

# PROYECTO DE I+D+I 'MINERVA #SMARTGEOCONTROL'

En Atalaya Mining - Proyecto Riotinto estamos realizando una innovadora transición digital hacia un control geodésico y geotécnico integral del entorno minero de Riotinto. Nuestro proyecto de I+D+i 'Minerva # Smartgeocontrol' tiene por objetivo crear una plataforma de vigilancia e interpretación multidisciplinar que, en tiempo real, centralice las observaciones obtenidas con técnicas de monitoreo clásicas y de vanguardia.

**Susana Rodríguez Romero.**

Responsable de Geotecnia y Topografía de Atalaya Mining

**Ignacio Marzán,**

CSIC

**David Martí,**

Lithica SCCL



## INTRODUCCIÓN

El proyecto toma el nombre de la deidad romana que simboliza la sabiduría y conocimiento. En la mitología, Minerva es quien diseña la nave de los argonautas y les guía colocando en su proa la madera que habla; cortada cerca del oráculo de Dodona, dirigirá su rumbo y les informará de los peligros que acechan y de cómo evitarlos.

El proyecto se centra inicialmente en los depósitos de estériles de la mina de Riotinto. Posteriormente extendemos el estudio a otras estructuras que requieran de control geotécnico. La plataforma integrará en tiempo real técnicas de monitoreo geodésico y geotécnico clásicas con técnicas innovadoras satelitales, de sísmicas pasiva y de inteligencia artificial (AI).

El proyecto se divide en tres fases:

### 1.- Investigación

Estudio del potencial de tres técnicas de monitoreo innovadoras para el control de estabilidad en entornos mineros:

- INSAR: Interferometría radar utilizando el satélite Sentinel-1 del programa Copernicus (CE-ESA).
- Sísmica pasiva: sismicidad inducida e interferometría de ruido ambiente (ANI).
- Vigilancia AI: análisis de imágenes de video en tiempo real.

### 2.- Desarrollo

Calibración y validación de los resultados mediante otras técnicas clásicas y la experiencia de terreno.

### 3.- Innovación

- Integración de los resultados multidisciplinarios en una plataforma única a nivel de usuario final.
- Resultados, gráficos, mapas e informes en un formato fácilmente interpretable.
- Sistemas multiplataforma de alerta temprana.

## PLATAFORMA DE VIGILANCIA E INTERPRETACIÓN

Leica Geosystems SL será la responsable de la integración de datos

multidisciplinarios en una plataforma innovadora denominada Hexagon GeoMonitoring Hub.

Hexagon GeoMonitoring Hub es una plataforma web de reciente creación diseñada en origen para integrar datos de distintos sensores. Esta plataforma aún no está implantada en ninguna mina en Europa. Actualmente está preparada para la integración de datos de sensores geodésicos (estaciones totales y sensores GNSS), geotécnicos (piezómetros, inclinómetros, aforadores, etc.), sensores ambientales, y sensores remotos como el GB-SAR (radar terrestre).

Las distintas fuentes de datos están conectadas a la plataforma y se muestran en tiempo real sobre un fondo georreferenciado. Permite de forma muy intuitiva interactuar con todos los sensores que están observando la mina. Se muestra en un área lateral el estado de cada sensor, su registro actual y su nivel de alerta, pudiendo generarse gráficos interactivos e informes actualizados.

Figura 1. Ejemplo de visualización de la plataforma de vigilancia Hexagon GeoMonitoring Hub. Fuente Leica Geosystems.

