



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

GB- SAR

PROYECTO:

«Prototipo de
radar GB-SAR
para el monitoreo
de deslizamientos
de tierra»

Convenio 048-2021
FONDECYT



Proyecto financiado por



CRÉDITOS

Ministro del Ambiente

Juan Castro Vargas

Presidente ejecutivo del IGP

Hernando Tavera

Director científico del IGP

Edmundo Norabuena

Jefatura UFC IGP

Antonella Condorena

Coordinador del proyecto

Juan Carlos Villegas

Equipo científico del proyecto

Juan Carlos Villegas

César de la Jara

Juan Carlos Gómez

Wendy Quiroz

Socorro Vivanco

Keiko Moroccoire

Mijaell Berduzco

Ricardo Rojas

Edward Arboleda

Mariana Vivanco

Renzo Anchivilca

Juan Pablo Velásquez

Elena Curay

Autores

Juan Carlos Villegas

Wendy Quiroz

César de la Jara

Socorro Vivanco

Juan Carlos Gómez

Keiko Moroccoire

Mijaell Berduzco

Óscar Balladares

Edición

Juan Carlos Villegas

Wendy Quiroz

Juan Carlos Gómez

Jorge Andrés Concha

Diseño y diagramación

Jorge Andrés Concha

Fotografía

IGP | Carátula: Deslizamiento en Cuenca, región Huancavelica

CONTENIDO

4

¿Cuál es la **contribución** de este proyecto para la Gestión del Riesgo de Desastres en el país?

6

Deslizamientos en Perú: ¿por qué es necesario estudiarlos?

8

El **aporte del proyecto**: la optimización del prototipo de GB-SAR

18

¿Qué ocurre en la localidad de **Cuenca**?

38

¿Qué ocurre en la localidad de **Tabernuy**?

49

Logros del proyecto: este es nuestro **aporte** para el **país**

Este producto ha sido elaborado en el marco del proyecto «Mejoras del prototipo y determinación de los rangos óptimos de distancia al objetivo, potencia transmitida y condiciones climáticas de operación de radar GB-SAR para monitoreo de deslizamientos de tierra», mediante convenio 048-2021-FONDECYT.

1. ¿CUÁL ES LA CONTRIBUCIÓN DE ESTE PROYECTO PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES EN EL PAÍS?

Este proyecto ha generado importantes contribuciones para fortalecer la gestión del riesgo de desastres en el Perú, especialmente en lo que respecta al monitoreo y evaluación de deslizamientos de tierra. La implementación del prototipo de radar GB-SAR, y su operación en zonas críticas como Cuenca y Tabernuy, brinda información detallada sobre los movimientos del terreno, lo que permite detectar áreas inestables y cuantificar los desplazamientos con precisión milimétrica.

Estos datos son de gran utilidad para los tomadores de decisiones en la gestión de riesgos, ya que les permite identificar oportunamente las zonas más vulnerables y adoptar medidas preventivas adecuadas, tales como evacuaciones, reubicaciones o trabajos de estabilización. Asimismo, los estudios geodinámicos y geotécnicos realizados han revelado las características físicas y los problemas geológicos que subyacen a estos deslizamientos, lo cual es fundamental para comprender mejor los riesgos y diseñar intervenciones efectivas a largo plazo.

Adicionalmente, los modelos digitales de elevación, ortofotos y mediciones GPS obtenidas a través de técnicas como la fotogrametría con drones, proporcionan una perspectiva integral de las zonas afectadas, lo cual facilita la planificación territorial y la evaluación de daños. Esta información detallada y multidisciplinaria es clave para que las autoridades tomen decisiones informadas y asignen eficientemente los recursos asignados en la mitigación de riesgos y la respuesta ante desastres.



Figura 1. Deslizamiento de tierra ocurrido en la provincia La Merced, Junín.

2. DESLIZAMIENTOS EN PERÚ: ¿POR QUÉ ES NECESARIO ESTUDIARLOS?

En Perú, la compleja topografía de la cordillera andina, con laderas pronunciadas, sistemas de fallas, actividad sísmica y los efectos del cambio climático, la vuelve propensa a deslizamientos que afectan la estabilidad de las laderas y, por ende, la seguridad de las zonas rurales y urbanas cercanas. Como muestra de esta realidad, entre 2003 y 2022, se registraron 3655 deslizamientos que dieron como resultados un total de 227 498 afectados a nivel nacional (Compendio Estadístico INDECI, 2023).

Frente a este contexto, con el fin de reducir la brecha existente en el estudio y gestión de deslizamientos que afectan a ciudades expuestas a este peligro, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), con el soporte financiero de FONDECYT, ha desarrollado un proyecto de innovación tecnológica que consiste en un prototipo de radar terrestre de apertura sintética (GB-SAR). Este radar posee mejoras significativas en *hardware* y *software* respecto a un prototipo inicial que se construyó en 2018. Para poner a prueba el GB-SAR se han instalado dos radares, uno en Cuenca (Huancavelica) y otro en el paraje Tabernuy (Junín), con el fin de monitorear los deslizamientos activos que afectan a dichas localidades.

Adicionalmente, se realizaron estudios complementarios, como mediciones GPS, levantamiento topográfico y ensayos geotécnicos, a fin de validar las mediciones del radar GB-SAR. El desarrollo de este prototipo abre, sin dudas, nuevas posibilidades para el monitoreo proactivo de deslizamientos en Perú.

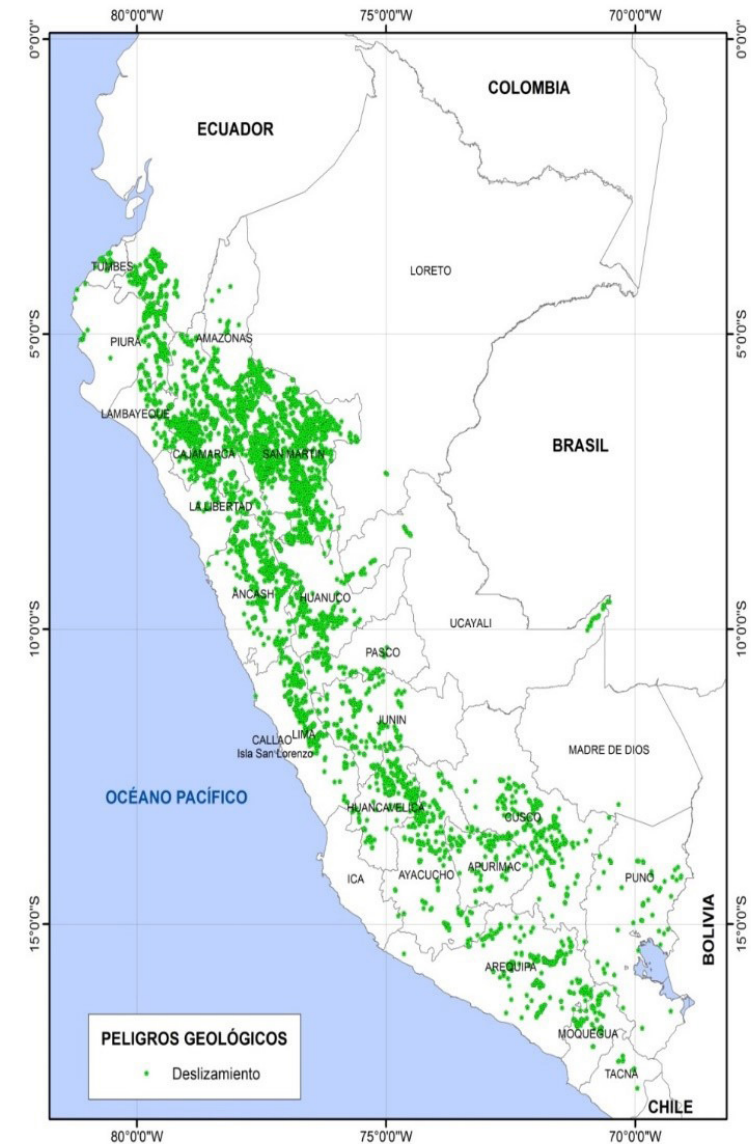


Figura 2. Mapa de deslizamientos activos en el Perú, periodo 2014-2017. Fuente INDECI.

3. EL APOORTE DEL PROYECTO: LA OPTIMIZACIÓN DEL PROTOTIPO DE GB-SAR

Un radar de apertura sintética terrestre GB-SAR (por sus siglas en inglés Ground Based-Synthetic Aperture Radar) es un tipo de radar que crea imágenes detalladas de la superficie terrestre utilizando ondas de radio. A diferencia de los radares convencionales que emiten pulsos desde una antena fija, el GB-SAR mueve su antena mientras recibe las señales de retorno o ecos. Esto es posible debido a que sintetiza una antena de gran apertura o tamaño que permite mejorar la resolución espacial.

En el ámbito del monitoreo de deslizamientos, el GB-SAR se utiliza para detectar cambios en la superficie que podrían indicar la posibilidad de deslizamientos u otros movimientos de masa. Esta tecnología proporciona información valiosa para identificar áreas de riesgo y tomar medidas preventivas o de mitigación.

