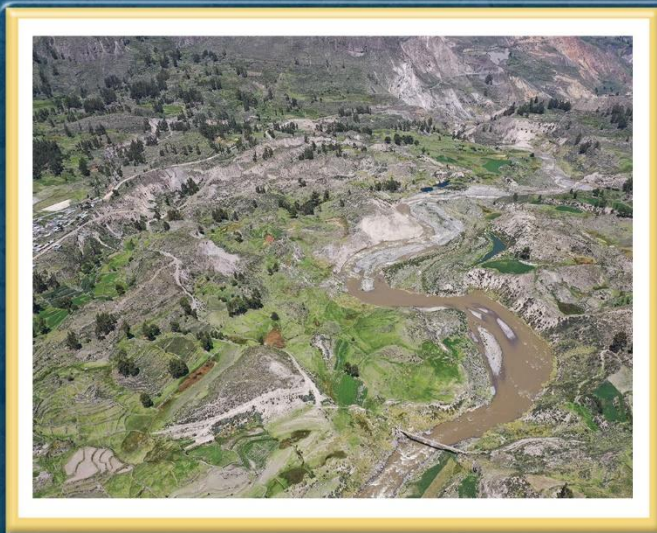


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7441

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE MACA PERIODO 2022

Departamento Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Maca



OCTUBRE
2023

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE MACA PERIODO 2022

Distrito Maca, provincia Caylloma, departamento Arequipa

Elaborado por la Dirección de Geología
Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET

Equipo de investigación:

Luis Albinez

Angella Zegarra

Joseph Huanca

Fredy Perez

Dulio Gómez

Referencias Bibliográficas:

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2023). *Monitoreo del deslizamiento de Maca Periodo 2022. Distrito Maca, provincia Caylloma, departamento Arequipa*. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7441, 37 p.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	4
1.1 Aspectos generales	4
1.1.1 ANTECEDENTES	4
1.1.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD	5
1.1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO, SÍSMICO Y GEOMORFOLÓGICO	6
1.1.4 MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS	12
1.1.5 PRECIPITACIONES	16
2 MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE MACA	19
2.1 Toma y procesamiento de datos	19
2.1.2 GEODESIA	19
2.1.3 FOTOINTERPRETACIÓN	26
2.1.3 COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (DEM)	27
2.1.4 COMPARACIÓN DE PERFILES TOPOGRÁFICOS	30
2.2 Interpretaciones	31
2.2.1 DESPLAZAMIENTOS DEL CUERPO	31
2.2.1 AVANCE DE LA CORONA	32
2.2.3 AVANCE DEL PIE	32
3. CONCLUSIONES	34
4. RECOMENDACIONES	35
5. BIBLIOGRAFÍA	36

1 INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de Maca amenaza la seguridad física del distrito del mismo nombre, con una población de alrededor de 700 habitantes (INEI 2017). El avance del deslizamiento también compromete andenes pre-incaicos (Fidel y Zavala, 1994), e infraestructura vial vital para la población local y para el desarrollo del turismo en el valle del Colca, que en el año 2019 contó con la visita de ~254 000 turistas (Figueroa, 2019).

La cinemática del deslizamiento de Maca es impulsada principalmente por las precipitaciones pluviales intensas y/o prolongadas, (Zerathe et al., 2016); así como la erosión del río. Así mismo, es continuamente reactivado por sismos intraplaca correspondientes al sistema de fallas geológicas activas en la zona, siendo los de mayor magnitud los ocurridos en los años 1991, 2001 y 2013 (Antayhua et al., 2002, Gomez et al., 2002, Zavala et al., 2013) y en los últimos años por los sismos ocurridos el 2016, 2021 y 2022.

Por esa razón, el INGEMMET, como ente técnico-científico, en colaboración con el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD), vienen realizando el monitoreo de este deslizamiento.

Este estudio tiene por finalidad dar a conocer el estado de la actividad del deslizamiento de Maca a través de la información proveniente del monitoreo realizado durante el año 2022.

1.1 Aspectos generales

1.1.1 ANTECEDENTES

Sobre monitoreo el monitoreo del deslizamiento de Maca y publicaciones realizadas por el INGEMMET se pueden citar:

- a) En el 2013, Zavala et al., publicaron el resumen “Evaluación y Monitoreo de Peligros Geológicos en el Distrito de Maca (Caylloma, Arequipa)” para el Foro Internacional de Peligros Geológicos; describe generalmente los estudios geológicos, geofísicos e hidrogeológicos, la evaluación y zonificación de los peligros geológicos y el monitoreo instrumental que el INGEMMET venía realizando en Maca.
- b) Para el año 2016, Valderrama P. & Araujo G. realizaron el informe técnico “N°A6736: Peligros geológicos en Maca”, a solicitud del Gobierno Regional de Arequipa mediante Oficio N° 097-2016-GRA/ORDNDC al INGEMMET; el trabajo describe la situación del deslizamiento y poblado de Maca, alcances sobre la geodinámica e influencia, mapas de peligrosidad a movimientos en masa, ante sismos y peligros múltiples.
- c) Para enero del 2017, Taipe et al., realizaron el informe técnico “N°A6741: Monitoreo geodésico y estudio geodinámico del deslizamiento de Maca” continuando los trabajos de monitoreo del deslizamiento de Maca realizados por el INGEMMET; el estudio tuvo la finalidad de dar a conocer los resultados del monitoreo geodésico, con Lidar y teledetección, del año 2016.
- d) En abril de 2020 se emitió el informe técnico N° A7039: Evaluación de peligros geológicos en la carretera Maca-Cabanaconde, afectada por el deslizamiento ocurrido el 22 de marzo. A solicitud de la Municipalidad de Caylloma mediante Oficio N° 049-2020-MPC-CHIVAY-A. Este informe recomienda un nuevo trazo de la vía Maca – Cabanaconde, además incluye información de la deformación del deslizamiento en el período 2019-2020,

utilizando datos de la red de monitoreo geodésico GNSS permanente. También se realizó el análisis de la influencia de la precipitación con datos disponibles del 2018-2019 y la tasa de sismicidad en relación al aumento del desplazamiento.

- e) Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Monitoreo del deslizamiento de Maca, periodo 2021, distrito Maca, provincia Caylloma, departamento Arequipa. Lima: Ingemmet, Informe Técnico N°A7262, 33 p. El estudio presenta el estado de actividad del deslizamiento mediante información de monitoreo geodésico durante 4 campañas de medición realizadas en el año 2021.

1.1.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

El deslizamiento de Maca se encuentra en la margen izquierda del río Colca, a una altitud de entre 3200 y 3300 msnm, en el distrito de Maca, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa (figura 1).

Tabla 1.
 Coordenadas del deslizamiento

COORDENADA CENTRAL			
UTM - WGS84 - Zona 19S		Geográficas	
Este	Norte	Latitud	Longitud
202591	8269180	15°38'17"S	71° 46'26"O

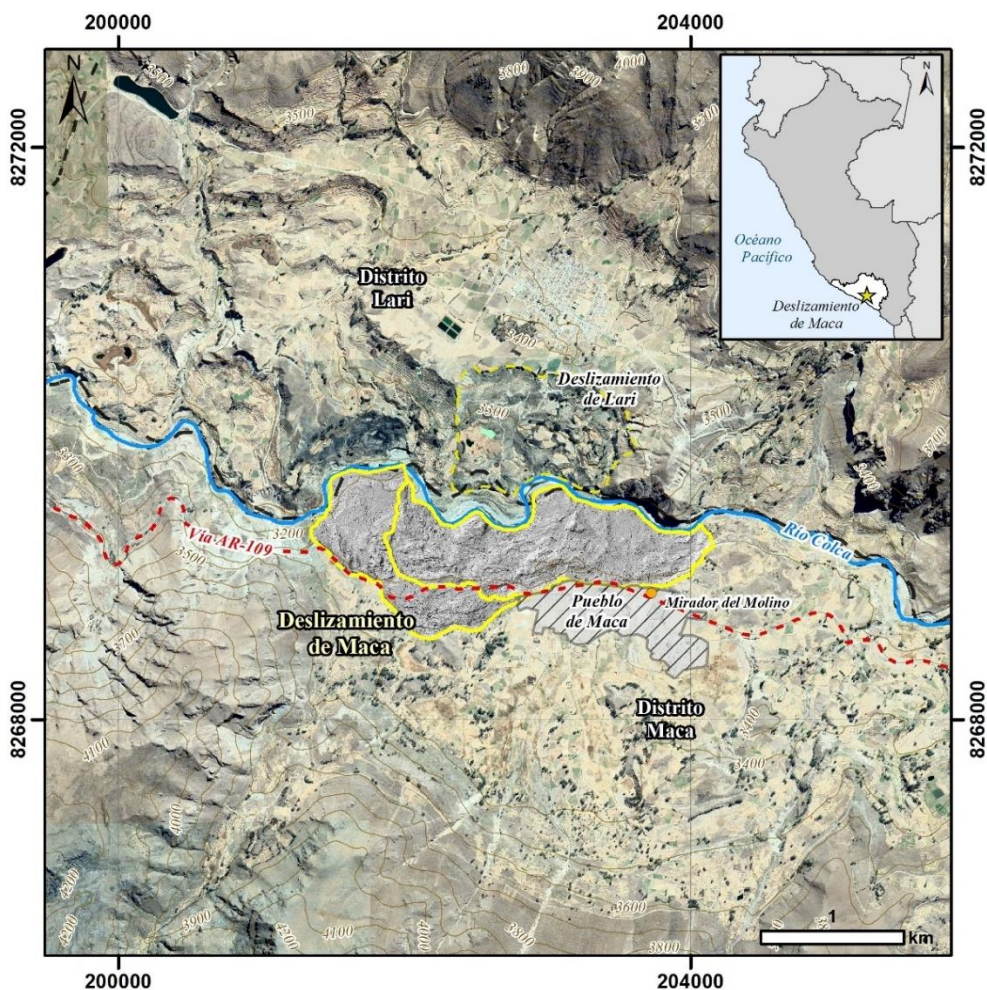


Figura 1. Mapa de ubicación del deslizamiento de Maca.

1.1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO, SÍSMICO Y GEOMORFOLÓGICO

Para este informe, se realizó un resumen general de los aspectos geológico-litológicos y geomorfológicos descritos en Zavala et al., 2013. La información neotectónica sismo-volcánica, se obtuvo de otros informes publicados para la zona.

1.1.3.1 Aspectos geológicos.

En la zona de Maca y alrededores (figura 2), afloran predominantemente rocas volcánicas del Mioceno al Pleistoceno. En el sector Peña Blanca, ubicado 2 km al oeste del poblado de Maca, se observa una secuencia ignimbrítica de color gris-blanquecino del Mioceno, de aproximadamente 200 m de espesor, correlacionadas con rocas del Gpo. Tacaza cuya composición varía de dacítica a riolítica. Geotécnicamente son de regulares a buenas, al estar medianamente soldadas y fracturadas.

Al suroeste de Maca, provenientes del estratovolcán Hualca Hualca, se observan flujos de lava andesítica dispuestos en forma sub-horizontal, emplazados durante el Plio-Pleistoceno. La secuencia posee más de 1000 m de espesor y se correlaciona con el Gpo. Barroso. Presenta buen comportamiento geotécnico con escasas ocurrencias de movimientos en masa, limitadas a caídas de roca provenientes de afloramientos de fuerte pendiente.

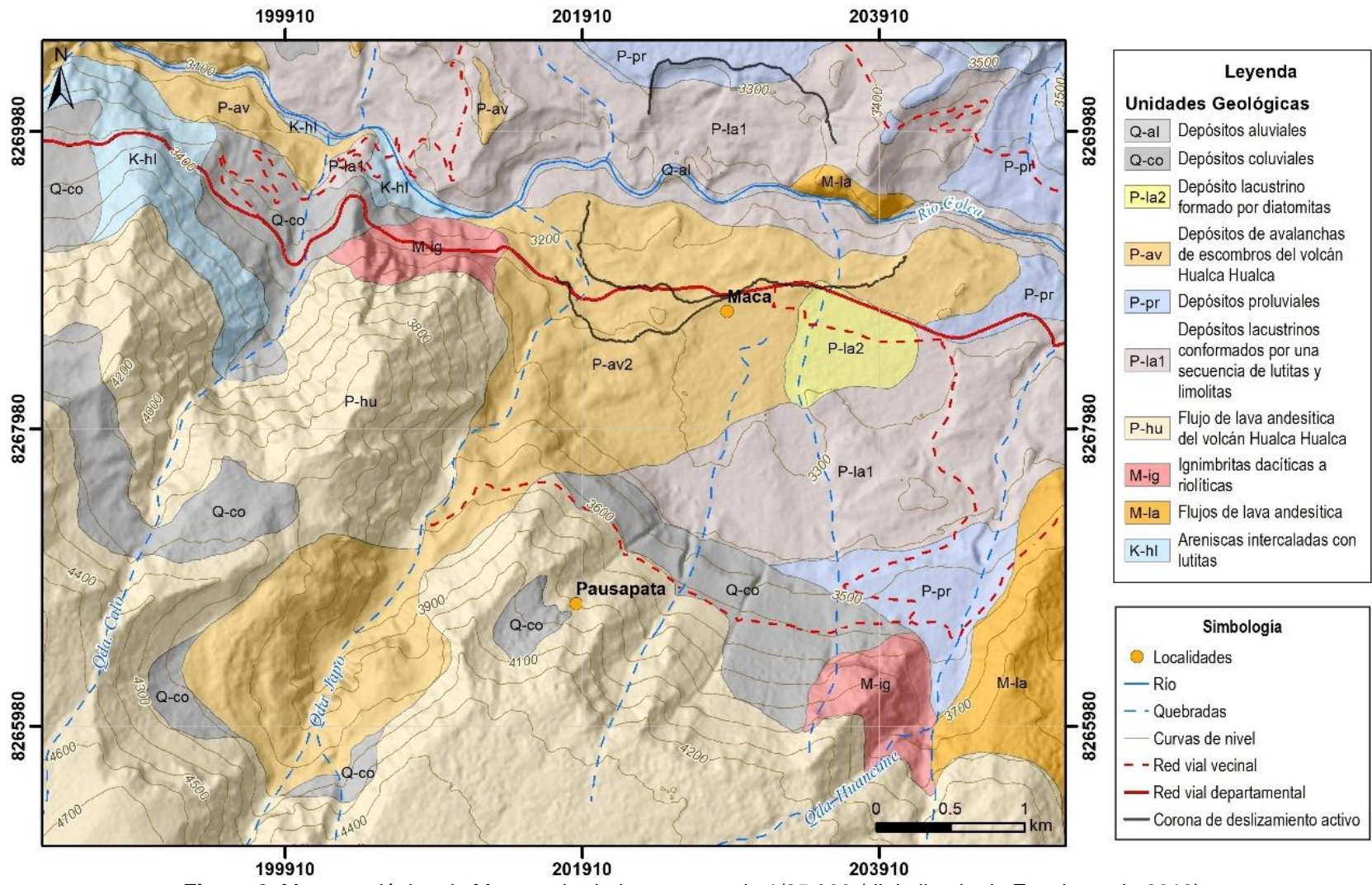


Figura 2. Mapa geológico de Maca y alrededores, a escala 1/25,000 (digitalizado de Zavala et al., 2013).