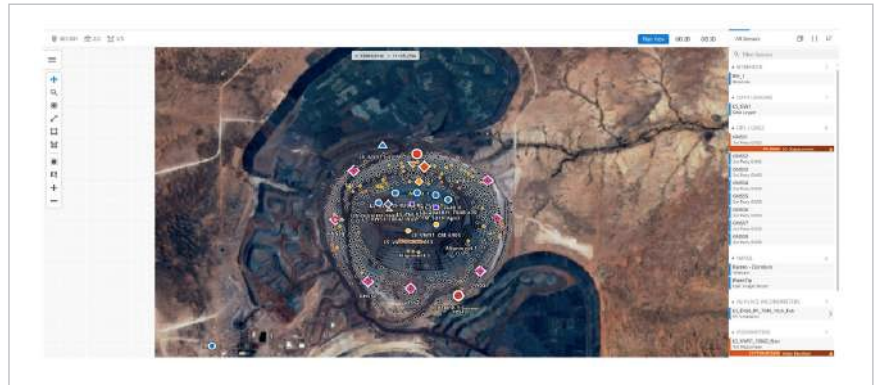


Figura 2. Ejemplo de visualización conjunta de datos de sensores interrelacionados (plataforma de vigilancia Hexagon GeoMonitoring Hub). Fuente Leica Geosystems.

Muchos sensores son complementarios y observan diferentes propiedades de un mismo fenómeno, o la misma propiedad a diferente escala, por lo tanto, la representación conjunta mejora su interpretabilidad. Por ejemplo, durante un periodo de lluvias se podría observar conjuntamente los datos meteorológicos, el cambio en

valores piezométricos y variaciones de las propiedades mecánicas del subsuelo proporcionados por las estaciones sísmicas.

En el siguiente esquema podemos observar las diferentes fuentes de datos que gestionará la plataforma y su flujo de trabajo.

Un punto a destacar del proyecto Minerva es la colaboración con el CSIC para investigar el potencial de tecnologías de monitoreo innovadoras, como son la sismica pasiva y la interferometría satelital, y su integración en la plataforma. El principal objetivo de esta colaboración es la transferencia de estas tecnologías, con gran potencial pero poco utilizadas por su complejidad de uso, a un nivel de usuario final.

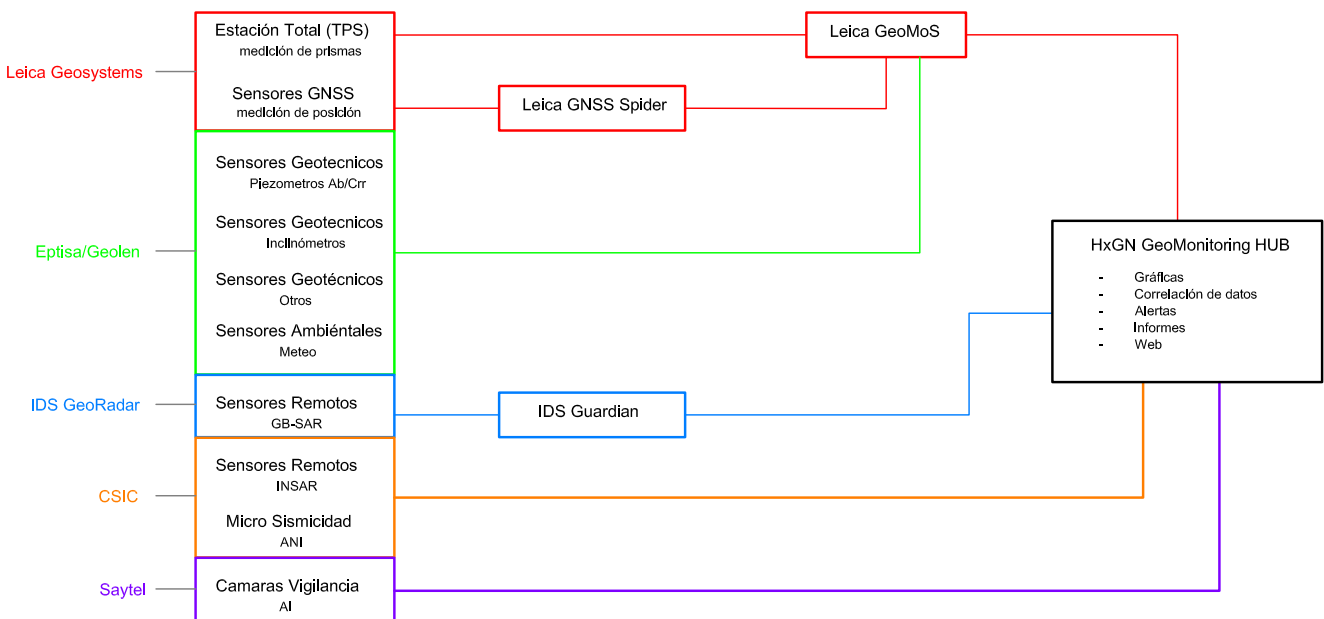


Figura 3. Flujo de datos de los diferentes observables de control hacia la plataforma de vigilancia Hexagon GeoMonitoring Hub.