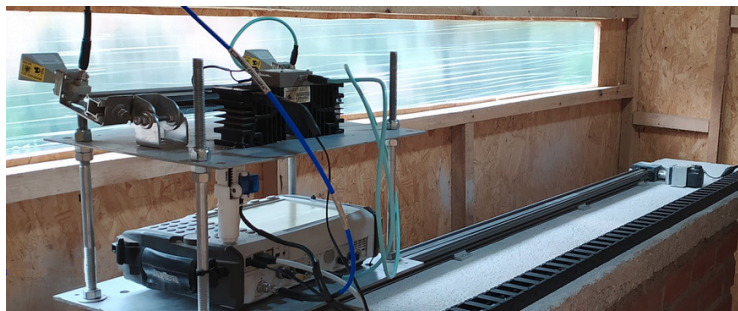


Figura 3. Vista del prototipo de radar de apertura sintética GB-SAR para monitoreo de deslizamientos desarrollado por el IGP.

- Partes del GB-SAR

- **Antenas:** Emiten pulsos de radio hacia la superficie terrestre y recibe los ecos reflejados.
- **Amplificador de potencia:** Su función es la de amplificar la señal para mejorar la capacidad de detección y alcance del SAR.
- **VNA:** Es el transmisor y receptor de radar.
- **Plataforma móvil y riel:** Es el sistema que se encarga de mover la antena a lo largo de una trayectoria para generar la apertura sintética.
- **Unidad de control:** Supervisa y coordina todas las operaciones del SAR, como el movimiento del motor, la transmisión de señales y el procesamiento de datos.

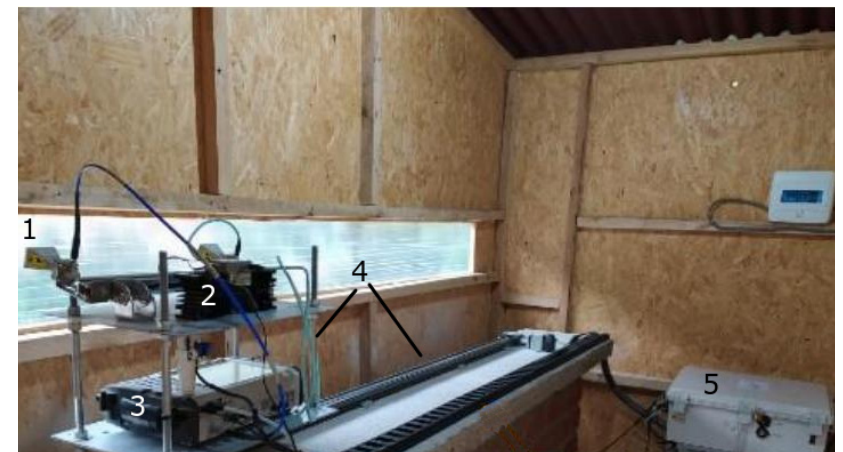
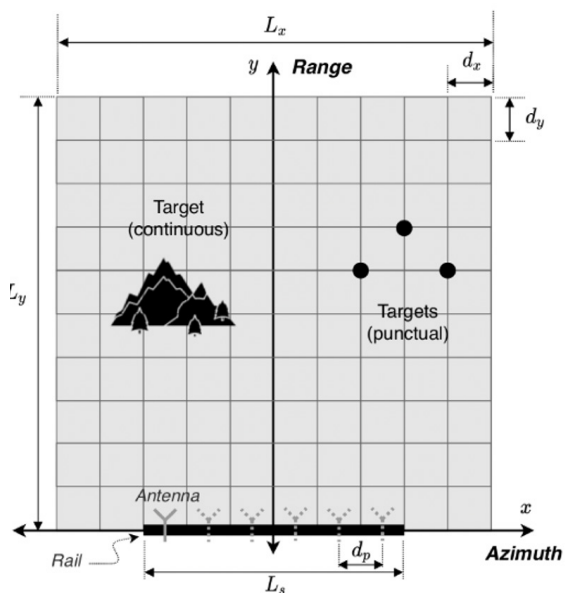


Figura 4. Componentes del radar de monitoreo de deslizamientos: 1) antenas de transmisión y recepción; 2) amplificador de potencia; 3) analizador vectorial de redes; 4) plataforma móvil y riel; 5) unidad de control.

- **Parámetros más importantes**

El GB-SAR utiliza una señal de onda continua de frecuencia escalonada. En cada barrido, el radar escanea 220 puntos, a 1001 frecuencias, con un ancho de banda de 100 MHz. Emplea 9 minutos para completar un recorrido completo del riel, lo que permite una detección precisa de los movimientos del terreno.

Figura 5. Gráfica que muestra los principales parámetros del GB-SAR: Apertura L_s : 1.4 m
Puntos acimutales N_p : 173,
Tamaño de la escena en rango L_x : 700,
Tamaño de la escena en acimut L_y : 600,
Grillas de la escena d_x ; d_y : 1 m.



Un aspecto importante a destacar es la geometría de barrido del GB-SAR. En la gráfica superior se muestra en forma conceptual la antena sobre el riel, cuya apertura sintética es igual a L_s y se mueve en pasos d_p . También se muestra el alcance máximo del radar L_y y la posibilidad de observar blancos continuos o discretos.

- **El hardware del GB-SAR**

El *hardware* del GB-SAR está compuesto de dos partes: una eléctrica-electrónica y otra mecánica. En la primera se incluyen componentes como el Analizador Vectorial de Redes (VNA), las antenas, el amplificador de potencia, la tarjeta UDOO, el *router*, el *driver* y el motor de pasos. En la parte mecánica destacan el riel para desplazar las antenas, la estructura móvil de soporte del VNA, el sistema que guía la cadena portacables y el UPS.

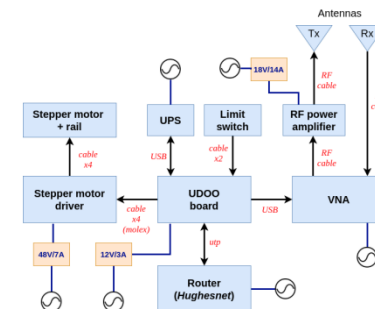


Figura 6. Diagrama de bloques donde se observan los componentes principales del radar y cómo están interconectados: antenas, amplificador de potencia, cables de baja pérdida, VNA, fuentes de alimentación, entre otros.

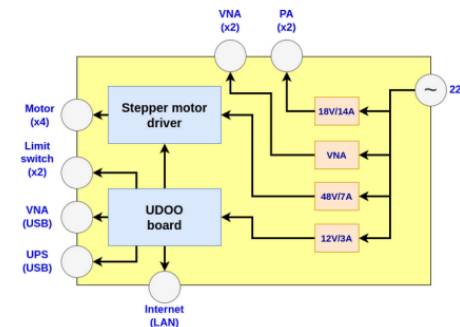


Figura 7. Diagrama de bloques donde se muestran los principales componentes de la unidad de control, fuentes de alimentación y conectores disponibles.

3.1 ¿Qué productos se obtienen del GB-SAR?

- Interferogramas GB-SAR

En la Figura 8 se muestran dos imágenes consecutivas obtenidas por el GB-SAR. Estas se usan para generar los interferogramas que, a su vez, se emplean para analizar los cambios o desplazamientos del punto objetivo.

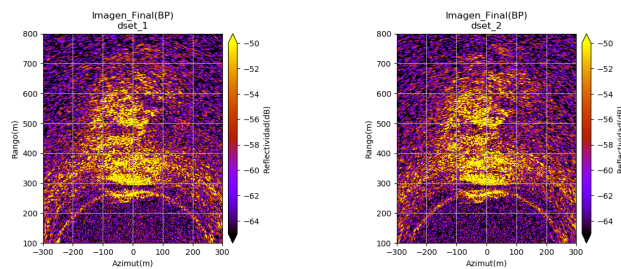


Figura 8. Imágenes consecutivas de reflectividad generadas por el radar. Estas muestran cómo la energía del radar es reflejada por distintos objetos en la superficie observada.

Las diferencias entre estas imágenes se ve en el interferograma de la Figura 9, en la que se observa que las diferencias son proporcionales al desplazamiento de diferentes zonas del área observada que es expresada en milímetros.

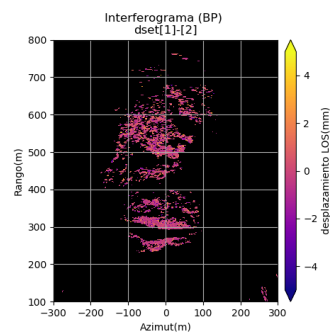


Figura 9. Interferograma generado a partir de las imágenes de radar GB-SAR.

- Series de tiempo del GB-SAR

A partir de los interferogramas se pueden calcular los desplazamiento para cada píxel, lo que permite obtener una serie temporal que representa la evolución del desplazamiento en intervalos mensuales para el punto analizado.