El valle del río Colca fue modelado por acción glaciaria, volcánica y tectónica, creando una cuenca elongada y dos paleolagos registrados en su estratigrafía. Se identificaron 5 secuencias estratigráficas de las cuales la primera, segunda y cuarta se observan en la localidad de Maca e inmediaciones. La primera secuencia aflora en el tramo Chivay-Yanque-Maca y corresponde a sedimentación lacustre profunda compuesta por limoarcillitas, areniscas de grano fino, microconglomerados, areniscas de grano grueso y niveles de sismitas. La segunda se encuentra en Ichupampa y Maca y corresponde a una transición entre depósitos finos de lago y aluviales provenientes de las márgenes de la cuenca. Está constituida por intercalaciones de limoarcillitas y areniscas con laminación paralela y presenta mayor cantidad de niveles de deformación cosísmica. La cuarta secuencia aflora en Lari y Maca y representa sedimentación lacustre, compuesta por intercalaciones de limoarcillitas con niveles delgados de areniscas finas, cenizas volcánicas, microconglomerados, conglomerados polimicticos, limoarcillitas y areniscas, estas últimas, afectadas por pliegues y fallas al tope de la secuencia. Desde un punto de vista geotécnico, los depósitos lacustrinos son de mala calidad en cuanto a cimentaciones y laderas debido a su fragilidad y fracturación, lo que resulta en una mayor incidencia de movimientos en masa en estos afloramientos.

Provenientes de la quebrada Japo, al oeste y norte del poblado de Maca, afloran depósitos de avalancha de rocas, de entre 30 y 100 m de espesor, que sobreyacen a secuencias lacustrinas conformadas por lutitas y limoarcillitas. Están conformados por fragmentos de litología heterogénea y heterométrica con facies principalmente de bloques, y de forma muy restringida, de matriz. En conjunto tienen comportamiento de depósitos no consolidados, friables, de malas características geotécnicas que se ven reflejadas en las ocurrencias de movimientos en masa al oeste de Maca.

Al sureste del Pueblo de Maca afloran depósitos de diatomitas de algunos metros de espesor, característicos de ambientes someros muy tranquilos, pero con sedimentos provenientes de actividad volcánica explosiva importante que proveían la sílice necesaria para la proliferación de diatomeas. El paleolago donde se generaron estas diatomitas habría sido originado por el emplazamiento de la avalancha proveniente de la quebrada Japo y consecuente embalse de aguas que discurrían de sur a norte, hacia el río Colca. Geotécnicamente son depósitos pésimos para cimentación y en laderas debido a que son muy porosos, de baja densidad, friables, frágiles y poseen alta capacidad de absorber líquidos.

Se pueden observar depósitos coluviales originados en las laderas del flanco norte del volcán Hualca Hualca, conformados por clastos angulosos de lava andesítica, centimétricos, decimétricos y algunos de hasta 1 metro de diámetro, englobados en una matriz de grava, arena y limo. Geotécnicamente tienen características relativamente malas debido a que son depósitos inconsolidados, de granulometría heterométrica y se hallan en laderas con fuerte pendiente.

Los depósitos aluviales se encuentran en ambas márgenes del río Colca en forma de pequeñas terrazas, litológicamente conformadas por niveles de arenas, gravas y bloques lávicos redondeados, subredondeados y subangulosos. En sectores se observan los depósitos interestratificados con lahares o depósitos pluviales. Las terrazas bajas son zonas vulnerables ante inundaciones, flujos de lodo y erosión.

1.1.3.2 Contexto tectónico-volcánico y actividad sísmica

En el valle del Colca, existe un sistema de fallas que presentan una intensa actividad sísmica superficial (Benavente et al, 2017; Sebrier et al., 1988; Mering et al., 1996 y Huamán-Rodrigo et al., 1993). Estas fallas geológicas activas, junto con la actividad volcánica, constituyen las principales fuentes sísmicas en el área de estudio,

tal como se puede observar en la distribución espacial de los epicentros registrados en el Valle del Colca por el Observatorio Vulcanológico del INGEMMET (OVI) entre enero y diciembre de 2022 (figura 3).

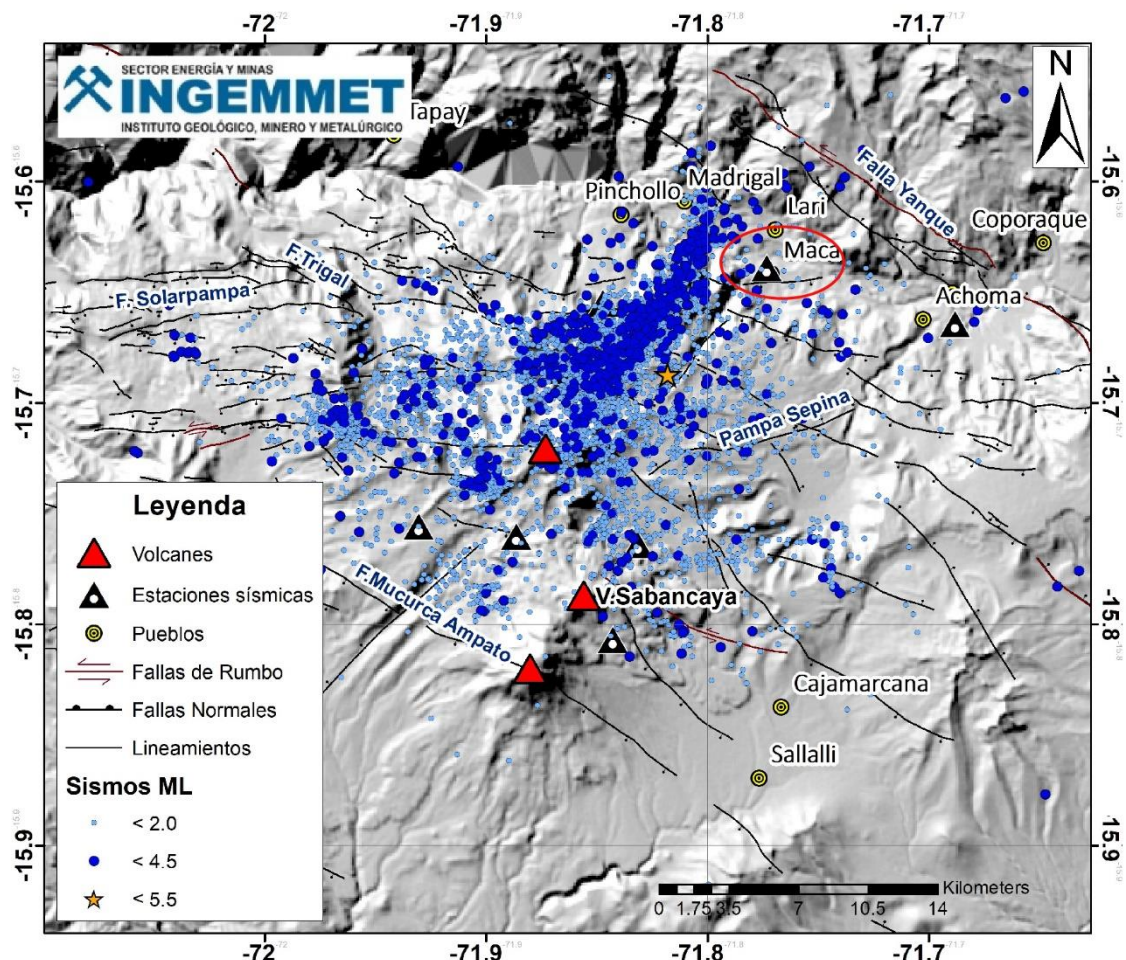


Figura 3. Sismicidad volcánico-tectónica (de enero a diciembre de 2022) y distribución de fallas activas en el área de estudio. Fuente: OVI, 2023. El círculo rojo encierra la ubicación estimada de la localidad y deslizamiento de Maca.

Un ejemplo de desastre consecuente de dicha actividad, es el sismo superficial ocurrido en el Colca, el 14 de agosto de 2016, con una magnitud de 5.3 ML, como consecuencia de la reactivación de la Falla Yanque. Este evento originó importantes efectos cosísmicos, tales como desprendimientos de rocas, derrumbes, deslizamientos, grietas en el terreno y otros; los cuales afectaron las localidades de Ichupampa, Yanque y Achoma (Delgado et al., 2016). Otro sismo reciente ocurrió el 8 de octubre del 2021, con magnitud 5.5 Mw, a 10 km de profundidad, con epicentro a 8 km al SO de Pinchollo (INDECI, IGP). Este sismo generó derrumbes en laderas y taludes de Maca a Cabanaconde. No se observaron efectos superficiales en el cuerpo del deslizamiento de Maca, ni la aparición de nuevas grietas, sin embargo, las estaciones geodésicas permanentes de monitoreo registraron movimientos en la masa deslizada (INGEMMET, 2022).

Recientemente, el 16 de marzo del 2022, ocurrió un sismo de 5.5 Mw, a 12 Km de profundidad, con epicentro a 6 km (IGP), al sur del distrito de Maca. Este sismo se generó por la reactivación de la Falla activa Pungo-Hornillos (figura 4) y desencadenó derrumbes en laderas y taludes colindantes a la carretera Maca - Cabanaconde, grietas a la entrada y salida de la carretera, daños severos e incluso el colapso de las viviendas

construidas con adobe, piedra y barro de la localidad de Maca, que fue la más afectada (INGEMMET, 2022). Este sismo también ocasionó desplazamientos en el deslizamiento de Maca, los cuales fueron registrados por las estaciones de monitoreo permanente. La descripción de estos desplazamientos se presentará más adelante.

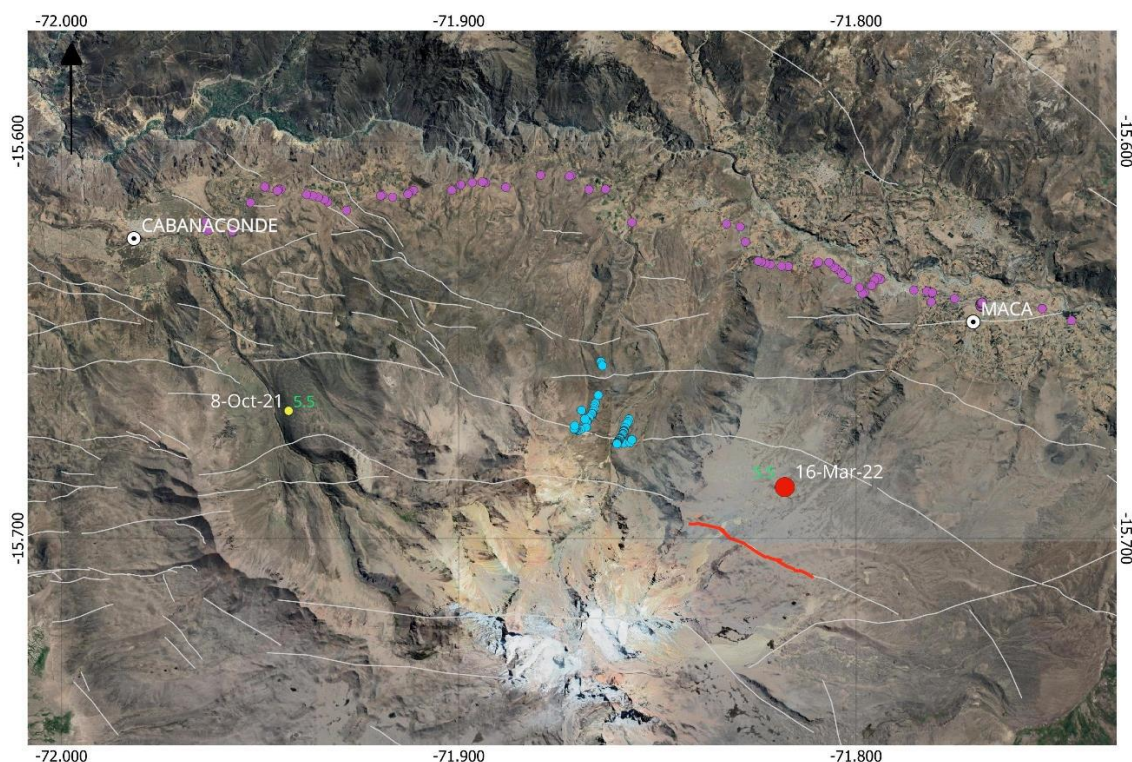


Figura 4. Imagen satelital con los efectos co-sísmicos identificados en campo luego del sismo de 5.5 Mw del 16 de marzo con epicentro al suroeste de Maca (círculo rojo). La línea roja representa la longitud de ruptura de la falla Pungo-Hornillo, las líneas blancas los trazos de fallas activas y los puntos lila indican la ocurrencia de movimientos en masa. Además, se identificaron 'jumping stones' en puntos de color celeste. Tomado de INGEMMET 2022.

En relación a la licuefacción de suelos, la composición litológica de origen lacustre del subsuelo de Maca condiciona efectos de sitio durante la ocurrencia de sismos, como ya ha sido comprobado en los eventos de 1991 y 2013 (Zavala et al., 2013).

1.1.3.3 Aspectos geomorfológicos (Zavala et al., 2013)

A una escala de detalle (figura 5), el poblado de Maca y alrededores se encuentran sobre una amplia vertiente aluvio-lacustre, modificada por procesos erosivos y deslizamientos posteriores a su formación. Se infieren escarpas de un deslizamiento antiguo mayor, cuya topografía semicircular y cóncava (escarpas suavizadas por la erosión) vista desde arriba, sugiere esa interpretación. La escarpa mayor se encuentra en el límite superior con depósitos de piedemonte coluvio-deluvial y flujos de detritos.