## TÉCNICAS DE VIGILANCIA IMPLEMENTADAS

### 1. Control geodésico

Actualmente, hay instalados en la mina cuatro equipos GNSS que de forma autónoma y en tiempo real están midiendo y calculando su posición respecto de un punto geodésico estable.



Figura 4. Estación GNSS autónoma de la mina de Riotinto.

El procesamiento automatizado de las estaciones GNSS lo lleva a cabo el software Leica GNSS Spider que recibe en tiempo real los datos de los sensores y calcula su posición diaria con precisiones milimétricas. Las medidas se almacenan en una base de datos del software Leica GeoMoS. Por otro lado, el control geodésico se completa con mediciones de Estación Total en una serie de prismas distribuidos por la mina. De momento, estas observaciones y su integración en el sistema Leica GeoMoS se hacen de forma manual, pero en unos meses se automatizará el proceso dotando al equipo de una posición fija, alimentación continua y un sistema de comunicaciones. El sistema Leica GeoMoS se encargará de realizar las sesiones de medición, los cálculos de coordenadas de los prismas y su transferencia a la base de datos conjunta de la plataforma (Fig.3).

Las observaciones geodésicas realizadas desde tierra son muy precisas

pero puntuales. Mediante nuestra colaboración con el CSIC pretendemos mejorar la cobertura geodésica a todo el entorno minero utilizando la técnica InSAR con imágenes del satélite radar Sentinel-1 del programa Copernicus (CE-ESA).

### 2. Control geotécnico

Los datos de sensores externos, piezómetros (abiertos y cerrados) e inclinómetros, cuya lectura e integración a la plataforma a través del software Leica GeoMoS es actualmente manual, pasarán a estar automatizados como parte esencial de la transición digital que se está llevando en Atalaya Mining (Fig. 3).

*El proyecto de innovación 'Minerva #Smartgeocontrol' de Atalaya Mining es un paso hacia la transición digital de la mina de Riotinto y una garantía adicional de seguridad y sostenibilidad en nuestra actividad minera*

Además de estos sensores 'clásicos', estamos desplegando un sistema radar terrestre (GB-SAR) para el control de deformaciones del terreno. El sistema ARC-SAR de IDS está compuesto de

un sensor radar posicionado geodésicamente, un gestor de datos (IDS Controller) y un software de procesado (IDS Guardian). Mediante este sistema pueden observarse movimientos del terreno a escala milimétrica que se proyectan en una matriz de píxeles georreferenciados. El software IDS Guardian será además el encargado de volcar en la plataforma los datos GB-SAR en el formato apropiado para su interpretación.

## TÉCNICAS INNOVADORAS

Además de las técnicas mencionadas, investigaremos cómo integrar en el sistema de vigilancia técnicas innovadoras ya desarrolladas o en fase de desarrollo que no son habitualmente utilizadas en el control geodésico y geotécnico por su complejidad de uso. Estas investigaciones las llevaremos a cabo en colaboración con Saytel y el CSIC.

### Vigilancia AI

La colaboración con Saytel tiene como objetivo la evaluación y validación de un sistema que llamamos Vigilancia AI y que consiste en un monitoreo en tiempo real mediante analítica de vídeo del estado de los depósitos de estériles. De esta forma se controlan:

- Posibles pérdidas en la tubería que recorre perimetralmente el depósito de estériles.
- Las dimensiones de la lámina de agua.
- La pared exterior del dique para detectar posibles desprendimientos de piedras.