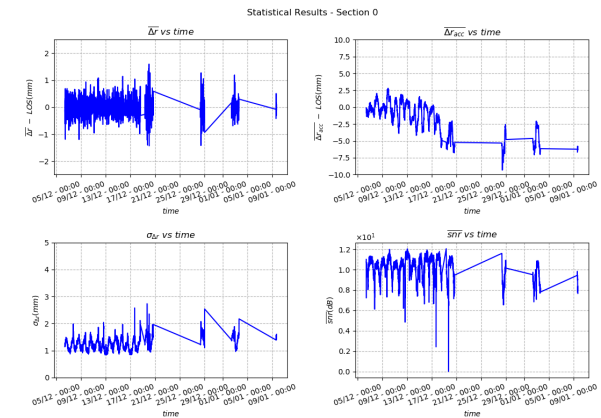


Figura 10. Series de tiempo estadísticas. Arriba izquierda: desplazamiento promedio; arriba derecha: desplazamiento acumulado; izquierda abajo: desviación estándar del desplazamiento; abajo derecha: relación señal a ruido.

Las curvas muestran diferentes aspectos del desplazamiento detectado por el GB-SAR en la estación de Cuenca durante el periodo del 5 de diciembre de 2022 al 9 de enero de 2023.

1. La primera serie de tiempo representa el desplazamiento promedio a lo largo del tiempo en milímetros.
2. La segunda serie de tiempo representa el desplazamiento acumulado en milímetros.
3. La tercera serie de tiempo presenta la desviación estándar del desplazamiento.
4. La última serie de tiempo representa la relación señal a ruido con respecto a los datos de desplazamiento.

3.2 Poniendo a prueba el GB-SAR: zonas de deslizamiento estudiadas

Huancavelica y Junín se encuentran entre las regiones de mayor incidencia ante la ocurrencia de deslizamientos, según el Compendio Estadístico INDECI 2023.

Las estaciones GB-SAR se han instalado en entornos geográficos contrastantes: una de ellas en una región montañosa de sierra alta, mientras que la otra en una zona selvática, esto con el objetivo de analizar las diferencias en el rendimiento de las estaciones debido a las marcadas disparidades en topografía, vegetación y condiciones ambientales.



Figura 11. a) Deslizamiento en la localidad de Cuenca, Huancavelica. b) Deslizamiento en el paraje Tabernuy, Junín.

La primera estación GB-SAR fue instalada en la localidad de Cuenca, Huancavelica, justo frente al deslizamiento, tal como se aprecia en la Figura 12. La ubicación del radar se indica con un punto rojo y el área del deslizamiento con la línea de color azul.



Figura 12. Vista satelital que muestra el deslizamiento de tierra activo en el distrito de Cuenca, Huancavelica. El contorno delinea los límites del deslizamiento. El punto rojo indica la ubicación del radar GB-SAR.

La segunda estación GB-SAR fue instalada en el deslizamiento del paraje Tabernuy, Chanchamayo, Junín. En la Figura 13 se marca el deslizamiento con una línea amarilla, mientras que la ubicación del radar se representa por un punto rojo.



Figura 13. Vista satelital que muestra el deslizamiento de tierra activo en la localidad paraje Tabernuy, Junín. El contorno indica las áreas de deslizamiento. El punto rojo indica la ubicación del radar GB-SAR.



CUENCA

Deslizamiento en Huancavelica

4. ¿QUÉ OCURRE EN LA LOCALIDAD DE CUENCA?

La localidad de Cuenca se ubica en el distrito de Cuenca, provincia y región Huancavelica, en las coordenadas UTM 495801 E, 8625542 N, a una altitud de 3192 m s. n. m., y abarca aproximadamente 243 ha. La población comprende 468 habitantes, (INEI, 2007) e infraestructuras básicas (207 viviendas y línea férrea Huancayo-Huancavelica). La principal actividad es la agropecuaria (agricultura y ganadería).

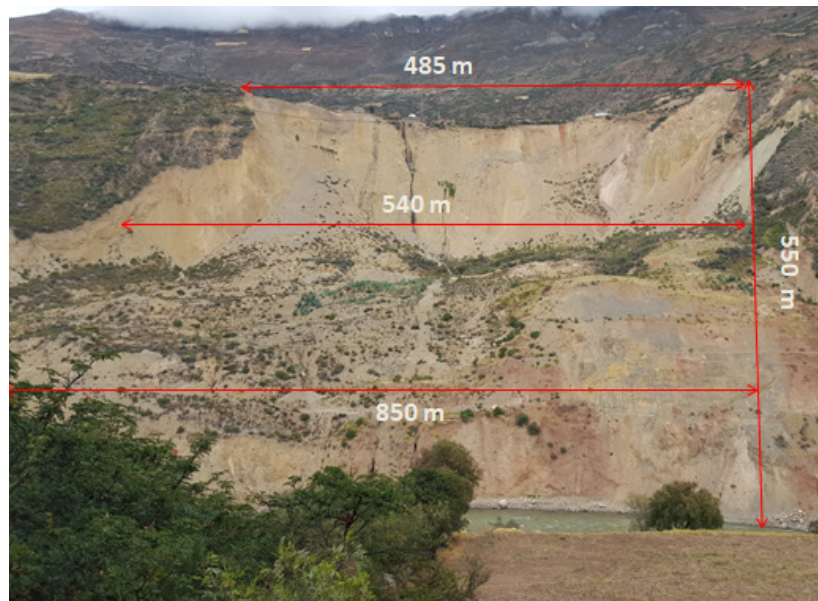


Figura 15. Dimensiones del deslizamiento en la ladera del cerro Huamanrazo.

• ¿Cuál es su problemática?

El deslizamiento es del tipo rotacional. El evento de mayor magnitud, suscitado el 20 de enero de 2014, presentó las siguientes dimensiones: 550 m de longitud, medida estimada desde la corona (parte alta) hasta el pie (parte baja) del deslizamiento, y ancho estimado en 485 m (parte alta), 540 m (parte media) y 850 m (parte baja), aproximadamente.

El evento generó el represamiento del cauce del río Mantaro, lo que afectó el 50 % del total de infraestructuras ubicadas en las inmediaciones de la localidad de Cuenca y el barrio Huayllapampa.



Figura 16. Algunas de las infraestructuras afectadas. a) Línea férrea Huancayo-Huancavelica. b) Grietas en acera ubicada a 15 m del deslizamiento.

4.1 El GB-SAR en acción: estudios en Cuenca

El radar GB-SAR comenzó a operar en Cuenca a finales de 2021 y, desde entonces, viene recopilando información sobre la dinámica del deslizamiento. En cada escaneo que realiza, el radar adquiere imágenes que, posteriormente, mediante un proceso de comparación de imágenes, permite la obtención de interferogramas que muestran los cambios en la distancia entre el sensor y el objetivo, entre dos momentos diferentes de adquisición. Dichos cambios permiten identificar y cuantificar desplazamientos de la superficie del suelo.

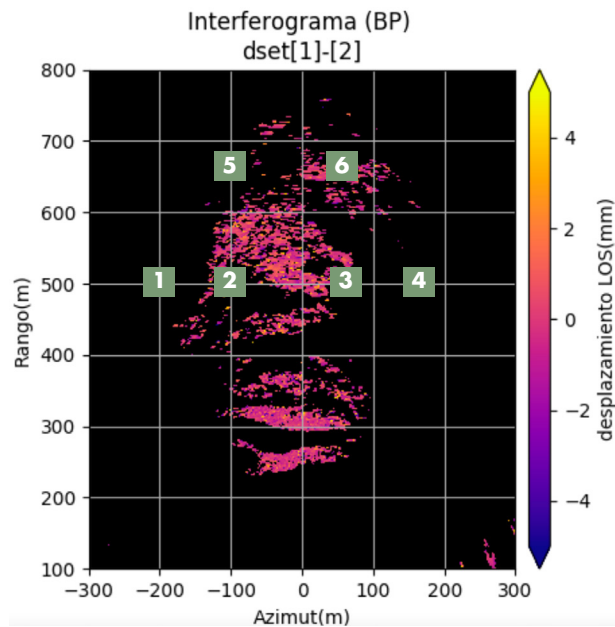


Figura 17. Interferograma generado a partir de imágenes de radar GB-SAR. Se muestran los patrones de desplazamiento superficial asociados al deslizamiento activo, codificados según la barra de color.

Series temporales GNSS

A partir del análisis de múltiples interferogramas GB-SAR, se obtuvieron series de tiempo para el periodo de febrero a diciembre de 2022. Estas series muestran cómo la superficie ha variado en el tiempo en las zonas 2 y 3 del interferograma.