En Maca, se observan escarpas más frescas, con grandes saltos de terreno, escalonadas y con avance diferencial, generalmente, en dirección norte. También son frecuentes encontrar algunos basculamientos y movimientos de bloques en dirección opuesta al valle. El lado oeste de Maca y su parte inferior afectada por el deslizamiento activo, corresponde a un depósito de avalancha de rocas que descendió por la quebrada Japo sobre los depósitos aluvio-lacustres.

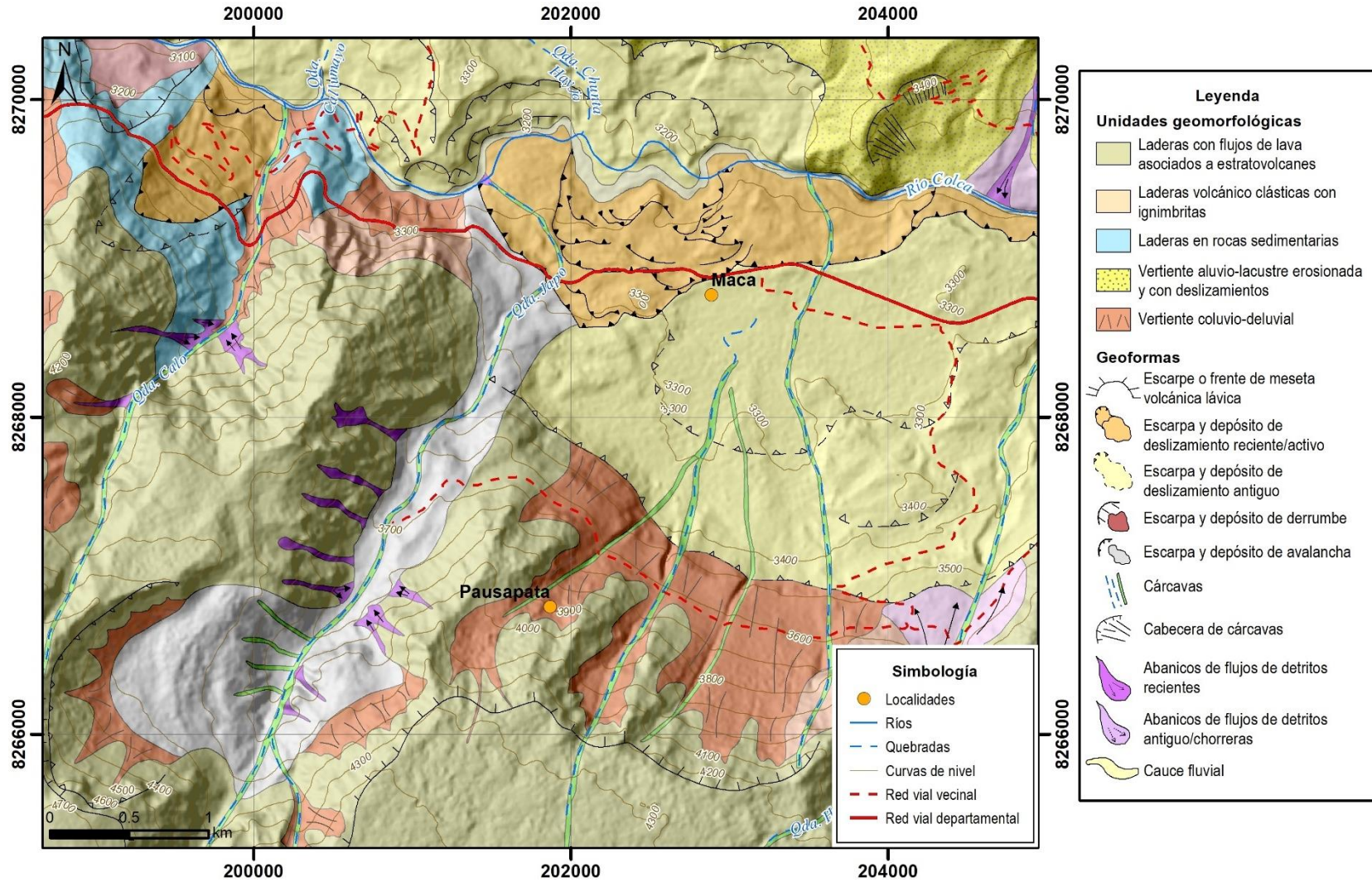


Figura 5. Mapa de unidades geomorfológicas y procesos activos en Maca y alrededores (digitalizado de Zavala et al., 2013).

Las vertientes colindantes superiores corresponden a laderas de flujos de lava asociadas al volcán Hualca Hualca, grandemente extendidas, así como pequeños sectores de laderas en rocas sedimentarias (areniscas y lutitas) y volcanoclásticas (ignimbritas), en el lado oeste.

Al norte del poblado de Maca se encuentra el cauce fluvial del río Colca, el cual muestra varios recodos, producidos por los deslizamientos que han modificado la dirección principal longitudinal de su cauce.

También se aprecian procesos de erosión en cárcavas que, con lluvias estacionales, originan pequeños flujos o chorreras. Algunos eventos excepcionales pasados han originado abanicos de flujos de detritos o huaicos de mayor dimensión.

1.1.4 MOVIMIENTOS EN MASA Y OTROS PELIGROS

1.1.4.1 Deslizamiento de Maca

Es un movimiento en masa de tipo deslizamiento rotacional con avance retrogresivo y progresivo, cuya inestabilidad tiene relación con la incompetencia del material afectado: depósitos lacustres (lodolitas, arenas, arcillitas blandas, medianamente blandas a densas), alternados con depósitos proluviales (gravas, cantos y bloques, en matriz areno arcillosa, medianamente consolidados); y con napa freática superficial (oconales y filtraciones). Muestra un proceso de remoción complejo, con escarpes rectos a irregulares, desplazamientos verticales importantes y empuje del material hacia el río, con movimientos NNO. El avance retrogresivo ha dejado una gran masa alterada y movida; con numerosas superficies de deslizamiento (Zavala et al., 2013). Las escarpas principales corresponden a aquellas que coronan el deslizamiento y muestran saltos mayores a 2 metros de altura. Las escarpas secundarias son zonas de deformación dentro de la masa del deslizamiento, están asociadas a saltos que varían entre 1 a 2 metros y zonas de compresión y extensión; en algunos casos se muestra un “basculamiento” o inclinación de las escarpas en sentido opuesto a la dirección del movimiento, típico de un deslizamiento de tipo rotacional (Valderrama & Araujo, 2016).

Por otro lado, Zerathe et al., 2016, ha identificado tres tipos de movimientos (hundimiento, traslación y rotación), concluyendo predominio de traslación. En su descripción morfométrica menciona que todo el deslizamiento de Maca afecta un área aproximada de 1,7 km², con un ancho de ~2,7 km y una longitud de ~1 km entre la escarpa principal y la punta. Hacia el sur, está delimitado por una escarpa superior (figura 6 D) larga, continua y casi vertical de más de 3,5 km de longitud, de 15 a 20 m de altura y forma semielíptica orientada globalmente de E a O, con varias ondulaciones leves. En la parte central del deslizamiento, está presente otra escarpa de 1,5 km de largo que conecta la escarpa principal en el extremo NO del pueblo de Maca. Se caracteriza por un desplazamiento más fuerte (20-25 m) y cruza la carretera en varios tramos (figura 6 A). Aparentemente corresponde al escarpe primitivo del deslizamiento de Maca, en una etapa anterior de su evolución.

Numerosos escarpes secundarios y varios contraescarpes también afectan el deslizamiento, los cuales, diseccionan el cuerpo en varios bloques generando estructuras de horst y graben (figura 6 B), lo cual se observa en un extenso sistema justo debajo de la escarpa superior donde se han desarrollado largas contraescarpas de preferente buzamiento sur, acomodando subsidencia en un área de aproximadamente 700 m de largo y 100 m de ancho, este comportamiento también se observa localmente en otros sectores. Este mecanismo es consistente con el lecho

horizontal preservado que generalmente se observa en toda el área del deslizamiento. Localmente, sin embargo, las capas se inclinan (figura 6 C) ligeramente hacia el sur (Zerathe et al., 2016).

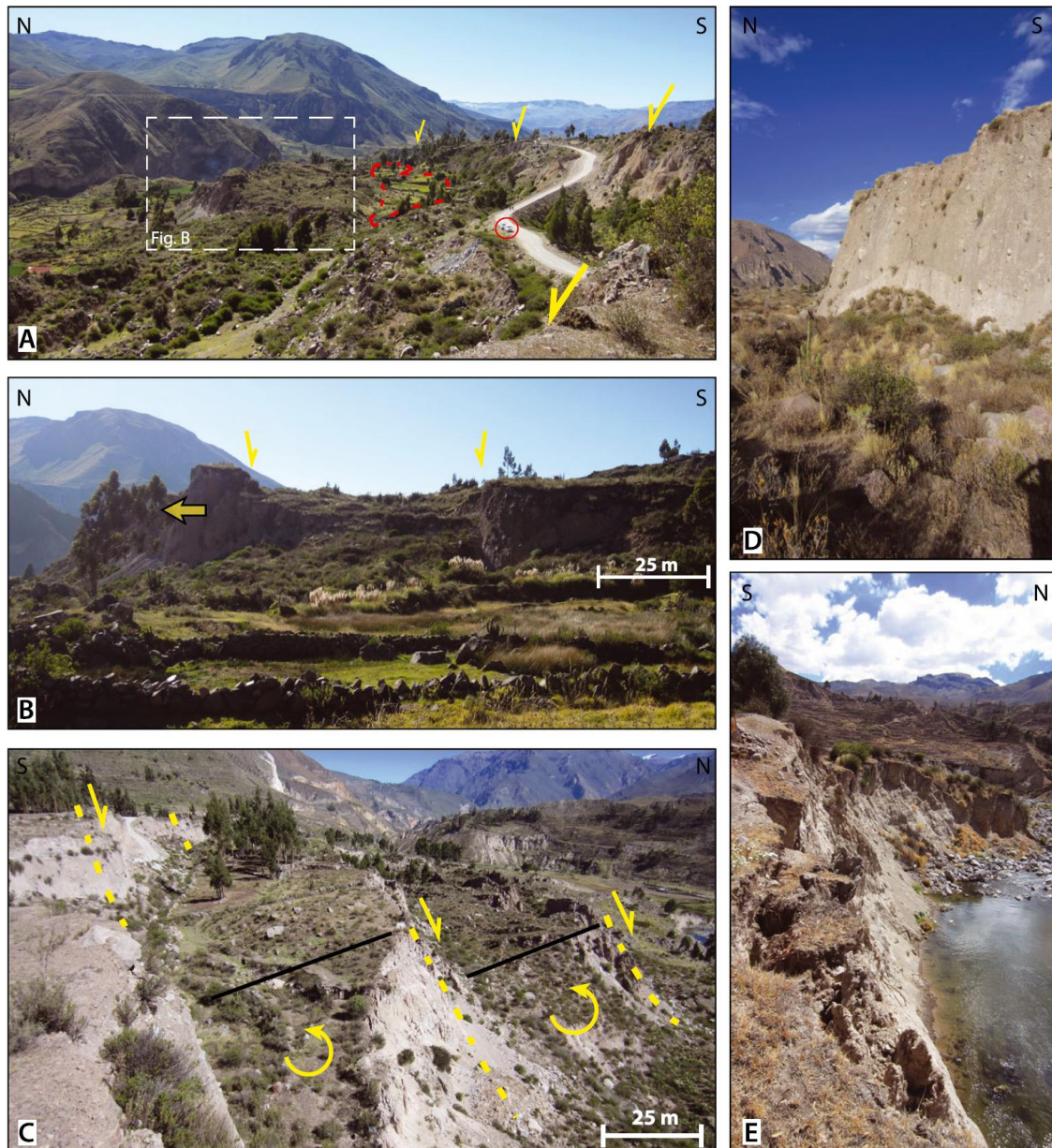


Figura 6. (A) Vista mirando hacia el este: la escarpa principal secundaria representada por flechas amarillas, cruza la carretera principal del valle. Una gran depresión cubierta de hierba debido a la expansión lateral puede observarse al pie de la escarpa del fondo (línea roja discontinua). Dos camionetas están encerradas en un círculo rojo para proporcionar la escala. (B) Vista mirando hacia el este. Estructura similar a 'horst y graben'. El bloque del norte se extiende progresivamente mientras la parte central se hunde. (C) Vista mirando hacia el oeste. El lado occidental del deslizamiento está dominado por una ligera deformación rotacional y regresiva. Son visibles dos compartimentos principales individualizados por abruptos escarpes. (D) Morfología típica del escarpe principal del deslizamiento de Maca de alrededor de 17 m de altura en la zona. Observe la inclinación de la escarpa (70°-80°), así como una banda fresca ondulante de 2 m de altura visible en su parte inferior que expone exhumación reciente. (E) Efecto erosivo del río Colca al pie del deslizamiento de Maca. Tomado de Zerathe et al., 2016.

Al menos dos planos de falla circulares retrogresivos e imbricados afectan la topografía empinada local creada por el escarpe principal, incluyendo una ligera rotación

hacia atrás (figura 6 C) de 5° a 10° de dos bloques. Esta deformación retrogresiva se desarrolla hacia arriba, donde se exhiben numerosas grietas recientes y escarpes internos, sugiriendo alta actividad en curso. Asimismo, en todo el deslizamiento aparecen estanques de agua temporales en las depresiones creadas por la deformación gravitatoria (Zerathe et al., 2016).

El agua subterránea se ha identificado como el principal agente desestabilizador tal como se puede observar en las filtraciones y oconales en el cuerpo del deslizamiento, entre escarpa y escarpa. La masa movida y alterada, facilita la infiltración de las aguas de precipitaciones y/o de irrigación (algunos terrenos de cultivo cercanos al deslizamiento se riegan por inundación y/o seco), provocando la pérdida de la resistencia al corte del material, que finalmente acaba deslizándose en su conjunto. La existencia de estos se confirmó con la presencia de irregularidades escalonadas observables en el área (Zavala et al., 2013).