Figura 5. Disposición de AI en el depósito de estériles.

### Colaboración del CSIC

La colaboración con el CSIC tiene 2 objetivos principales: 1) evaluar y validar el potencial del satélite Sentinel-1 de Copernicus para el monitoreo continuo de deformación mediante la técnica InSAR, y 2) evaluar y validar la sísmica pasiva para monitorear variaciones en los parámetros mecánicos del subsuelo. Además, se investigará la mejor forma de proporcionar resultados fácilmente interpretables y adaptados a la plataforma de vigilancia.

### Monitoreo InSAR, (Interferometría de 'Synthetic Aperture Radar')

La interferometría satelital se fundamenta en la correlación de imágenes radar tomadas a tiempos diferentes para detectar variaciones de fase que podrían estar asociadas con deformaciones en el relieve de la superficie terrestre. Como se miden variaciones a la escala de longitud de onda, en teoría, se pueden medir deformaciones del terreno con precisión milimétrica. Sin embargo, hay otros factores que intervienen en la ecuación como son la contribución atmosférica, la paralaje, errores orbitales, etc., que complican el procesado y tienen que ser corregidos para explotar esta técnica a su máximo potencial.

La puesta en órbita del satélite europeo Sentinel-1 del programa Copernicus (CE-ESA) en el año 2014 supuso una auténtica revolución. Sentinel-1 proporciona imágenes de gran calidad de cualquier punto del planeta con una frecuencia de hasta 6 días en algunas regiones. Además, el acceso a las imágenes es libre, ya sean nuevas o de catálogo, y tanto para proyectos académicos como comerciales. Aunque por su carácter global es un satélite de resolución media, Sentinel-1 ha puesto de moda la técnica InSAR en el sector de la ingeniería civil. Sin embargo, todavía hay retos a superar para normalizar su uso, fundamentalmente debidos al gran volumen de datos a manejar y la complejidad de su procesado que requieren de potentes servidores y un alto grado de especialización.

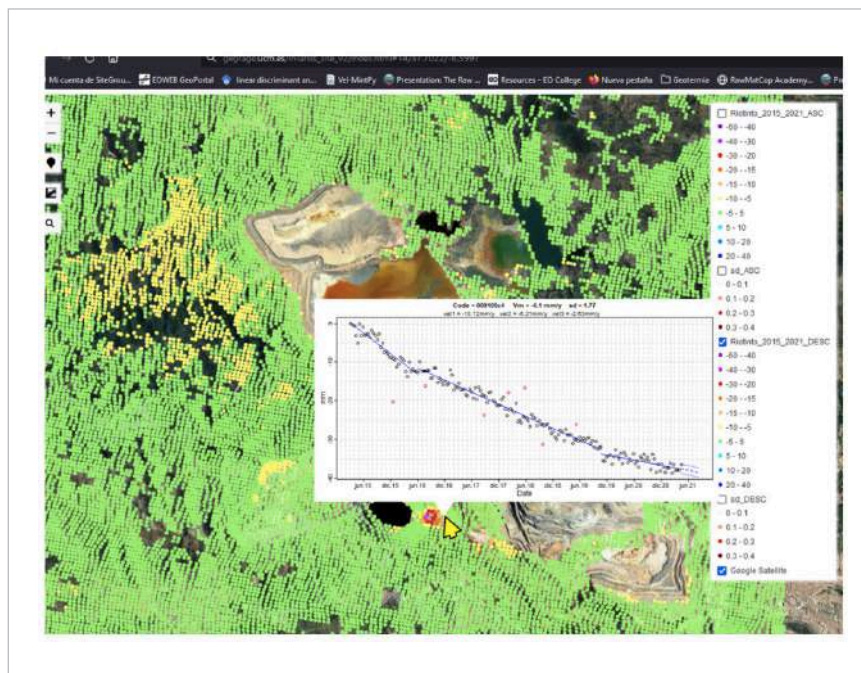


Figura 6. Mapa de deformación de la mina de Riotinto usando Sentinel-1, proyecto InTarsis. Cada punto representa una medida de velocidad de deformación en mm/año. Al seleccionar un punto se despliega una gráfica con el desplazamiento acumulado, en este caso en una zona inestable conocida de corta Atalaya entre mayo 2015 y junio 2021. En zonas inundadas, muy vegetadas o en transformación se pierde la cobertura. Fuente CSIC.