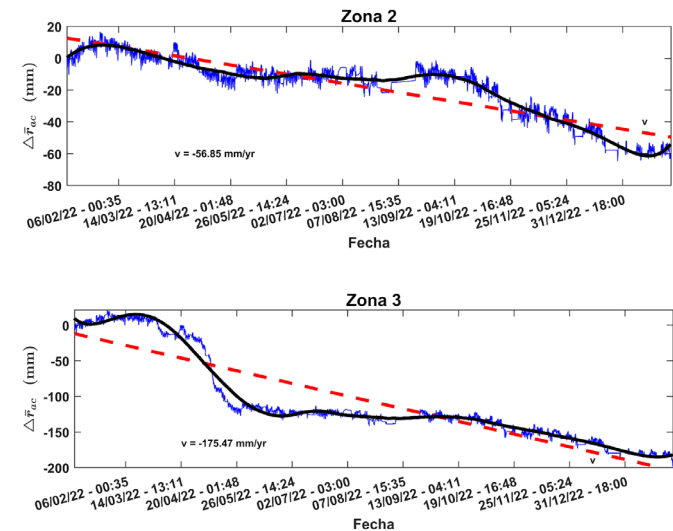


Figura 18. Series temporales GB-SAR que muestran el desplazamiento promedio del deslizamiento en las zonas 2 y 3 (ver Figura 17), en dirección de la línea de vista del radar, para el periodo febrero a diciembre de 2022.

En la zona 2 se registró un desplazamiento acumulado de 60 mm. Es preciso mencionar que, entre octubre y diciembre de 2022, se registraron 50 mm de desplazamiento. En la zona 3 se detectó un desplazamiento acumulado de 175 mm. En esta zona destacan 100 mm de desplazamiento ocurridos en mayo. Estas series evidencian la evolución dinámica del deslizamiento, con periodos de aparente estabilidad y otros de desplazamiento significativo, lo que refleja la complejidad del deslizamiento.

4.2 Abordando el problema: estudios geodinámicos

El cartografiado geodinámico consiste en registrar la ubicación de las evidencias de reactivación del deslizamiento, como los escarpes, agrietamientos y cárcavas en la ladera inestable y grietas en las infraestructuras. De esta manera, se conforma una base de datos georeferenciada a partir de la cual se estima el área, el volumen del deslizamiento y las zonas de probable reactivación. En el caso del deslizamiento de Cuenca, el cartografiado se realizó entre los períodos 2016-2018 y 2020-2022. Esta información contribuyó en el proceso para elaborar el mapa de evolución y el modelo geodinámico-geotécnico.



Figura 19. Cárcavas delimitadas en la parte central de la ladera, durante el año 2017 (a) y el año 2018 (b).



Figura 20. Grietas en infraestructuras. a) Medición de abertura 2 cm en el año 2017. b) Abertura de 4 cm en 2018.

Figura 21. Deslizamientos entre el período 2020-2023. La línea punteada de color rojo delimita el escarpe antiguo, mientras que la de color amarillo el escarpe actual.



Figura 22. Pérdida del punto de control MCU-08 ubicado en el mirador de Cuenca debido al deslizamiento de 2021.

- **Producto: el mapa geodinámico de Cuenca**

La estimación de las áreas deslizadas durante el período 2005-2022 en la localidad de Cuenca se realizó a partir del análisis de imágenes multitemporales provenientes de los servidores World View, SPOT y Perú SAT.

Se identificaron las zonas de deslizamiento: el polígono en color amarillo representa el más antiguo (2005); en naranja, el de mayor magnitud ocurrido en 2014 y, en color marrón, el área deslizada en 2022. El escarpe es del tipo retrogresivo activo, en dirección a la zona urbana de Cuenca.

Se ha estimado que las áreas del deslizamiento abarcaron entre 0.8 y 18 ha, aproximadamente.

Tabla 1. Áreas deslizadas entre el período 2005-2022.

Tipo de evento	Periodo	Área (ha)
Deslizamiento	06-2005	6.43
	09-2006	0.91
	2007	0.80
	2010	1.26
	07-2022	4.83
	2014	18.8
	2018-2022	4.0

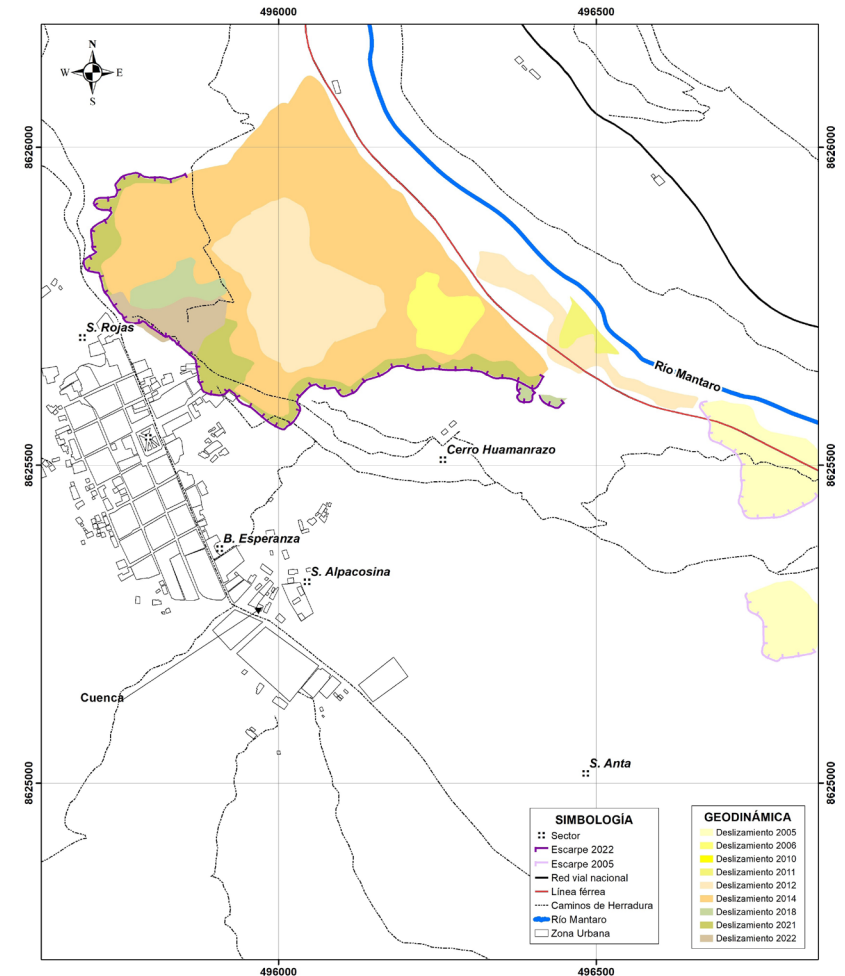


Figura 23. Evolución del deslizamiento en la localidad de Cuenca período 2005-2022.

4.3 Abordando el problema: monitoreo geodésico con GPS

El monitoreo geodésico, mediante mediciones GPS en puntos de control, permite obtener coordenadas precisas y cuantificar los cambios de posición del deslizamiento a lo largo del tiempo.

En Cuenca, desde 2016, se inició la instalación y medición de los puntos de control CU07 al CU09. Posteriormente, en 2021, se añadieron los puntos CU14 al CU18. En todos estos puntos se realizaron mediciones en intervalos anuales o interanuales hasta 2023.



Figura 24. Profesional del IGP durante la realización de mediciones GPS en la localidad de Cuenca.

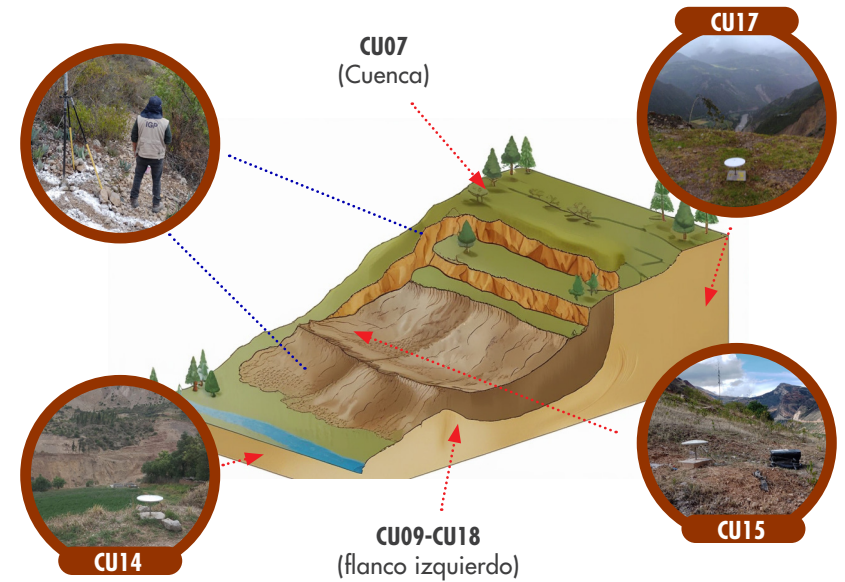


Figura 25. Esquema del deslizamiento en Cuenca con la ubicación referencial de los puntos de control de monitoreo GPS. Se muestran fotografías de los equipos GPS adquiriendo datos.