Los movimientos del deslizamiento se han registrado con velocidades que van desde extremadamente lentos a lentos (tabla 2). Estos movimientos son detonados por sismos (frecuentes en el área), erosión fluvial (río Colca), intensas precipitaciones y riego indiscriminado. Es importante mencionar que el movimiento del deslizamiento que involucra a Maca y Campiña se registra también en el lado este de Maca, con movimientos extremadamente lentos a lentos (Zavala et al., 2013).

Tabla 2
Velocidades del deslizamiento de Maca publicadas en estudios anteriores

Referencia / método / periodo			Clasificación PMA 2007	Extremadamente lenta	Muy lenta	Lenta
				<16 mm/año	16 mm/año - 1,6 m/año	1,6 m/año - 13 m/mes
Zavala et al., 2013	GPS	2001 - 2012		~0.1 - 0.2 cm/año (mín./H)		~12.5 m (acumulado) ~5 - 6 m/año (máx./H)
Zerathe et al., 2016	GPS	2001 - 2014				~15 m en 14 años (acumulado)
Zavala et al., 2012	GPS	2011 - 2012				~7 m/año (máx./H)
Lacroix et al., 2014	Correlación óptica de imágenes satelitales	11/2011 - 12/2013			~>50 cm/año (H)	
Lacroix et al., 2014	GPS	17/07/2013			~2 cm (cosísmico)	
Lacroix et al., 2022	GPS	2012 - 2021			~1 m/año	
INGEMMET, 2016	GPS	2015 - 2016		~1 cm/año (min)	~1.3 m/año (máx.)	
INGEMMET, 2017	GPS	08/2015-11/2016			~0.055 - 0.11 m/mes	
INGEMMET, 2020	GPS	06/2018 - 09/2018			~0.36 m/año (máx./H)	
		03/2019 - 06/2019			~0.19 m/año (máx./E)	~2 m/año (máx./V)
		06/2019 - 02/2020			~0.09 m/año	

INGEMMET, 2022	GPS	01/2021 - 12/2021			~7.5 m/año (máx./H) ~2.3 m/año (máx./V)
-------------------	-----	----------------------	--	--	--

1.1.4.2 Erosión fluvial

Otro efecto de la lluvia sobre los deslizamientos es aumentar la eficacia erosiva de los procesos fluviales, socavando la base del talud (Huggel et al., 2012), ya que la erosión lateral del río puede ser un impulsor clave de la actividad de deslizamientos en las laderas (Larsen y Montgomery, 2012).

Para que se produzca este fenómeno intervienen, tanto factores geológicos (morfología del cauce, dinámica del río, geodinámica externa, pendiente y ancho del cauce, tipo de drenaje, naturaleza del suelo o substrato en las márgenes, etc.), así como hidrológicos (precipitación en cuenca húmeda, caudales normales, máximos, etc.). Los procesos de erosión fluvial producen pérdidas de terrenos en las márgenes de los ríos, por medio de los derrumbes y deslizamientos, resultantes de la socavación en la base de las márgenes (Zavala et al., 2013).

Durante décadas, la erosión del río Colca en el pie del deslizamiento debido al cambio de posición del lecho del río causado por el deslizamiento de Lari en el lado opuesto del valle, parece jugar un papel clave en la cinemática del deslizamiento (figura 7). La comparación entre las fotografías de 1955 y 2013 muestra que el curso del río ha cambiado drásticamente, como resultado de la competencia entre deslizamientos opuestos. Durante este tiempo, el deslizamiento de Lari ha afectado fuertemente el lado norte del valle y ha movido el río Colca de 150 a 300 m hacia el sur. Esta modificación del curso del río es probablemente el principal factor que explica la repentina reactivación del deslizamiento de Maca en el lado sur del valle, durante la década de 1980. En contraste, el deslizamiento de Lari no presenta desplazamiento significativo en la actualidad. Por otro lado, las áreas más activas se encuentran al pie del deslizamiento a lo largo del río (figura 6 E), donde los valores de desplazamiento oscilan entre 1,5 y 5 m. En esta zona, la dirección del movimiento es perpendicular al cauce del río, destacando la acción erosiva sobre la actividad del deslizamiento (Zerathe et al., 2016).

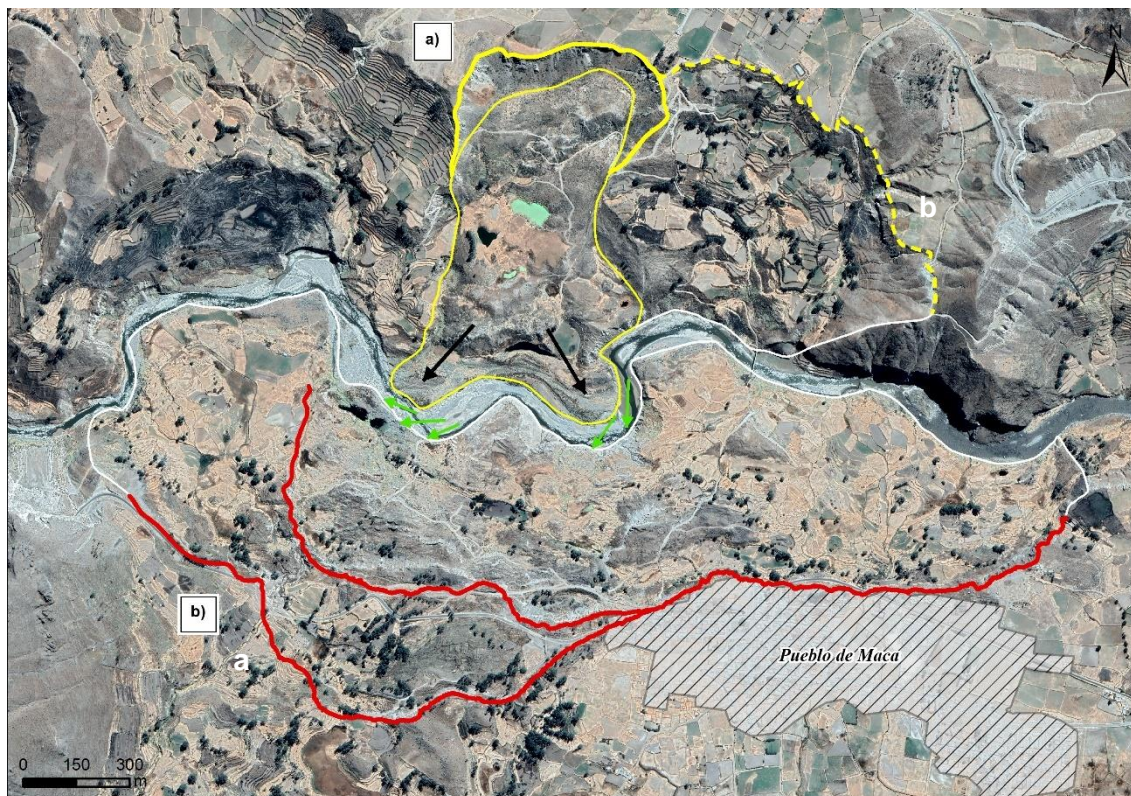


Figura 7. Erosión fluvial en la margen izquierda del río Colca, en el pie del deslizamiento de Maca. Se aprecia: a) la escarpa principal y cuerpo de la reactivación del deslizamiento de Lari (líneas amarillas) que “encajó” al río Colca hacia su margen izquierda, erosionando el pie del deslizamiento de Maca. Las flechas negras muestran la dirección del deslizamiento reactivado de Lari y las flechas en verde, zonas y dirección estimada de erosión fluvial. b) escarpes del deslizamiento de Maca (líneas rojas). Modificado de Zavala et al., 2013.

1.1.5 PRECIPITACIONES

Se trabajó con datos de precipitación de las estaciones meteorológicas Chivay y Madrigal (SENAMHI).

1.1.4.1 Precipitaciones en el valle del Colca.

En el Valle del Colca, las precipitaciones pluviales son más intensas durante la temporada de verano, particularmente entre los meses de diciembre y marzo (tabla 3 y figura 9). La temporada seca presenta periodos críticos entre los meses de mayo y agosto.

Para este informe, se utilizaron los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas convencionales de SENAMHI más cercanas al deslizamiento de Maca, las cuales se encuentran ubicadas en Madrigal y Chivay.

Tabla 3. Precipitaciones mensuales y anuales de las estaciones de Chivay y Madrigal (2019-2022). Información no disponible (S/D). Fuente: SENAMHI.

	Estación Chivay				Estación Madrigal			
	Precipitación (mm/mes)				Precipitación (mm/mes)			
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Enero	111.30	147.70	106.10	85.50	138.60	216.10	114.40	102.80
Febrero	157.00	211.20	71.60	79.00	145.90	176.90	69.10	82.00

Marzo	79.20	64.70	91.20	78.90	100.60	126.30	95.80	64.30
Abril	24.20	S/D	47.30	19.30	9.00	S/D	32.20	14.10
Mayo	5.40	S/D	2.40	0.00	0.00	S/D	5.80	0.00
Junio	0.00	S/D	0.20	0.00	0.00	S/D	0.00	0.00
Julio	3.00	S/D	0.00	0.00	2.30	S/D	0.00	0.80
Agosto	0.00	0.00	6.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Setiembre	5.40	S/D	12.70	0.00	4.20	1.20	6.60	0.00
Octubre	39.50	30.60	15.80	0.00	33.90	30.80	0.00	0.00
Noviembre	21.70	13.00	27.10	3.70	8.00	10.80	10.20	3.90
Diciembre	19.20	94.80	62.60	117.30	16.00	91.60	45.30	97.10
Total (mm/año)	465.90	562.00	443.20	383.70	458.50	653.70	379.40	365.00

En la figura 8 destaca el pico de precipitación registrado durante la temporada lluviosa 2019-2020. Las temporadas lluviosas 2020-2021 y 2021-2022 presentan menor precipitación que la anterior, mostrando, además, disminución progresiva entre sí. También se observa una constante en los picos de mayor pluviosidad en el mes de enero de cada año.

La figura 9 muestra la precipitación acumulada durante la temporada de lluvias entre octubre de 2021 y abril de 2022. Se observa que la estación de Madrigal tuvo una menor precipitación (~319 mm) en comparación con la estación de Chivay (~368 mm), con una diferencia de alrededor de 49 mm, aunque ambas estaciones presentan una tendencia de acumulación similar. Asimismo, se registraron picos de precipitación a inicios de enero y a finales de febrero, seguidos de lluvias constantes desde marzo hasta abril.

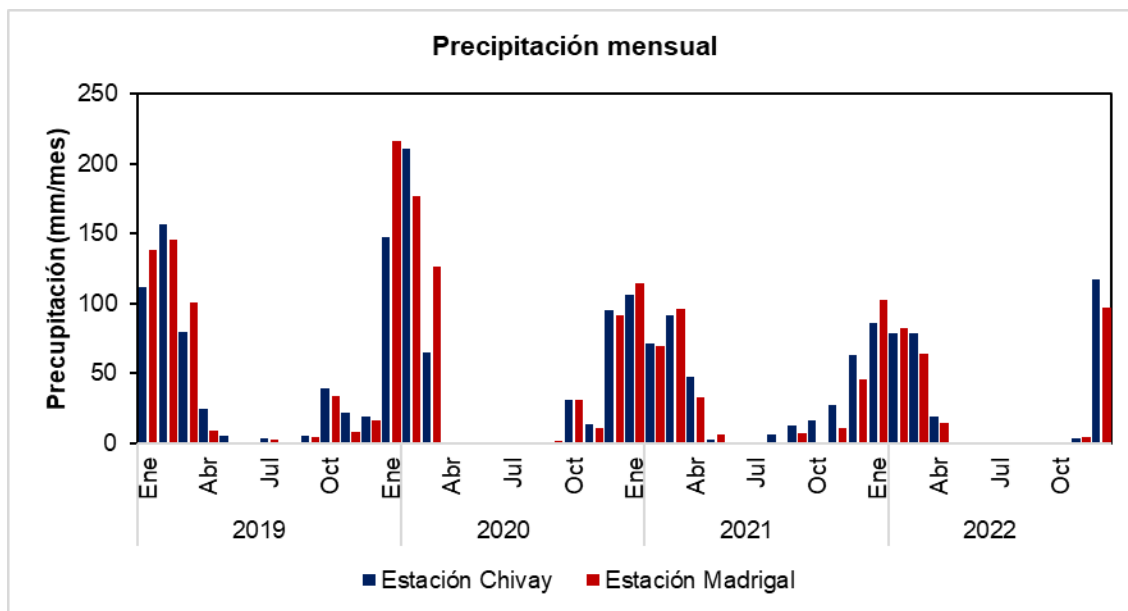


Figura 8. Precipitación mensual de las estaciones de Chivay y Madrigal (2019-2022). Fuente: SENAMHI.

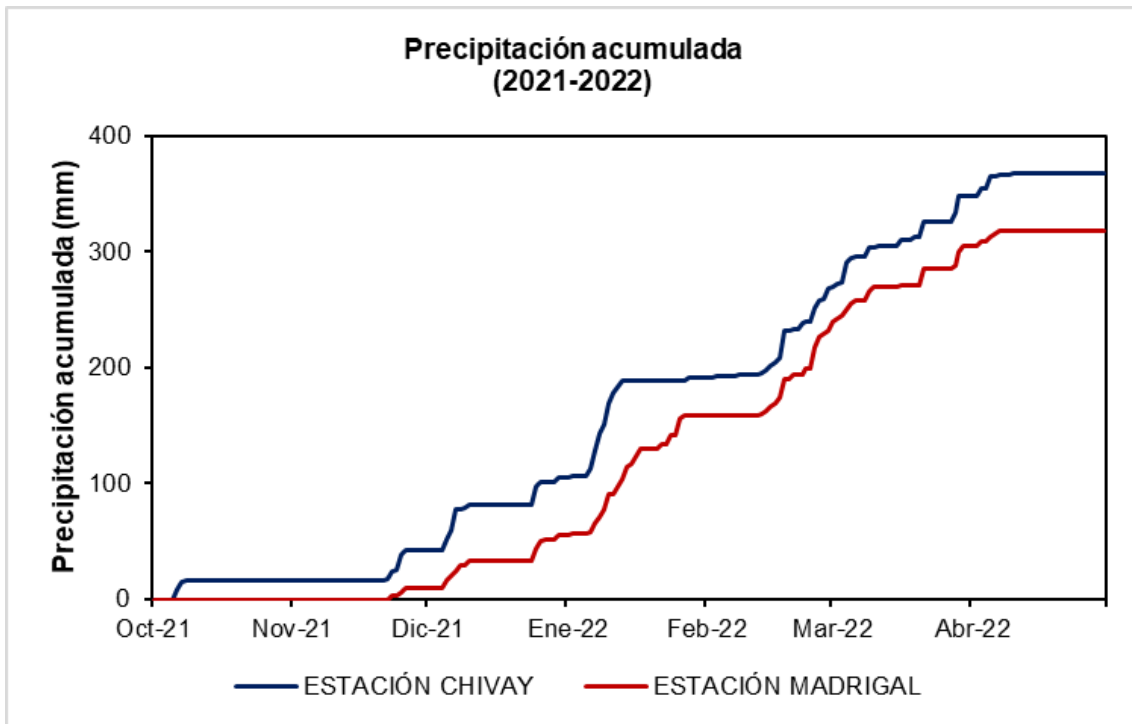


Figura 9. Precipitación acumulada de octubre 2021 a abril 2022 de las estaciones Chivay y Madrigal.