Las principales ventajas que aporta Sentinel-1 son:

- Es un sistema remoto de amplia cobertura, una imagen cubre 250 km.
- Tamaño de pixel aproximado de 20x20 a 50x50 m, según la técnica de procesado.
- Puede medir desplazamientos con velocidades de mm/año, señalando zonas de debilidad en cortas, escombreras y presas, incluidas zonas de difícil acceso.
- Los datos son correlacionables y complementarios con medidas puntuales de terreno.
- Las imágenes son de acceso libre.

Las principales limitaciones son:

- El procesado de interferométrico de imágenes radar es complejo y requiere potentes servidores.
- En zonas de densa vegetación la señal se decorrela y se pierde cobertura.
- También hay decorrelación y pérdida de cobertura en zonas en continua transformación. Por lo tanto, su ámbito principal de aplicación es el monitoreo de elementos pasivos.

### Monitoreo con sísmica pasiva

El monitoreo con sísmica pasiva se centra en la detección de variaciones en los patrones de registro continuo en estaciones sísmicas que podrían indicar cambios en el medio subterráneo. En los últimos años se ha extendido su uso al monitoreo de infraestructuras singulares (presas, edificios, centrales nucleares) o de actividades que pueden afectar la integridad del subsuelo (inyecciones de gas, fracking, excavaciones,...).

#### Ventajas

- La sísmica pasiva no requiere fuente sísmica y por lo tanto es económica.
- Registra en continuo, proporcionando información en tiempo real.
- Es adaptable y escalable a cualquier contexto.
- No es invasiva.

#### Desventajas

- Requiere de una gestión de grandes volúmenes de datos.
- La calidad del ruido ambiente puede ser determinante.

En el proyecto pretendemos desplegar una red de sismómetros de nueva generación, tipo MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), con dos objetivos: a) control de microsismicidad y b) monitoreo del subsuelo mediante interferometría de ruido ambiente (ANI). En un mismo registro sísmico, aparte de los grandes eventos, tenemos microsismos y ruido ambiental, que es característico de cada zona y que podemos utilizar para monitorear.

**a) Microsismicidad**

La interacción humana con el subsuelo puede producir cambios en el régimen de esfuerzos e inducir microsismos, que son demasiado pequeños para ser percibidos por la población y comúnmente de magnitud negativa. Es importante identificar y localizar esta microsismicidad ya que puede indicar zonas de debilidad en el subsuelo. En la inyección de gas suele considerarse magnitud 0.5 como umbral de alerta. Actualmente, muchas construcciones singulares, como centrales nucleares o presas, están equipadas de sismómetros como medida de seguridad.

**b) Interferometría de ruido ambiente ANI**

Las técnicas de correlación de ruido sísmico consisten en comparar el registro diario de las estaciones con su señal de referencia con el objetivo de detectar variaciones que podrían indicar cambios mecánicos en el subsuelo. La señal de referencia se obtiene mediante el apilado de un registro suficientemente largo como para obtener una respuesta consistente del medio (su firma). Al comparar los registros diarios con la señal de referencia podemos obtener mapas de similitud. Si el ruido permanece invariante, en caso de observar zonas de pérdida de similitud sabremos que allí el medio está cambiando. Estas variaciones pueden ser temporales, climáticas o de niveles acuíferos, o permanentes, como alteraciones en la mecánica del medio. Este método es muy sensible a pequeñas variaciones