Los puntos de monitoreo se instalaron en hitos de concreto reforzado para asegurar precisión, estabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo.

Para medir los desplazamientos en relación con una zona estable, se colocó una estación base (CU04) en un afloramiento rocoso, a una distancia de 4 km al sureste del deslizamiento.

4.4 Desplazamientos medidos con GPS en el deslizamiento

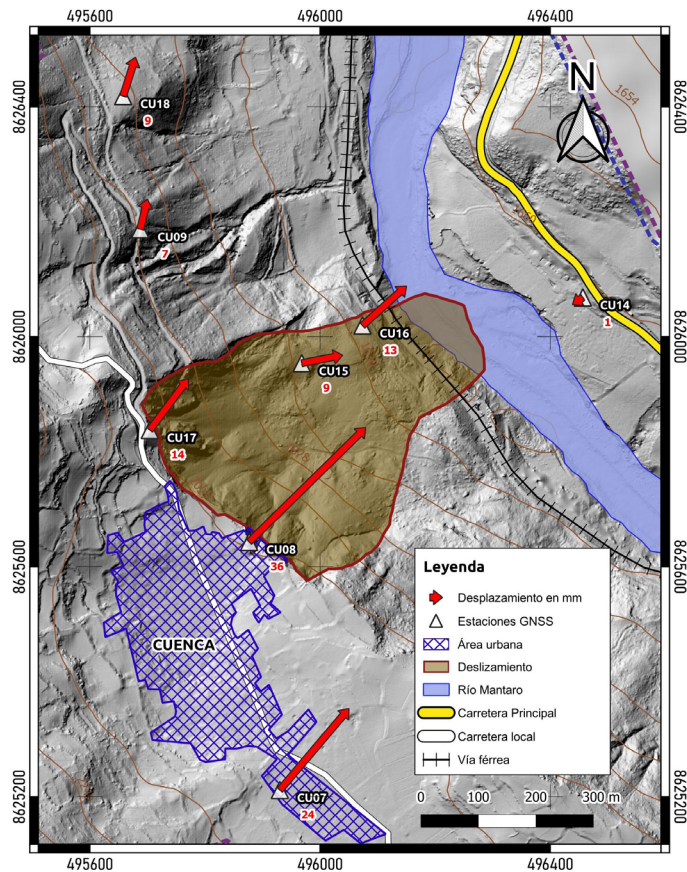


Figura 26. Desplazamiento acumulado en cada punto de monitoreo medido con GPS en el deslizamiento de Cuenca. El área urbana se muestra en azul achurado.

El mapa muestra la dirección y desplazamiento acumulado de los puntos de control geodésicos. El sitio CU08 presentó un desplazamiento de 36 mm en dirección noreste entre 2016 y 2018, aunque, posteriormente, este sector se deslizó. El punto CU07, ubicado en el único centro educativo, registró un desplazamiento de 24 mm en dirección noreste.

Los puntos CU15, CU16 y CU17 presentan desplazamientos en dirección noreste, entre 9 mm y 14 mm. Al norte, los puntos CU09 y CU18 revelan desplazamientos inferiores a 1 cm, lo que indica relativa estabilidad. Finalmente, el punto CU14, donde se encuentra ubicado el radar GB-SAR, presenta un desplazamiento mínimo de 1 mm en dirección oeste, siendo idóneo para el monitoreo con el radar.

Este cambio en la dirección de los movimientos al norte del deslizamiento se asocia a dos zonas que tienen geodinámica diferente: la primera zona comprende desde el extremo sur de Cuenca hasta la CU17, y la segunda zona desde CU09 hacia el norte.

Estos resultados han permitido identificar zonas donde se presenta mayor movimiento superficial en Cuenca, que son coherentes en dirección con el GB-SAR y los desplazamientos obtenidos con técnicas de fotogrametría.

4.5 Una herramienta adicional: el empleo de drones

Los vehículos aéreos no tripulados, más conocidos como drones, nos permiten, en el caso de estudio de deslizamientos, obtener dos productos: un ortomosaico y un modelo de elevación de superficie (MDS).



Figura 27. Levantamiento aerofotogramétrico con dron. Se observa al operador del dron iniciando los trabajos de sobrevuelo en la localidad de Cuenca.

Un ortomosaico, en términos sencillos, es una representación del estado de la superficie terrestre en un momento dado. En el caso de Cuenca, el ortomosaico obtenido tiene una resolución de 5 cm/píxel y una escala de 1:1000. Esta alta resolución permite la identificación de objetos desde 40 cm de longitud, siendo una herramienta útil para la gestión del riesgo de desastres (delimitación de la zona expuesta y sus peligros asociados, identificación de los elementos expuestos, planificación para la respuesta y rehabilitación, entre otros) y para la planificación territorial.

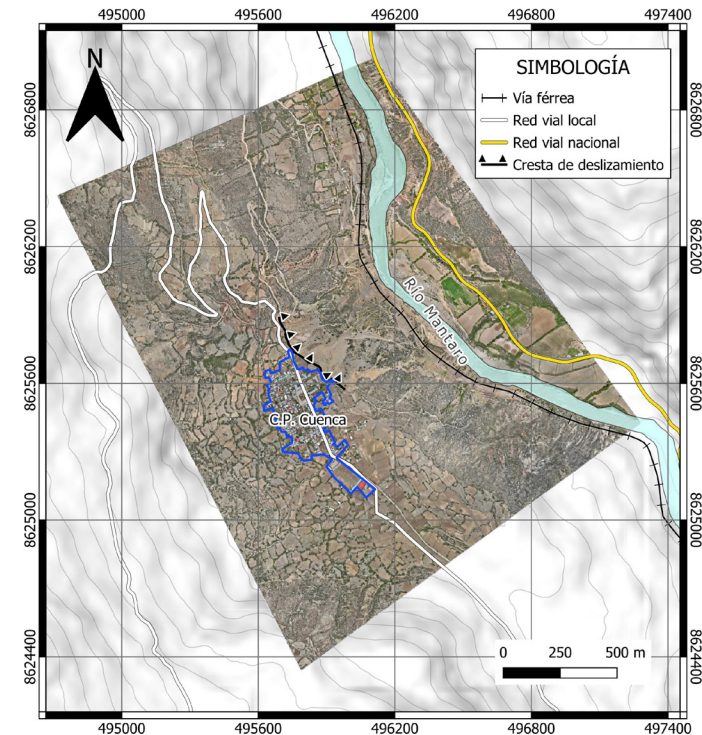


Figura 28. Ortofoto del área urbana y del deslizamiento de Cuenca, Huancavelica, generado a partir de levantamiento aerofotogramétrico.

Por otra parte, un MDS es una representación tridimensional del relieve que incluye todos los elementos presentes. El MDS generado para Cuenca tiene una resolución espacial de 8 cm/píxel y una escala de 1:1000. Este producto se constituye también como un recurso importante para el análisis de riesgos y la planificación territorial ante posibles deslizamientos.

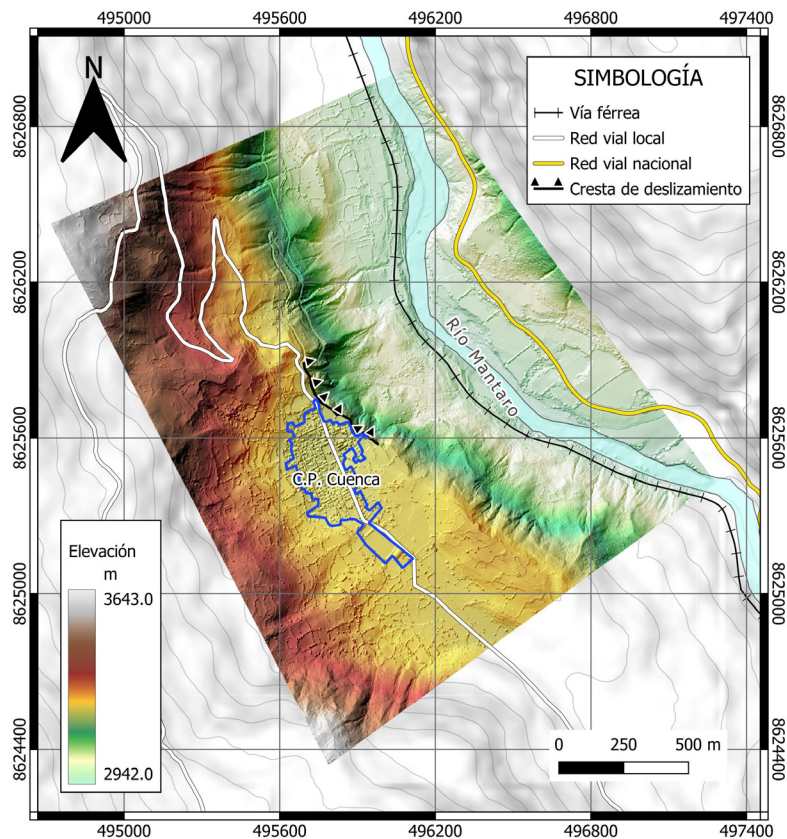


Figura 29. Modelo de elevación de superficie del deslizamiento de Cuenca generado a partir del levantamiento aerofotogramétrico.