2 MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE MACA

Para este reporte se realizaron mediciones geodésicas y sobrevuelos con dron, a fin de obtener insumos mediante el procesamiento fotogramétrico. Utilizando los datos procesados, se aplicaron técnicas geodésicas, fotointerpretación, comparación de modelos digitales de elevación y perfiles topográficos para describir e interpretar la dinámica del deslizamiento de Maca.

2.1 Toma y procesamiento de datos

2.1.1 FOTOGRAMETRÍA

Los sobrevuelos con dron para la obtención de insumos de alta resolución (ortomosaicos y modelos digitales de elevación) mediante fotogrametría, se realizaron entre noviembre del 2021 y noviembre del 2022. Las fotografías se capturaron con un dron multirroto (Matrice 300 RTK).

Las fotografías aéreas capturadas con el dron se procesaron con la metodología SfM-MVS en el software Agisoft Metashape Professional 1.7.4. Luego de obtener la nube de puntos densa 3D y malla, escalada y georreferenciada, se crearon y exportaron los DEMs y los ortomosaicos. Estos productos fotogramétricos se encuentran georreferenciados en el sistema de coordenadas UTM (zona 19S), Datum WGS 1984 y en el modelo geoidal EGM08.

2.1.2 GEODESIA

Actualmente en el deslizamiento de Maca se cuenta con 18 puntos de control temporal (hitos de monitoreo) (figura 10), los cuales fueron monitoreados con un receptor GNSS diferencial de doble frecuencia (Trimble R-12), aplicando la técnica de posicionamiento RTK (cinemático en tiempo real), durante cinco campañas entre el 29 de noviembre del 2021 y el 26 de noviembre del 2022 (~1 año). Las coordenadas medidas de cada punto de control no requirieron de postproceso y presentaron precisiones por debajo del decímetro.

De igual modo, se cuenta con una red geodésica de monitoreo permanente que consta de 3 equipos GNSS CORS (estaciones de referencia de operación continua) instalados en el cuerpo y corona del deslizamiento, dentro de casetas de seguridad de concreto. El procesamiento de los datos adquiridos vía radio telemetría, se realizó usando el software GAMIT/GLOBK v 10.7, obteniéndose precisiones por debajo del centímetro.

2.1.2.1 Cuantificación de desplazamientos y cinemática

A partir de los datos de monitoreo temporal (figuras 10 y 11), se calcularon los desplazamientos horizontales y verticales de cada punto de control (tabla 4).

Durante el periodo comprendido entre el 29 de noviembre del 2021 y el 22 de febrero del 2022 (~2.8 meses) se observó mayor actividad en los puntos de control MA04 y MA05 con desplazamientos horizontales de 0.17 y 0.15 m y desplazamientos verticales de -0.05 y -0.07 m respectivamente. Los demás puntos de control no presentaron desplazamientos horizontales ni verticales significativos.

Así mismo, entre el 22 de febrero y el 04 de mayo del 2022 (~2.4 meses) se registraron movimientos en los puntos de control MA04, MA05, MA10, MA11, MA13,

MA15 y MA16, con desplazamiento horizontal y vertical máximo de 1.17 y -0.37 m respectivamente.

Entre el 04 de mayo y el 13 de agosto de 2022 (~3.4 meses) se detectaron desplazamientos horizontales en los puntos de control MA04, MA05, MA13 y MA15, cuyos valores están entre 4 y 8 cm.

En el periodo comprendido entre el 13 de agosto y el 26 de noviembre del 2022 (~3.5 meses) no se observan desplazamientos horizontales ni verticales significativos en comparación a los periodos previos.

Tabla 4. Desplazamiento de la red de puntos de control GNSS del deslizamiento de Maca entre campañas. DH = Desplazamiento Horizontal, DV = Desplazamiento vertical.

PUNTOS DE CONTROL GNSS	29/11/2021 al 22/02/2022 (~2.8 meses)		22/02/2022 al 04/05/2022 (~2.4 meses)		04/05/2022 al 13/08/2022 (~3.4 meses)		13/08/2022 al 26/11/2022 (~3.5 meses)	
	DH	DV	DH	DV	DH	DV	DH	DV
	$\Delta E-N(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta E-N(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta E-N(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta E-N(m)$	$\Delta Z(m)$
MA01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	-0.02	0.02	0.03
MA02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.01
MA03	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	-0.02	0.01	0.00
MA04	0.17	-0.05	1.17	-0.19	0.08	-0.03	0.03	0.01
MA05	0.15	-0.07	1.02	-0.37	0.05	-0.01	0.02	-0.01
MA06	0.01	0.02	0.08	-0.03	0.01	-0.02	0.02	0.00
MA07	0.01	0.04	0.00	-0.01	0.00	-0.02	0.01	0.04
MA08	0.01	0.01	0.02	-0.02	0.01	-0.01	0.02	0.01
MA10	0.00	0.00	0.33	-0.09	0.02	-0.02	0.00	0.00
MA11	0.02	-0.02	0.41	-0.19	0.00	0.00	0.03	-0.01
MA12	0.02	-0.02	0.02	0.01	0.02	-0.03	0.01	0.03
MA13	0.01	-0.01	0.33	-0.07	0.04	0.00	0.02	-0.01
MA14	0.01	0.00	0.03	-0.01	0.02	0.01	0.02	0.00
MA15	0.01	0.00	0.50	-0.06	0.04	0.01	0.02	-0.02
MA16	0.01	0.00	0.14	-0.07	0.02	-0.01	0.01	-0.01
MA17	0.01	-0.01	0.02	-0.02	0.02	0.01	0.01	-0.01
MA18	0.02	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
Máximo	0.17	-0.07	1.17	-0.37	0.08	-0.03	0.03	0.04

Los desplazamientos horizontales (E, N) y verticales (Z) totales, se calcularon a partir de la diferencia entre las coordenadas de noviembre del 2021 y las que se midieron en noviembre del 2022 (tabla 5). Para este periodo (~1 año), los puntos de control que presentaron desplazamientos significativos fueron MA04, MA05, MA10, MA11, MA13, MA15 y MA16, con un desplazamiento horizontal máximo de 1.42m y un desplazamiento vertical máximo de -0.47 m.

Tabla 5. Desplazamiento acumulado de la red de puntos de control GNSS del deslizamiento de Maca, entre noviembre de 2021 y noviembre de 2022. DH = Desplazamiento horizontal. DV = Desplazamiento Vertical.

Puntos de Control GNSS	29/11/2021 al 26/11/2022 (~1 año)	
	DH $\Delta E-N$ (m)	DV ΔV (m)
MA01	0.01	0.02
MA02	0.01	0.01
MA03	0.01	-0.01
MA04	1.42	-0.26
MA05	1.25	-0.47
MA06	0.09	-0.03
MA07	0.02	0.04
MA08	0.02	0.00
MA10	0.35	-0.11
MA11	0.42	-0.22
MA12	0.02	-0.01
MA13	0.38	-0.09
MA14	0.03	0.00
MA15	0.55	-0.07
MA16	0.17	-0.08
MA17	0.03	-0.02
MA18	0.02	0.01
Máximo	1.42	-0.47

Así mismo, se realizaron mapas de vectores de desplazamiento horizontal y vertical (figuras 10 y 11) para representar de manera gráfica, las magnitudes y las direcciones de los desplazamientos individuales de la red de puntos de control GNSS. En el mapa de vectores de desplazamiento horizontal (figura 10) se observa que la dirección de los movimientos fue hacia el noreste y noroeste en dirección al río Colca. Así mismo, el mapa de vectores de desplazamiento vertical (figura 11) muestra valores mayores en la parte central del deslizamiento (MA04, MA05, MA10 y MA11).

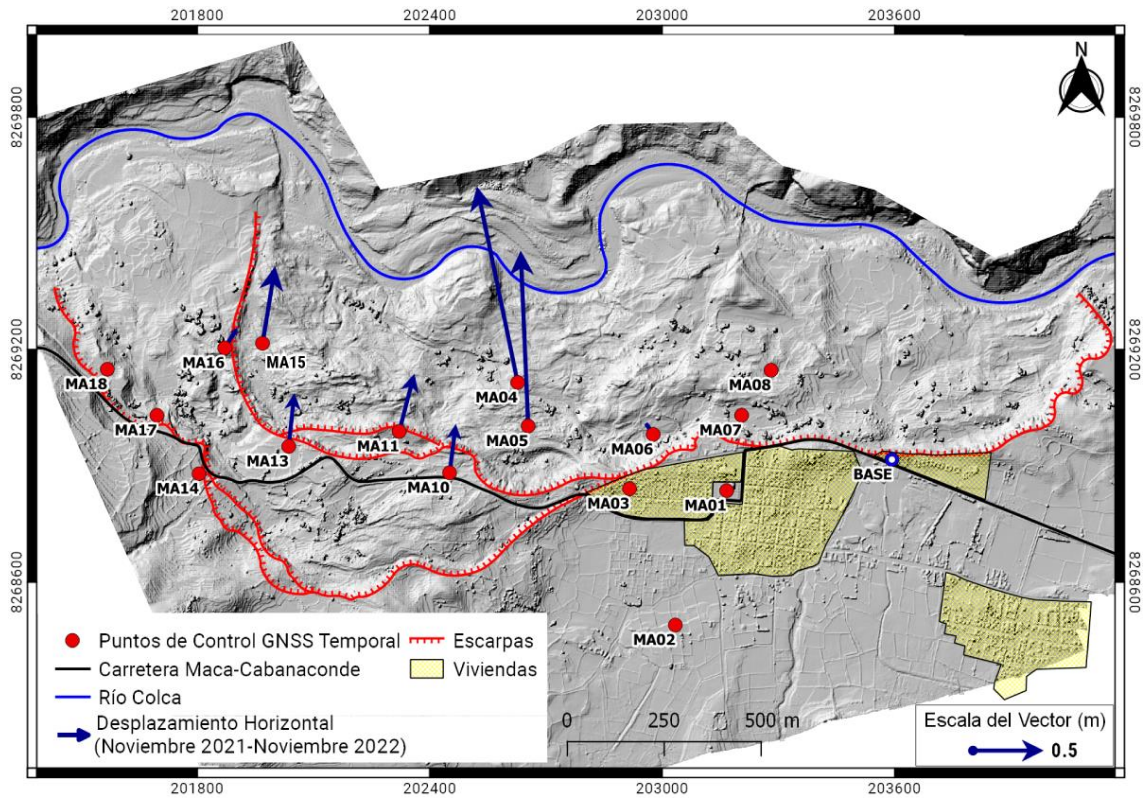


Figura 10. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal de los puntos de control GNSS en el deslizamiento de Maca. Período noviembre 2021 – noviembre 2022. La magnitud de los desplazamientos horizontales se puede apreciar en la tabla 5.

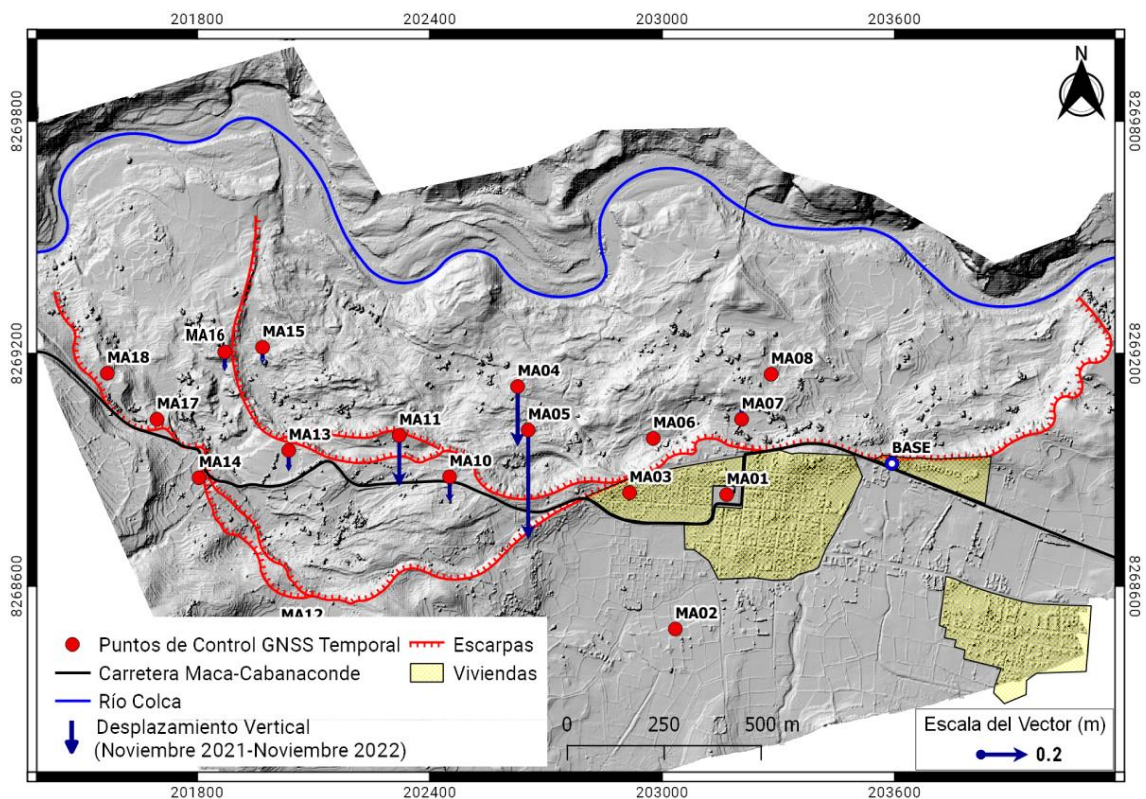


Figura 11. Mapa de vectores de desplazamiento vertical de los puntos de control GNSS en el deslizamiento de Maca. Período noviembre 2021 – noviembre 2022. La magnitud de los desplazamientos horizontales se puede apreciar en la tabla 5.