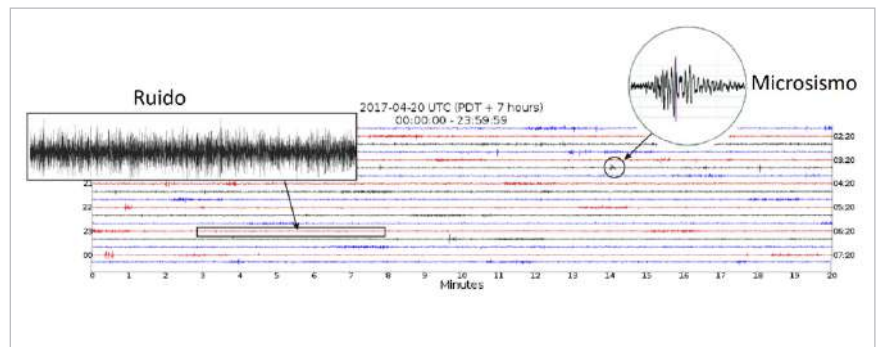


Figura 7. Registro sísmico en una estación de prueba en la mina de Riotinto. Fuente CSIC.

Figura 8. Magnitud vs ocurrencia de terremotos en el mundo. La interacción humana con el subsuelo puede inducir sismicidad que generalmente es imperceptible. En la inyección de gas suele considerarse magnitud 0.5 como umbral de alerta.

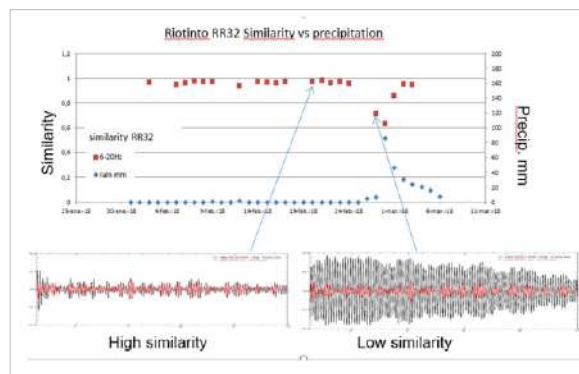
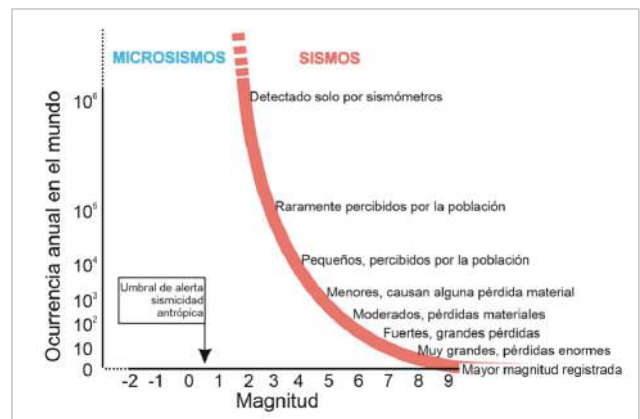


Figura 9. La gráfica es un ejemplo de la pérdida de similitud registrado en una estación-test de Riotinto relacionada con un episodio de lluvia. Una vez cesada la lluvia, se recupera la similitud. Debajo, registros sísmicos en días de alta y baja similitud. En rojo se muestra la señal de referencia característica del medio para esa estación. Fuente CSIC.

y puede detectar inestabilidades del subsuelo antes de que tengan expresión en superficie.

**CONCLUSIÓN**

El proyecto de innovación 'Minerva #Smartgeocontrol' de Atalaya Mining es un paso hacia la transición digital de la mina de Riotinto y una garantía adicional de seguridad y sostenibilidad en nuestra actividad minera. Su principal objetivo es crear una plataforma de vigilancia e interpretación multidisciplinar que centralice las observaciones de los sensores geodésicos y geotécnicos que monitorean la mina. Además

de los elementos de control ya en funcionamiento, Atalaya Mining ha establecido acuerdos de colaboración con Saytel y el CSIC para investigar la integración a la plataforma de técnicas de monitoreo innovadoras como son la Vigilancia AI, la sísmica pasiva y la interferometría satelital.

Emulando a su arquetipo mitológico, Minerva vigilará en tiempo real la mina desde el espacio, suelo y subsuelo, y nos anticipará las potenciales contingencias. ■