4.6 Dando un paso más: el empleo de la fotogrametría con drones para la evaluación del deslizamiento de Cuenca

• Metodologías implementadas

- **Nubes de puntos densa:** Mediante el algoritmo de Comparación de Nubes de Puntos de Modelos Multiescala (M3C2) se pudo obtener los desplazamientos superficiales del terreno.
- **Ortofoto:** A partir de la identificación de puntos homólogos en dos ortomosaicos, adquiridos en mayo y noviembre de 2023, se estimaron desplazamientos con el programa Ames Stereo Pipeline (ASP).

Los resultados muestran una tendencia general de los desplazamientos hacia el noreste, con magnitudes que oscilan entre 4 a 10 centímetros. Los desplazamientos de mayor magnitud, de 8 a 10 centímetros, se registran alrededor del flanco derecho y en las proximidades del escarpe principal. Estos patrones han sido identificados en el rango de alturas de 3100 a 3168 m s. n. m., lo que demuestra la efectividad de las técnicas de fotogrametría para monitorear deslizamientos.

4.7 Escenario futuro del deslizamiento: desarrollo de un modelo geodinámico-geotécnico

El modelado geodinámico-geotécnico del cerro Huamanraza destaca la interrelación entre los distintos tipos de suelos presentes, predominantemente compuestos por gravas y limos, los cuales se encuentran parcialmente saturados en la superficie (puntos azul). Es importante resaltar la presencia de los limos, los mismos que constituyen el 40 % de la ladera que produce el deslizamiento. El escarpe principal, marcado en morado, indica la tendencia del deslizamiento hacia el este, en dirección a la zona urbana de Cuenca. Por último, la colina central en la ladera se ha formado como resultado de la deposición de los materiales deslizados desde las partes más altas del cerro.

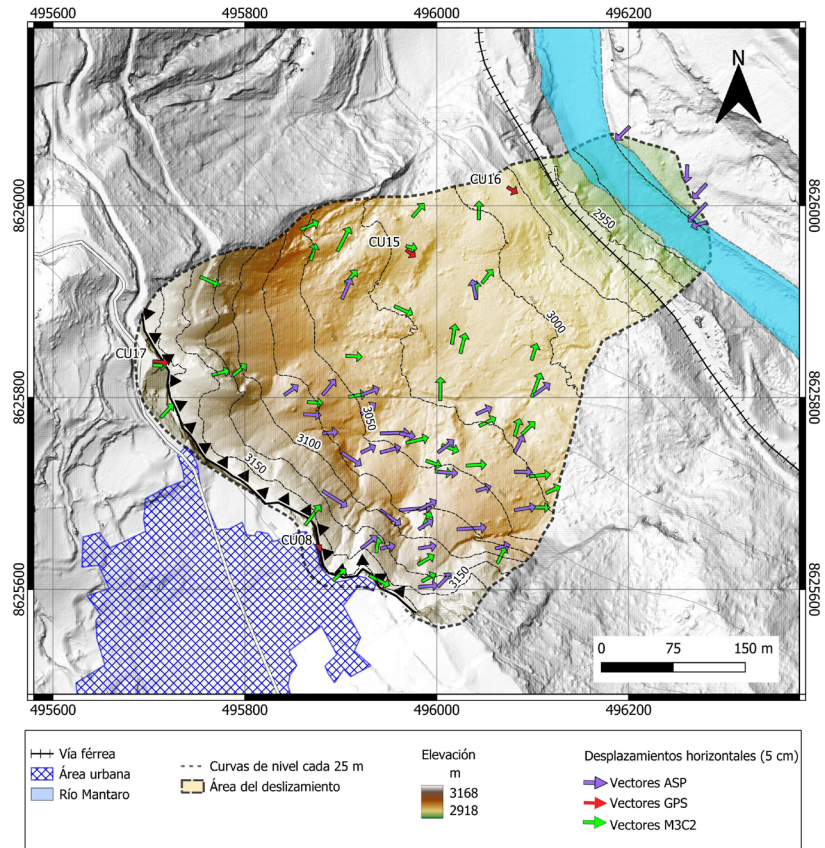


Figura 30. Vectores de desplazamiento del deslizamiento de Cuenca entre mayo y noviembre de 2023, obtenidos mediante GPS (vectores rojos) y fotogrametría (vectores morados para ASP y verdes para M3C2).

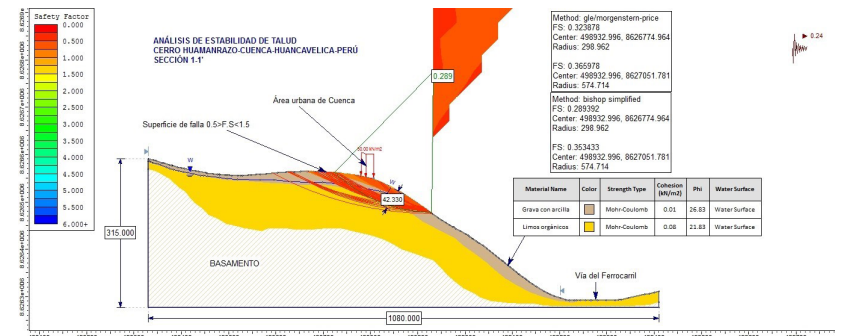


Figura 31. Análisis de estabilidad de talud perfil 1-1' en condiciones pseudoestáticas. El factor de seguridad es menor a 1 y es calificado como ladera inestable.



TABERNUY

Deslizamiento en Junín

5. ¿QUÉ OCURRE EN LA LOCALIDAD DE TABERNUY?

El paraje Tabernuy, ubicado en la provincia de Chanchamayo, región Junión, se sitúa en las coordenadas UTM 462849 E y 8783339 N, a una altitud de 1202 m s. n. m. La población es de 121 habitantes repartida en 25 viviendas (INEI, 2007). La actividad principal en esta zona es la agricultura, en la que se destaca la siembra de cultivos como café, cacao y plátano. Hay dos accesos principales: uno a través de la ruta Río Blanco y otro paralelo al río Nijandarís. El terreno presenta una superficie empinada con pendientes pronunciadas.



Figura 32. Dimensiones actuales del deslizamiento suscitado en el paraje Tabernuy, con un escarpe que supera los 550 m de longitud.

- ¿Cuál es su problemática?

El deslizamiento es de tipo traslacional, siendo el evento de mayor magnitud el suscitado el 11 de enero de 2018, cuyas dimensiones fueron de 387 m de altura y 450 m de ancho, con un escarpe de 484 m de longitud aproximadamente.

Este evento afectó infraestructuras y terrenos agrícolas.



Figura 33. Inspección de la quebrada Agua Rica, paraje Tabernuy.

5.1 Abordando el problema: estudios geodinámicos

La estimación de las áreas deslizadas en el paraje Tabernuy durante el período 2011-2022 se realizó a partir del análisis de imágenes multitemporales provenientes de los servidores World View, Peru SAT y KazEOSat-1.

Se identificaron las zonas de deslizamiento: el polígono de color amarillo para la más antigua y, la más reciente, demarcada con una línea de color marrón. Se ha estimado que el deslizamiento abarca entre 5 ha y 13 ha, aproximadamente. El escarpe principal del mayor evento se ubica aproximadamente a 700 m al noroeste del centro poblado La Romilda.

Tabla 2. Áreas deslizadas entre el período 2011-2022.

Tipo de evento	Periodo	Área (ha)
Deslizamiento	06-2011	5.7
	10-2014	6.6
	08-2018	11.2
	03-2021	11.5
	12-2022	12.9
		0.39

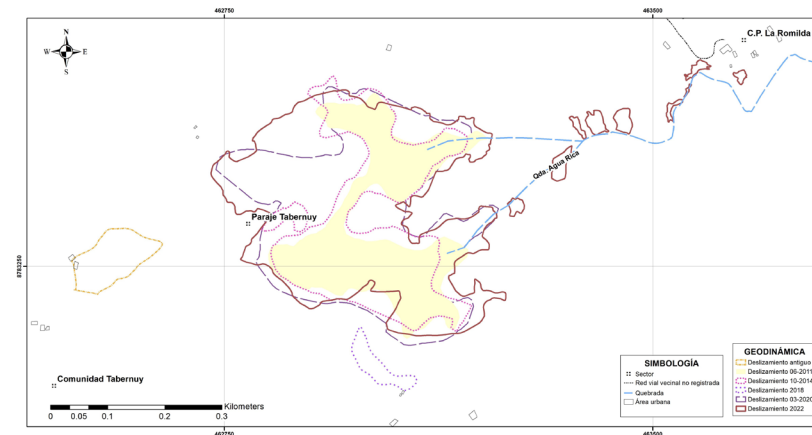


Figura 34. Evolución del deslizamiento en el paraje Tabernuy entre los años 2011 y 2022.