En relación a las 3 estaciones permanentes (tabla 6, figura 12), se procesaron datos obtenidos del 01 de enero al 31 de diciembre de 2022. La estación MAD1 ubicada en el sector oeste del deslizamiento, al costado de la carretera Maca-Cabanaconde, presenta un desplazamiento horizontal de 0.16 metros hacia el noreste y un hundimiento de -0.22 metros. En el caso de la estación MADM, ubicada en la corona del deslizamiento, en el pueblo de Maca, no se observan desplazamientos horizontales ni verticales significativos. Finalmente, la estación MAD3, localizada en el cuerpo del deslizamiento, es la que presenta mayor deformación, con un desplazamiento horizontal de 1.24 metros en dirección nor-noreste y un hundimiento de -0.43 metros.

Tabla 6. Desplazamiento horizontal y vertical de las estaciones de monitoreo geodésico permanente. DH = Desplazamiento horizontal. DV = Desplazamiento Vertical.

ESTACIÓN GNSS	01/01/2022 AL 31/12/2022 (1 año)	
	DH	DV
	$\Delta E-N$ (m)	ΔZ (m)
MAD3	1.235	-0.43
MADM	0.008	0.002
MAD1	0.163	-0.22

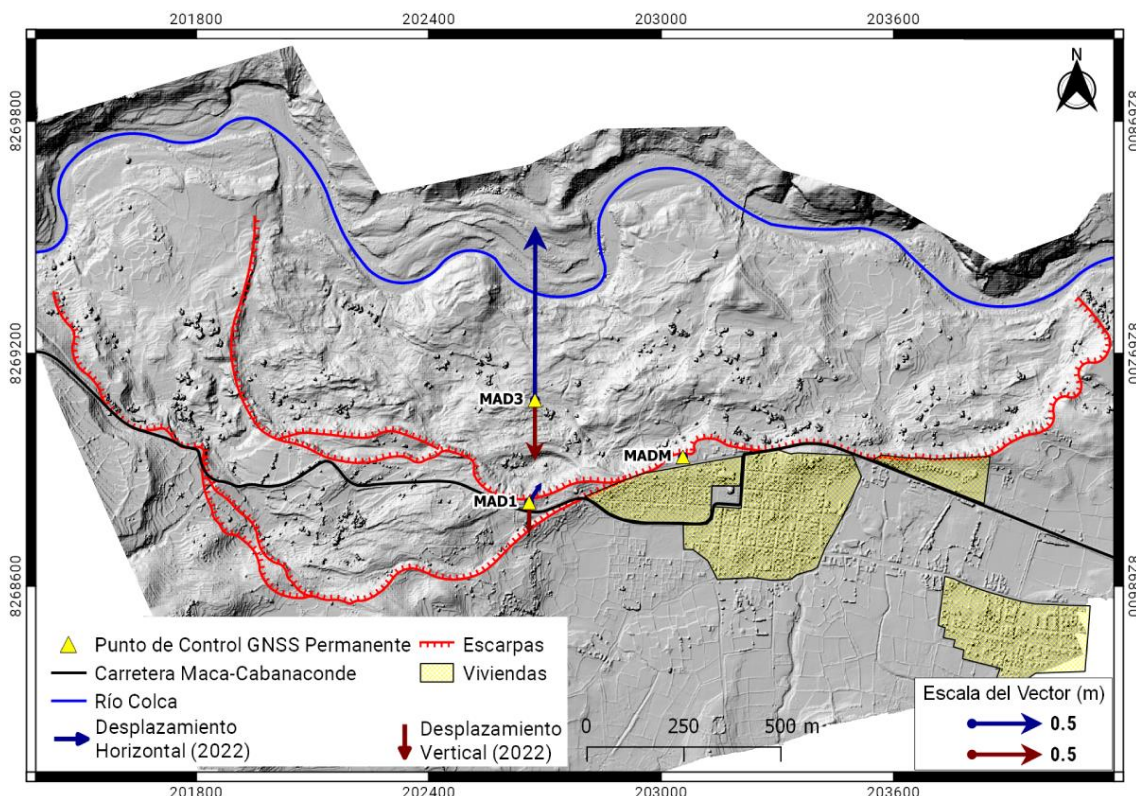


Figura 12. Mapa de vectores mostrando la representación gráfica del desplazamiento horizontal y vertical de las 3 estaciones GNSS permanentes del deslizamiento de Maca. Periodo enero-diciembre, 2022.

2.1.2.2 Series temporales

En la figura 13 se presentan las series de tiempo correspondientes a los desplazamientos acumulados en las estaciones periódicas. Cada línea de color representa un punto de control distinto.

Los cambios de velocidad más notorios se dan en el segundo periodo. Se observa que la estación más activa, MA04, presenta aceleración con un movimiento horizontal hacia el noroeste y un movimiento vertical negativo, representado por el cambio de pendiente de cada componente (E, N y Z) en la figura 13.

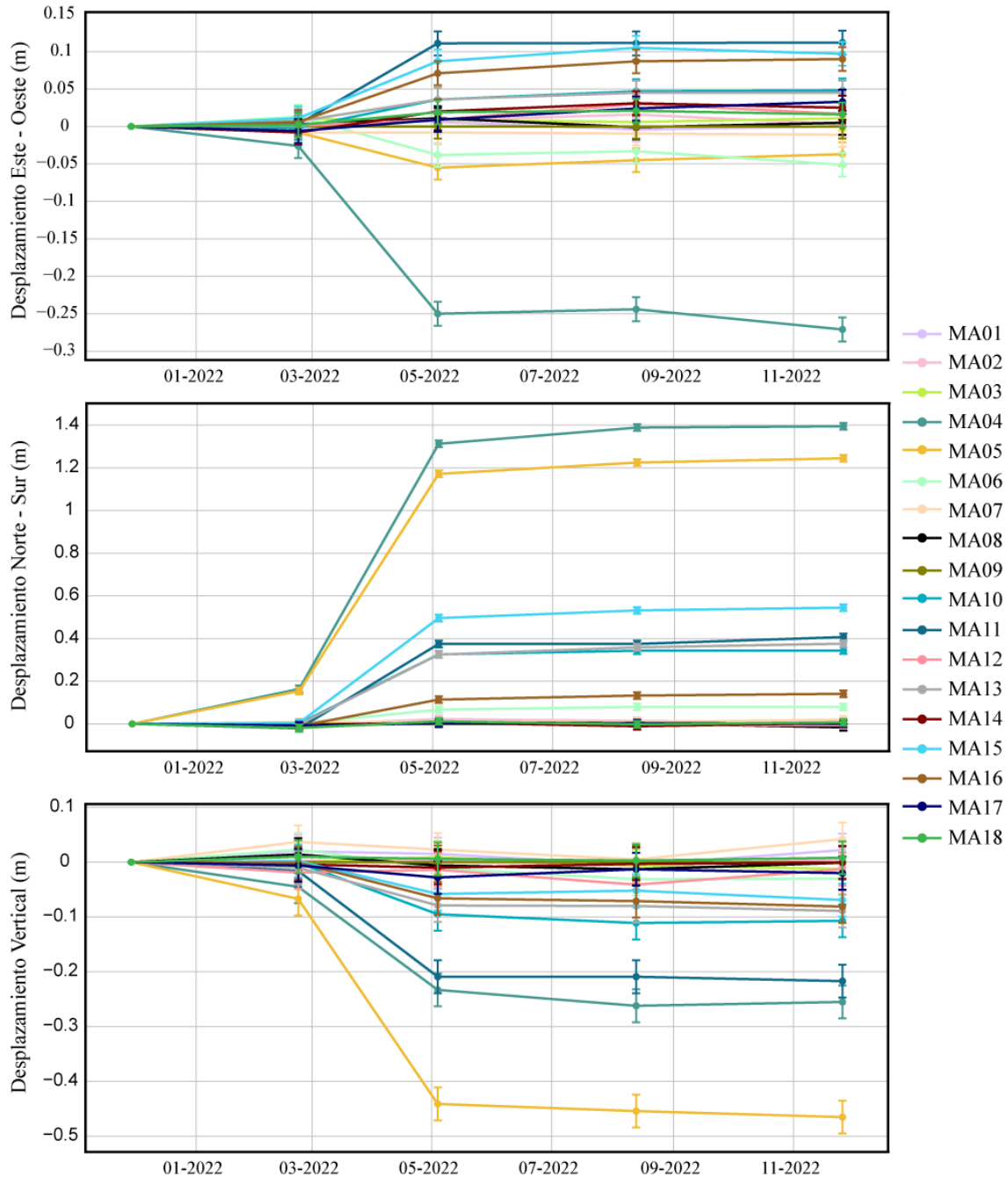


Figura 13. Series temporales de desplazamiento acumulado de las componentes norte-sur, este-oeste y vertical de los puntos de control instalados en el deslizamiento de Maca. Las series temporales se graficaron a partir de la data obtenida en las cinco campañas de medición, entre noviembre de 2021 y noviembre de 2022. Se observan desplazamientos diferenciados en las estaciones MA04 y MA05 a partir de marzo del 2022.

En relación a las estaciones permanentes, en la figura 14, se presentan las series temporales para las estaciones MAD1, MADM y MAD3 respectivamente, desde el 01 de enero al 31 de diciembre de 2021.

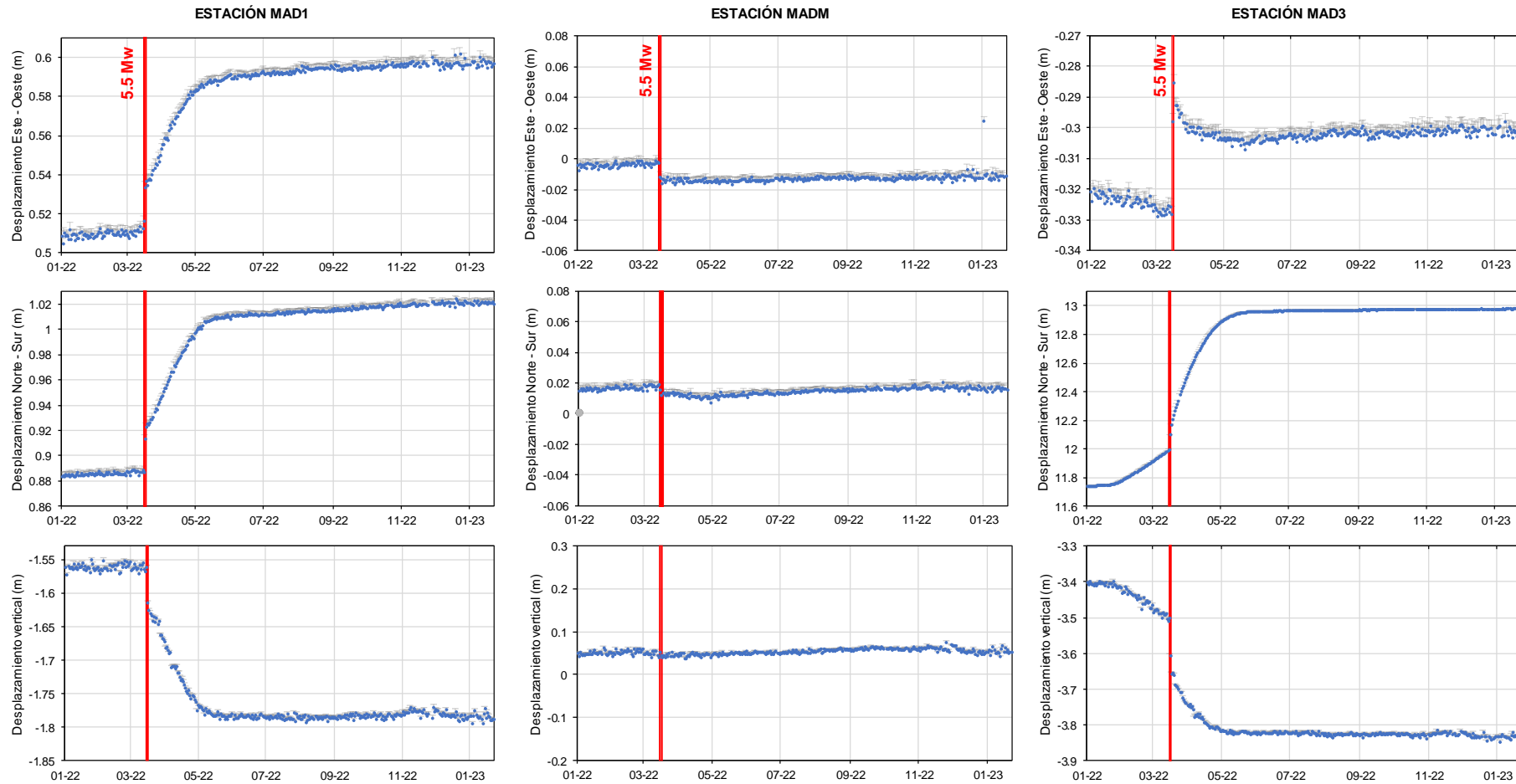


Figura 14. Series temporales de Posición GNSS permanente para las estaciones MAD1, MADM y MAD3. La línea roja corresponde al sismo de 5.5 Mw del 16 de marzo de 2022. A partir de esa fecha las estaciones MAD1 y MAD3 tuvieron un desplazamiento vertical negativo aproximado de -0.53 y -0.11 respectivamente.

Las estaciones MAD1 y MADM no mostraron desplazamientos significativos hasta el 16 de marzo del 2022, fecha en la que ocurrió el sismo de 5.5 Mw., salvo la estación MAD3 que ya presentaba movimientos desde enero, los cuales continuaron hasta finales de abril. Tanto MAD1 como MAD3 son estaciones ubicadas en el cuerpo cuyos gráficos muestran un desplazamiento muy rápido a partir de la fecha del sismo. En el caso de MAD1, el sismo marca el inicio de un desplazamiento continuo que se extiende hasta inicios de mayo. Con respecto a la estación MADM, ubicada tras la corona, no se observaron movimientos significativos en su componente vertical, pero sí en sus componentes horizontales en la fecha del sismo.

