo al análisis de inestabilidades caracterizadas por fuertes gradientes de deformación en zonas mineras, sino también al seguimiento de otros procesos naturales o antrópicos de características similares. En estos contextos, la combinación de medidas obtenidas por satélite y por dron permite disponer de información complementaria sobre los movimientos del terreno.

Esta complementariedad constituye uno de los principales hallazgos del estudio. Mientras que la interferometría radar satelital ofrece una elevada frecuencia de observación, una amplia cobertura espacial y una gran sensibilidad para detectar deformaciones, los datos obtenidos mediante SfM-DIC permiten reconstruir desplazamientos tridimensionales en sectores donde las mediciones InSAR pueden perder fiabilidad debido a la presencia de gradientes de deformación elevados. El uso combinado de ambas tecnologías puede contribuir, por tanto, a obtener una caracterización más completa de los procesos objeto de estudio.

Además, futuras mejoras como el aumento de la frecuencia de los vuelos, el empleo de drones con posicionamiento RTK y la optimización de los parámetros de correlación podrían mejorar la resolución temporal, la precisión y la sensibilidad de la metodología, ampliando todavía más sus posibilidades de aplicación al seguimiento de este tipo de procesos.

Más información.

Para ampliar la información pueden consultar el artículo en <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2026.109045> o contactar con Juan López en la dirección de correo electrónico j.lopez@igme.es

Contacto

Unidad de Cultura Científica y de la Innovación

Alicia González Rodríguez

alicia.gonzalez@igme.es

CN IGME-CSIC.

Página web: www.igme.es

El CN Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) tiene como misión principal proporcionar a la Administración General del Estado y de las Comunidades Autónomas que lo soliciten, y a la sociedad en general, el conocimiento y la información precisa en relación con las Ciencias y Tecnologías de la Tierra para cualquier actuación sobre el territorio. El IGME es, por tanto, el centro nacional de referencia para la creación de infraestructura del conocimiento, información e I+D+i en Ciencias de la Tierra. Para ello abarca diversos campos de actividad tales como la geología, el medio ambiente, la hidrología, los recursos minerales, los riesgos geológicos y la planificación del territorio. Las instalaciones del IGME comprenden el edificio que alberga su sede central, el Museo Geominero, y la biblioteca; doce oficinas de proyectos distribuidas por el territorio español; laboratorios, almacenes y una litoteca, y todas disponen de los equipos y medios técnicos más avanzados.