Figura 35. Parte central del deslizamiento en el paraje Tabernuy.

5.1 Abordando el problema: estudios geodésicos

En 2022 se instalaron cinco puntos de control (RM01, RM03, RM04, RM05 y RM06). Posteriormente, en 2023, se realizaron dos nuevas campañas de medición.

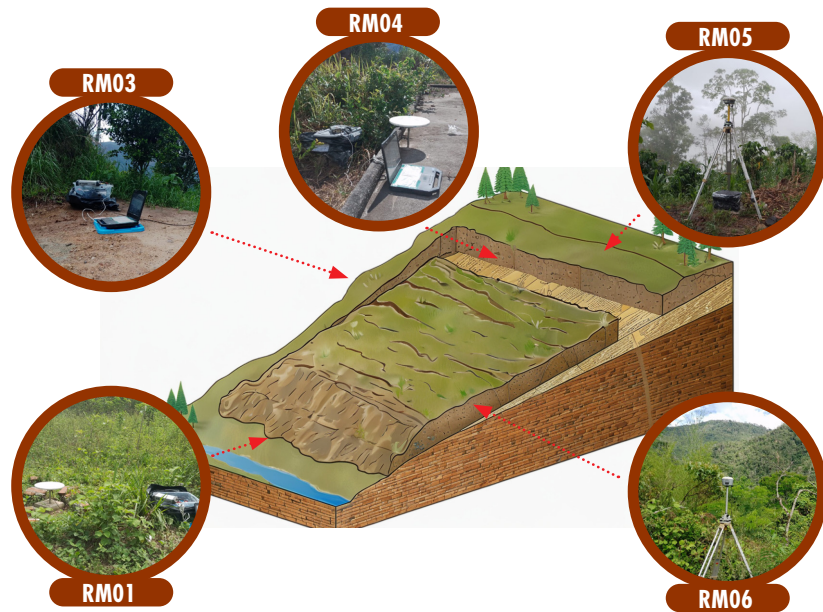


Figura 36. Esquema del deslizamiento en el paraje Tabernuy, con la ubicación referencial de los puntos de control de monitoreo GPS. Se muestran fotografías de los equipos GPS adquiriendo datos.

Para medir los desplazamientos en relación con una zona estable, se colocó una estación base (código MRCD) en un afloramiento rocoso, a una distancia de 8 km al sur del área de deslizamiento.

- **Mapa de desplazamientos GPS 2022-2023**

Se observa que el sitio RM05 experimentó un desplazamiento de 31 mm en dirección sureste. Por otro lado, los puntos RM03 y RM06, ubicados en los flancos laterales del deslizamiento, muestran desplazamientos de 10 mm y 11 mm, respectivamente, en dirección hacia el centro interno del deslizamiento.

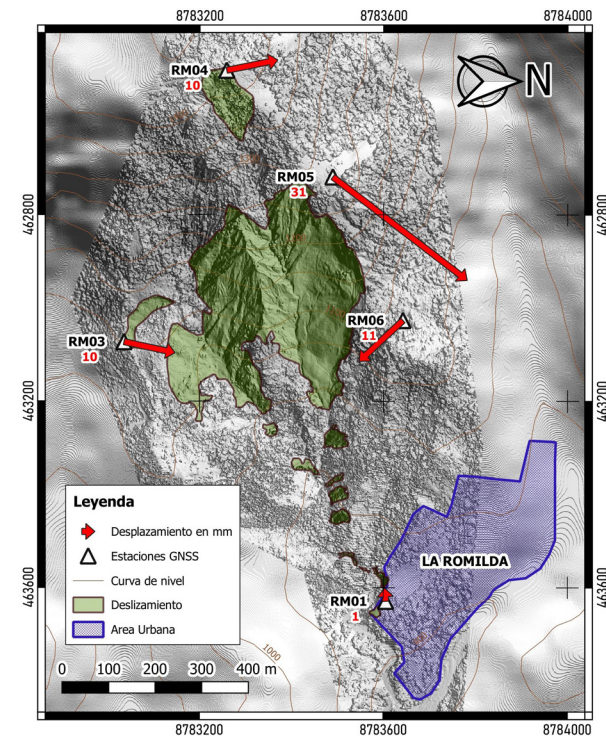


Figura 37. Mapa de desplazamientos en los puntos de monitoreo medidos con GPS en el deslizamiento del paraje Tabernuy. El área urbana se muestra en azul achurado.

Finalmente, el punto RM01, donde se ubicó el radar GB-SAR, presenta un desplazamiento mínimo de 1 mm en dirección norte, lo que refleja la estabilidad del lugar para el monitoreo con el radar.

5.2 Fotogrametría para la evaluación del deslizamiento de Tabernuy

El ortomosaico del deslizamiento del paraje Tabernuy muestra el estado actual de la superficie del terreno con una resolución de 5 cm/píxel y una escala de 1:1000. Este producto permite identificar objetos desde 40 cm de longitud, y se constituye como una herramienta importante para la planificación territorial y estudios de gestión del riesgo de desastres.

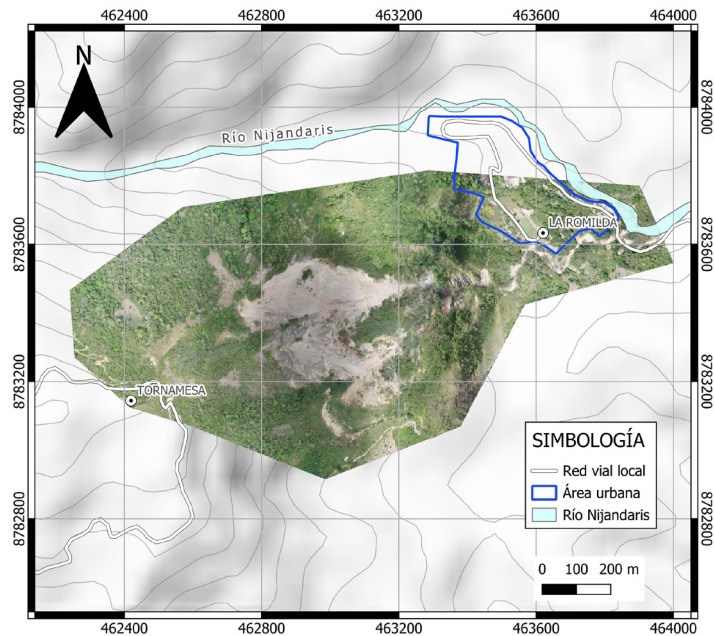


Figura 38. Ortofoto del área urbana y del deslizamiento del paraje Tabernuy, Junín, generado a partir de levantamiento aerofotogramétrico.

El MDS del deslizamiento del paraje Tabernuy ofrece una representación tridimensional detallada de todos los elementos visibles de la localidad, con una escala de 1:1000 y una resolución de 15 cm/píxel, y abarca elevaciones de 863 a 1476 m s. n. m. Este producto es fundamental para el análisis de riesgos y planificación territorial.

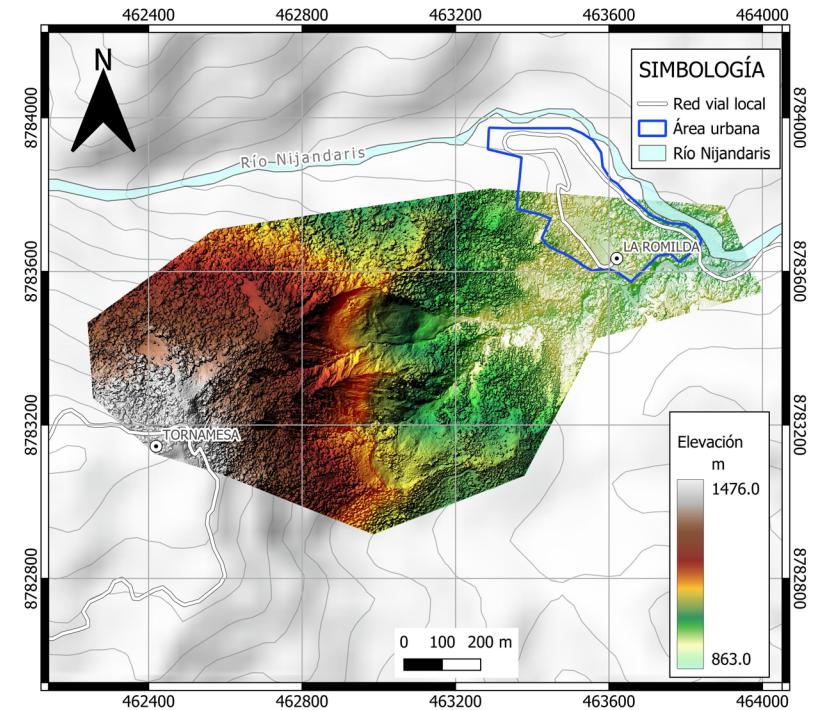


Figura 39. Modelo de elevación de superficie del deslizamiento del paraje Tabernuy generado a partir del levantamiento aerofotogramétrico.