2.1.3 FOTOINTERPRETACIÓN

Para la comparación se utilizaron ortomosaicos obtenidos mediante fotogrametría con fotografías aéreas tomadas con dron (Matrice 300 RTK). Las fechas de las ortofotos comparadas varían en un año aproximadamente, del 29 de noviembre de 2021 al 23 de noviembre de 2022.

Las ortofotos se utilizaron para graficar la variación de la corona (retrogresión) y pie (erosión del río) del deslizamiento de Maca para cada uno de los periodos de tiempo escogidos. Además, se hizo un cálculo de áreas de retrogresión y de progresión, y de distancias máximas en la corona.

2.1.3.1 Comparación multitemporal con ortomosaicos 2021-2022 (corona y pie)

En general, se puede apreciar que el deslizamiento de Maca no tuvo retrogresión significativa en el periodo evaluado (figura 15), por lo que se seleccionaron algunos sectores donde se pueden describir retrocesos (figura 15 A y B). El mayor retroceso se encuentra en la parte central de la escarpa principal, sector oriental del pueblo de Maca. Asimismo, en la parte baja central del deslizamiento, se observa pérdida de material relacionada con la erosión del río Colca (figura 15 C).

En la vista A de la figura 15, se observa un retroceso máximo aproximado de hasta 16 m hacia el suroeste. El retroceso en este sector no es continuo a lo largo de la escarpa.

En la vista B de la figura 15, se observa un retroceso máximo aproximado de hasta 5 m, hacia el sur. En relación con la longitud, el avance en este sector se observa cortado por tramos.

En la vista C de la figura 15, se puede observar la pérdida de masa, debido a la erosión del río Colca. En área se calcula que dicha erosión representa un aproximado de 4027 m².

De la comparación de coronas 2021 - 2022, en área, se calcula un avance retrogresivo general aproximado de 1358 m². El retroceso máximo aproximado fue de 16 metros.

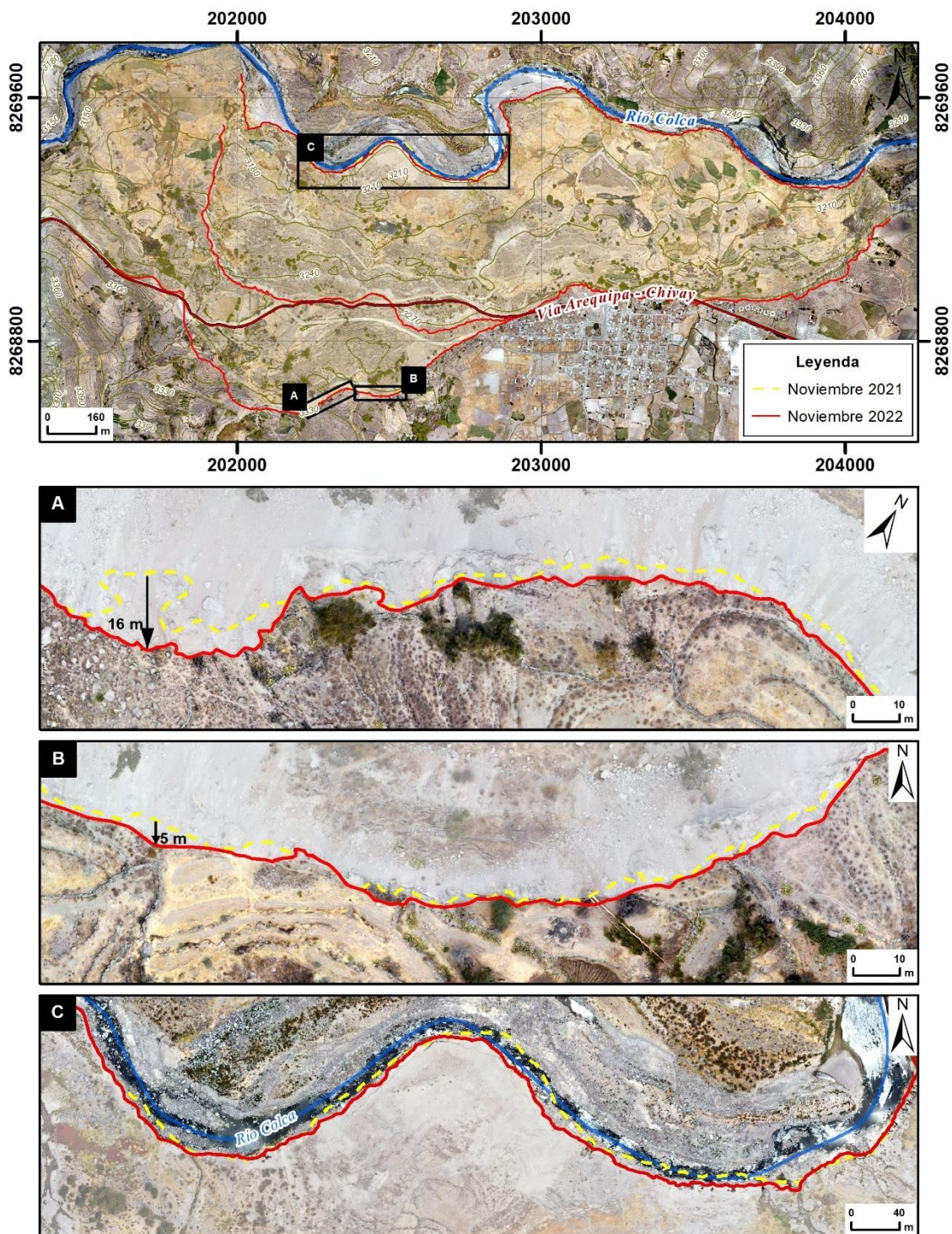


Figura 15. Mapa de comparación multitemporal del avance retrogresivo de la corona del deslizamiento de Maca y de la erosión del río en el pie del deslizamiento, en las fechas del 29 de noviembre de 2021 y 23 de noviembre de 2022. Los detalles A y B muestran la retrogresión máxima aproximada en cada sector. El detalle C muestra la zona con mayor erosión por parte del río.

2.1.3 COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (DEM)

Se realizaron comparaciones para ver cambios en el relieve empleando modelos digitales del terreno (DEMs) de alta resolución obtenidos con fotogrametría, escogidos para intervalos de tiempo que permitan identificar cambios significativos.

El mapa (figura 16) fue elaborado a partir de la diferencia de 2 DEMs obtenidos con fotogrametría, el primero del 29 de noviembre de 2021 y el segundo del 23 de noviembre de 2022, ambos con resolución de 15cm/px. Se utilizó la herramienta de Raster Calculator del software ArcGis para la diferencia, sin embargo, en una primera prueba se obtuvo exceso de ruido debido a la cantidad de vegetación. A raíz de ello, se extrajo de ambos DEMs las áreas fotointerpretadas que tenían zonas arbustivas. La identificación de vegetación se realizó mediante un reconocimiento visual en el ortomosaico, de arbustos de mayor dimensión, posteriormente, para aquellos de menor tamaño, se utilizó el juego de colores de la primera diferencia de DEMs.

La imagen nos muestra la diferencia entre alturas de cada píxel, las cuales oscilan principalmente en un rango de entre -16 a 13 m aproximadamente. Para una mejor visualización, se estableció una gama de colores que ayude a diferenciar las zonas con cambios positivos y negativos.

Se identificaron sectores con mayor variación de altura al norte del deslizamiento, colindantes con el río. Los colores rojizos-anaranjados se encuentran en su mayoría concentrados en el sector medio y frente del cuerpo, mostrando clara disminución de elevación entre el DEM del 2022 respecto al DEM del 2021. Hacia el sur, en la escarpa principal, se aprecian variaciones negativas y un pequeño sector de tonalidades azulinas, mostrando incremento de alturas en la base de la escarpa principal. Por último, en general, la gama entre colores celestes y amarillos muestran sectores donde la variación no ha sido significativa.

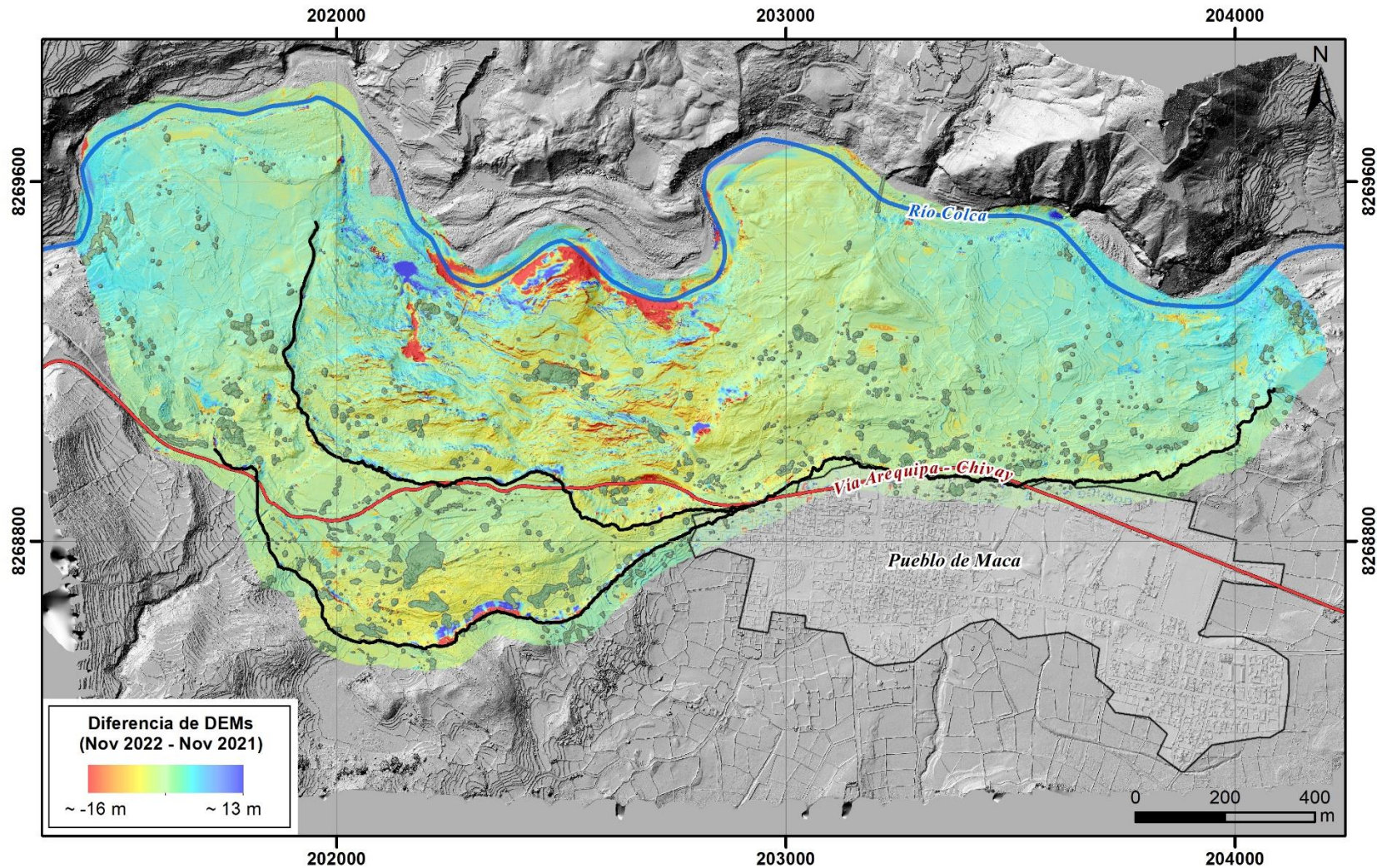


Figura 16. Diferencia de elevaciones, entre noviembre del 2021 y noviembre del 2022. Las tonalidades azulinas muestran diferencias positivas y las rojas diferencias negativas.

2.1.4 COMPARACIÓN DE PERFILES TOPOGRÁFICOS

La comparación de perfiles topográficos (figura 17) se realizó al extraerlos a partir de los modelos digitales de elevación de alta resolución de 15 cm/px, obtenidos mediante fotogrametría con las fotografías aéreas capturadas con dron (Matrice 300 RTK). Las fotografías se obtuvieron con periodo de tiempo de un año aproximadamente, el primero del 29 de noviembre de 2021 y el segundo del 23 de noviembre de 2022 con lo que se obtuvieron los relieves que son comparados.

Por sectores, los perfiles sobrepuestos muestran diferencias claras en ambos ejes, altitud (y) y distancia relativa (x), correspondientes tanto al movimiento de la masa, ligera retrogresión de la corona y en la parte baja, disminución del pie por erosión del río. En el perfil trazado se escogieron tres sectores representativos, de similar longitud, que muestran los desplazamientos descritos a continuación.

2.1.4.1 Segmento (S-1)

De izquierda a derecha, entre 60 y 100 m, en el sector donde se ubica el escarpe principal, se ve un claro cambio de la superficie, de vertical a inclinada, relacionada a la ocurrencia de derrumbes y consecuente depositación. No se aprecian cambios de distancia relativa, sin embargo, se diferencia una mínima variación de alturas constante entre ambos perfiles a partir de la zona de la base del escarpe.

2.1.4.2 Segmento (S-2)

De izquierda a derecha, aproximadamente desde los 550 m, en la parte central del deslizamiento, se diferencia variación de altura negativa y avance de la masa que van disminuyendo progresivamente.

2.1.4.3 Segmento (S-3)

De izquierda a derecha, entre las distancias de 800 y 900 m, se observan diferencias horizontales de hasta -17 m, relacionadas al avance del deslizamiento y erosión por dinámica fluvial del río Colca.