5.3 Análisis de estabilidad de taludes: resultados

Con base en el mapeo geológico y los ensayos de mecánica de suelos, se realizó el análisis de estabilidad de talud en el paraje Tabernuy para condiciones estáticas y pseudoestáticas. Dicho análisis ha permitido delimitar cinco tipos de suelos con capacidad de carga muy baja a media. Estos se clasifican de la siguiente manera:

- Suelos limosos
- Arena arcillosa
- Arena limo arcillosa
- Limos
- Arcillas inorgánicas

Para condiciones estáticas, los resultados para la sección 2-2 indican que el factor de seguridad es menor a 1. Para condiciones pseudoestáticas, que considera la aceleración sísmica, el análisis indica que el talud se clasifica como inestable.

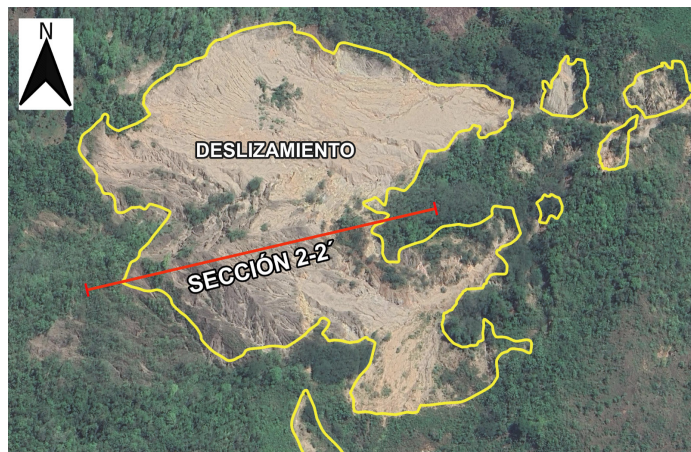


Figura 40. Deslizamiento en el paraje Tabernuy. Se presenta la sección 2-2 para la evaluación de la estabilidad del talud.

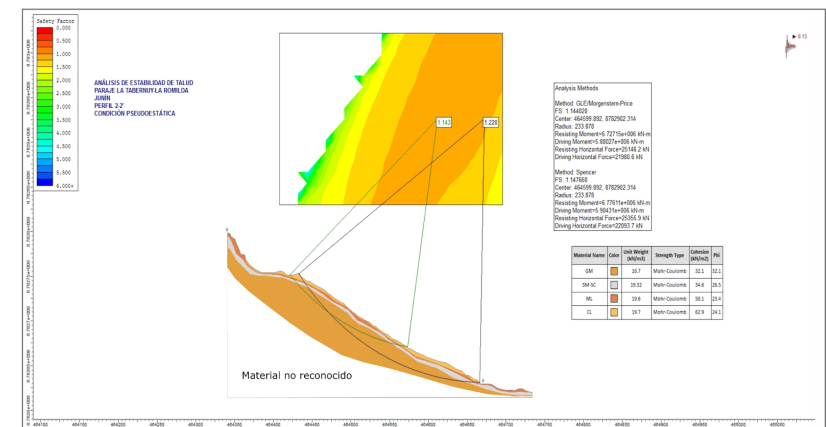
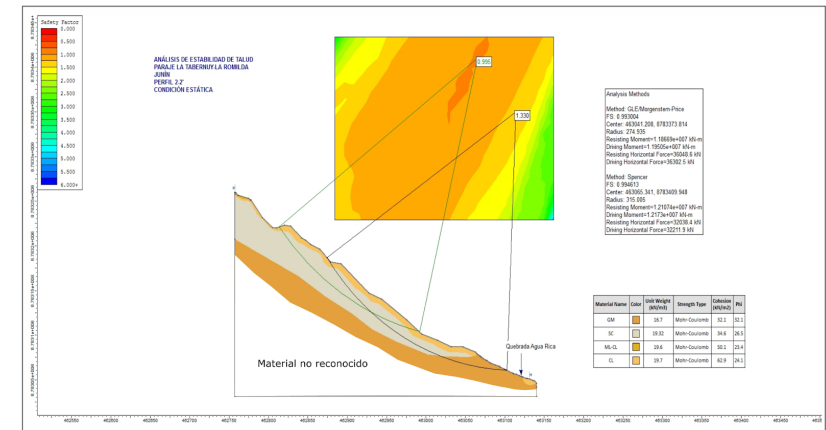


Figura 41. Análisis de estabilidad de talud en el paraje Tabernuy.

5.4 Escenario futuro del deslizamiento: desarrollo de un modelo geodinámico-geotécnico

El modelado geodinámico-geotécnico en el paraje Tabernuy resalta los tipos de suelos sobre los cuales se produce el deslizamiento. Estos están conformados por gravas, arenas y, en mayor proporción, por sedimentos finos como limos y arcillas. El escarpe principal se delimita de color morado e indica la tendencia del deslizamiento a favor de la pendiente y en dirección norte.

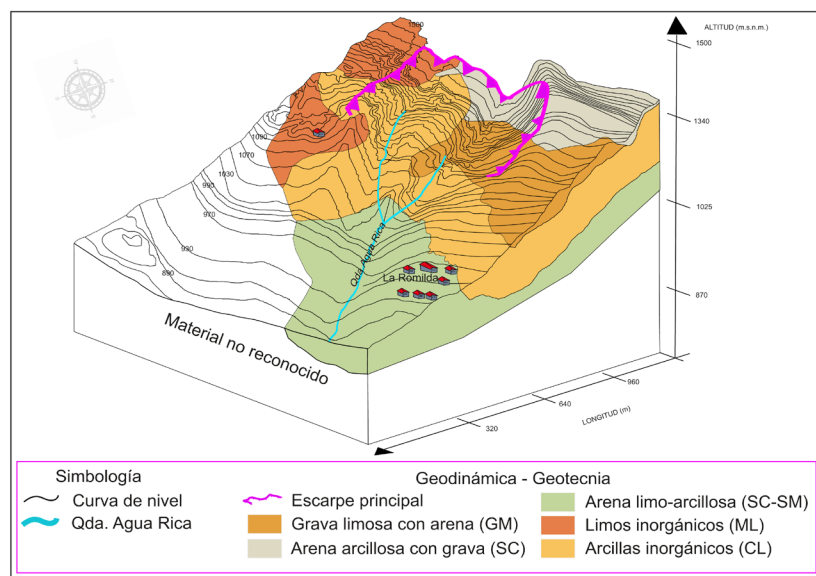


Figura 42. Modelo geodinámico-geotécnico del deslizamiento en el paraje Tabernuy.

6. LOGROS DEL PROYECTO: ESTE ES NUESTRO APORTE PARA EL PAÍS

- Se desarrolló un prototipo de un radar terrestre (GB-SAR) para el monitoreo de deslizamientos de tierra.
- Se realizó la instalación de dos radares GB-SAR en las localidades de Cuenca (Huancavelica) y paraje Tabernuy (Junín) para el monitoreo de deslizamientos.
- El monitoreo del desplazamiento con el radar GB-SAR permitió identificar áreas sobre el deslizamiento con desplazamientos de hasta 17 cm.
- El modelo geodinámico-geotécnico permitió comprender las condiciones físicas de las zonas de estudio e identificar los principales problemas geotécnicos (suelos sobre los cuales se producen los deslizamientos), con la finalidad de establecer el comportamiento del terreno y las probables zonas de reactivación.
- Se establecieron puntos de control geodésicos y se realizaron mediciones GPS en los deslizamientos de Cuenca y el paraje Tabernuy. En ambos lugares se cuantifican desplazamientos de hasta 3 cm en dirección de la pendiente.

- Se realizaron trabajos de aerofotogrametría que permitieron obtener modelos digitales de elevación del terreno y ortofotos.
- Se logró elaborar dos tesis de posgrado (UNMSM y PUCP) y una tesis de grado (UNP) que abordan la problemática del proyecto.
- Se ha logrado obtener la viabilidad de patente del GB-SAR.

AGRADECIMIENTOS

A ProCiencia-CONCYTEC por financiar el presente proyecto de investigación (convenio 048-2021), el cual ha permitido contribuir con el desarrollo tecnológico y la generación de conocimiento técnico-científico sobre el peligro de deslizamientos de tierra para la toma de decisiones en el ámbito de la Gestión del Riesgo de Desastres.

A las poblaciones de Cuenca y Tabernuy por todo el apoyo brindado durante la realización de los trabajos de campo.

INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ (IGP)

«Ciencia para protegernos,
ciencia para avanzar»



Calle Badajoz 169
Urb. Mayorazgo IV Etapa
Ate, Lima, Perú
Central Telefónica: (511) 317 2300

 <http://www.gob.pe/igp>

 @igp.peru

 @igp_peru

 @igp.peru

 @IGP_videos

 @institutogeofisicodelperu

 @igp.peru