PERFIL TOPOGRÁFICO DESLIZAMIENTO MACA PERIODO 2021-2022

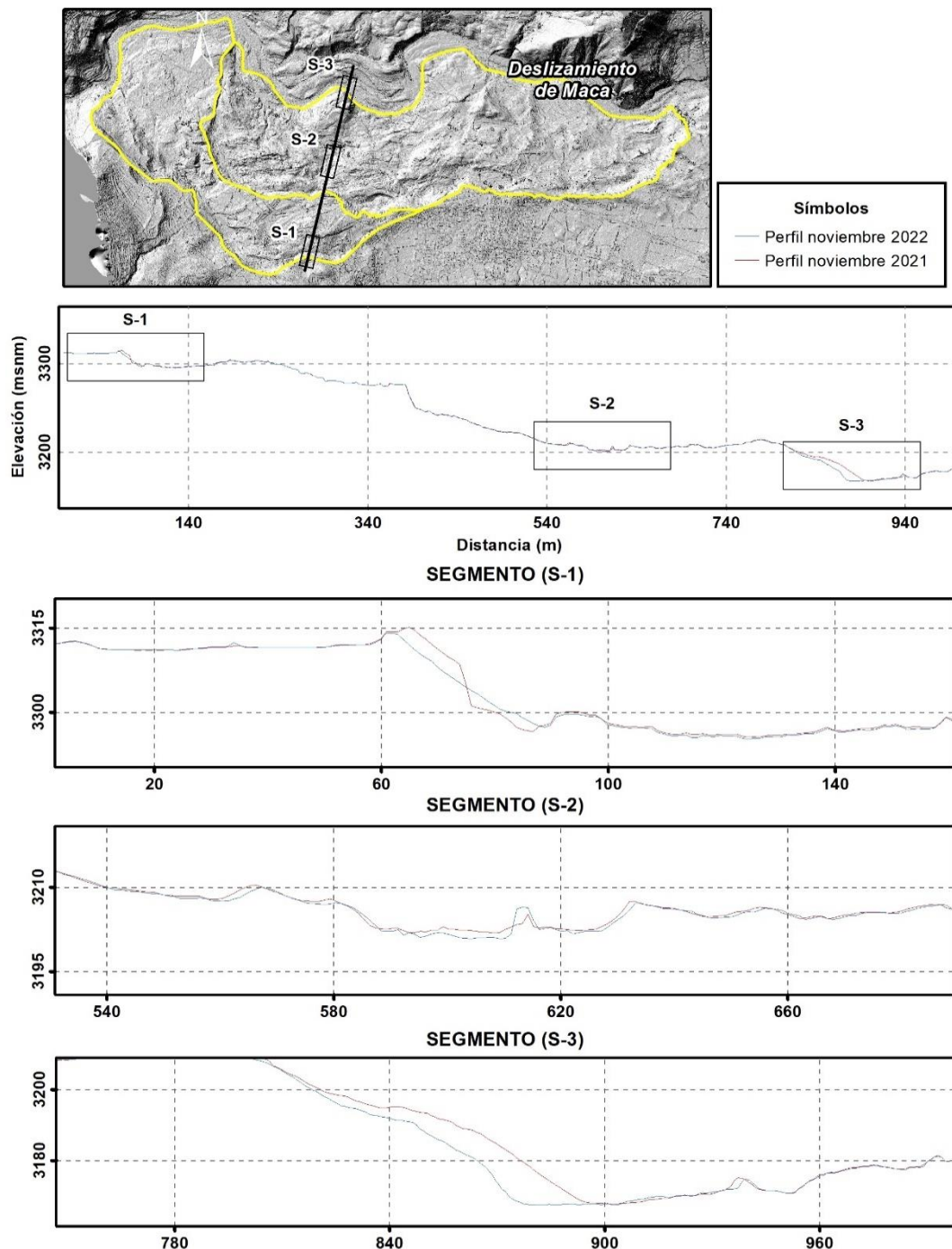


Figura 17. Perfiles topográficos multitemporales del deslizamiento de Maca realizados utilizando DEMs de alta resolución de noviembre del 2021 y noviembre del 2022. Para facilitar la descripción se dividió el perfil principal en 3 segmentos, de corona a pie.

2.2 Interpretaciones

2.2.1 DESPLAZAMIENTOS DEL CUERPO

Por su cercanía, profundidad y magnitud, el sismo del 16 de marzo generó daños severos en la localidad de Maca y detonó movimientos en masa en sus inmediaciones. En relación a los efectos en el deslizamiento de Maca, el día del evento se registraron desplazamientos rápidos en las estaciones permanentes. Cabe señalar que los

desplazamientos ya habían iniciado durante la temporada de lluvias intensas con una tendencia más suave, como muestra el registro geodésico de la estación permanente MAD3 y las series temporales. En este caso, el sismo detonó un desplazamiento rápido de la masa en la estación MAD3, y posiblemente otros sectores aledaños en la zona más activa, que aceleró y continuó hasta inicios de mayo. Este comportamiento coincide con los datos de las estaciones temporales, ubicadas en el cuerpo. De lo descrito puede resumirse que las lluvias intensas generaron desplazamientos antes del sismo, los cuales se aceleraron a raíz del mismo. Este comportamiento coincide con las observaciones de Bontemps et al., 2020, para sismos anteriores de mediana intensidad ($MI < 5.5$) ocurridos en el Colca, con efectos desencadenantes y de aceleración en el deslizamiento de Maca.

En relación a años anteriores, los datos geodésicos continúan mostrando actividad permanente en la zona más activa del deslizamiento, que aproximadamente inicia en el cruce del escarpe central con la carretera de salida de Maca - Cabanaconde, hacia el norte, en dirección al río Colca. Resaltan los movimientos cercanos a la carretera posteriores al escarpe central, que si bien es cierto no son los mayores registrados, indican actividad en la parte alta.

La comparación de DEMs y perfiles topográficos muestran ligeros desplazamientos negativos frente al escarpe principal y negativos y horizontales frente al escarpe central y zona más activa. Estos movimientos estarían indicando hundimientos leves frente al escarpe principal y movimiento general de la masa hacia el río Colca.

2.2.1 AVANCE DE LA CORONA

Utilizando fotointerpretación de ortomosaicos obtenidos con fotogrametría, se distingue que la corona tuvo un mínimo avance durante el 2022, relacionado a derrumbes menores.

La comparación de ortofotos obtenidas antes (febrero) y después (mayo) del sismo (16 de marzo) muestran derrumbes en la corona que podrían atribuirse al mismo o a la acción paralela de lluvias de temporada. Los rasgos de caída en el relieve también se observan claramente en los perfiles topográficos (figura 17 SEGMENTO S-2) y la diferencia de DEMs (figura 16 y figura 18 C).

2.2.3 AVANCE DEL PIE

Los datos de vectores de desplazamiento horizontal y vertical muestran mayores movimientos en la zona central del deslizamiento, correspondientes a las estaciones más cercanas al pie y río.

La fotointerpretación de ortofotos anual, noviembre 2021-2022, muestra una clara disminución de masa en el frente del deslizamiento correspondientes a los recodos o zonas erosión fluvial generada por el río Colca. La diferencia de DEMs (figura 16) y perfiles topográficos (figura 17 SEGMENTO S-3) corroboran la erosión del río (figura 18).

De los datos obtenidos se puede interpretar la acción directa del río con los movimientos de masas en la zona más activa, sin embargo, los datos en este periodo no muestran relación directa entre la aceleración de las masas con la acción fluvial, por efectos de compensación.

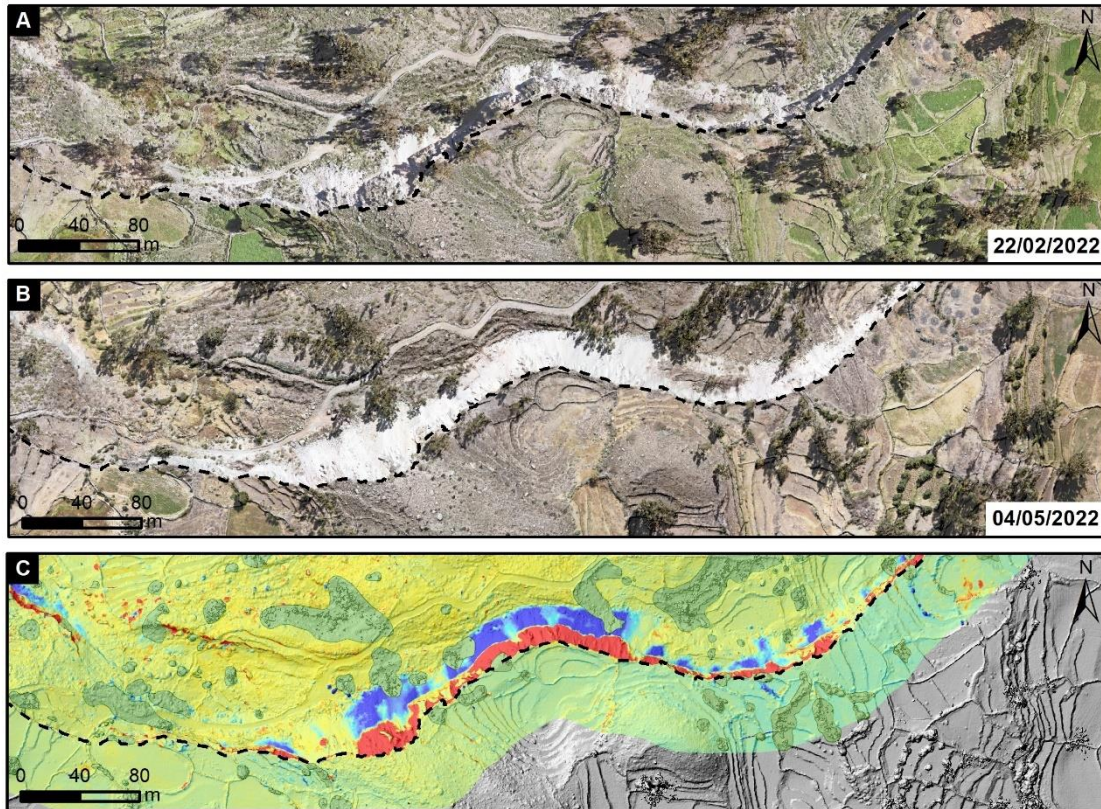


Figura 18. A. Ortofoto de febrero del 2022 mostrando estado de la corona previo al sismo del 16 de marzo del 2022. B. Ortofoto de mayo del 2022 mostrando material acumulado como consecuencia de derrumbes de la corona del deslizamiento de Maca. C. Detalle de la corona en el sector con recientes derrumbes, extraído del ráster de diferencia de DEMs. Se aprecia de color azul acumulación de material y de color rojo diferencias negativas. Los materiales caídos dejaron espacios (diferencias negativas de volumen) y se transfirieron o depositaron al pie (diferencias positivas o ganancia de volumen) de la corona.

3. CONCLUSIONES

1. Los datos de monitoreo geodésico temporal y permanente, obtenidos entre noviembre del 2021 y noviembre del 2022, muestran que el cuerpo del deslizamiento de Maca presenta desplazamientos horizontales máximos de 1.42 m y verticales de -0.47 m.
2. Las estaciones permanentes registraron desplazamientos rápidos durante el sismo de Maca, del 16 de marzo del 2022, fecha a partir de la cual, los movimientos aceleraron y continuaron hasta inicios de mayo. Los datos de estaciones temporales también muestran la misma tendencia.
3. Los datos de fotointerpretación de ortomosaicos multitemporales muestran que entre el 29 de noviembre del 2021 y 23 de noviembre del 2022, la corona principal tuvo un retroceso máximo de 16 m, que no es continuo a lo largo de la escarpa. Este retroceso coincide con derrumbes posiblemente relacionados por el sismo del 16 de marzo del 2022 o a lluvias de temporada. La zona del pie muestra pérdida de masa del deslizamiento en un área de aproximadamente 4027 m² debido a la erosión del río Colca.
4. Los datos de comparación de modelos digitales de elevación y perfiles topográficos se correlacionan con los datos instrumentales geodésicos. En función a ello, se menciona que se presentaron ligeros hundimientos del cuerpo delante del escarpe principal, avances y hundimientos menores a partir de la escarpa central hacia el norte, además de pérdida de material en el frente del deslizamiento erosionado por el río Colca.
5. Los resultados del monitoreo 2022 y su correlación con precipitaciones y sismicidad muestran que el deslizamiento de Maca continúa activo.
6. Debido a las condiciones geológicas, geomorfológicas y geodinámicas analizadas con datos de monitoreo del presente informe y anteriores, el deslizamiento de Maca, es considerado como zona crítica de peligro Muy Alto a la ocurrencia de movimientos en masa y otros peligros geológicos, que pueden ser desencadenados por sismos, precipitaciones extraordinarias, excepcionales o detonantes antrópicos. Consecuentemente, persiste la condición de avance progresivo de la masa deslizada hacia el río Colca o de otros bloques que afecten la carretera Maca-Cabanaconde; además, también persiste posible ocurrencia de retrogresión de la corona hacia terrenos de cultivo u otras direcciones aledañas en su ámbito como viviendas o infraestructura de la localidad Maca.

4. RECOMENDACIONES

Considerando que la mayoría de condiciones de peligrosidad son las mismas a las del año 2021 y años anteriores, se actualizan las siguientes recomendaciones:

1. Retomar el proceso de reasentamiento poblacional que se inició varios años atrás. Cabe resaltar que el INGEMMET, ya ha realizado una evaluación de peligros geológicos (Informe Técnico A6773), en el terreno de 400 hectáreas asignado en el 2015 (Pampas Bajas de Majes N°5) mediante ordenanza regional para el reasentamiento del Pueblo de Maca.
2. Teniendo en cuenta la recurrente afectación de la carretera Chivay-Cabanaconde, se reitera las recomendaciones realizadas por el INGEMMET, en el Informe Técnico N° A7039 de abril del 2020.
3. Colocar paneles informativos para explicar las causas que originaron el deslizamiento de Maca y por qué se mantiene activo. Este material se podría trabajar de manera conjunta entre INGEMMET y la Municipalidad de Maca.
4. Declarar este sector como zona intangible.
5. Drenar el agua acumulada en varios puntos del cuerpo del deslizamiento. Impermeabilizar y realizar el mantenimiento periódico de la totalidad de canales de riego. Refaccionar e impermeabilizar los sistemas de drenaje antiguos que poseen los andenes. Implementar sistemas de riego tecnificado de las áreas de cultivo, preferentemente por goteo y reforestar el cuerpo del deslizamiento y áreas adyacentes, con plantas nativas. Estas medidas de mitigación deben ser diseñadas y dirigidas por profesionales especialistas en el tema.
Debe considerarse que la mitigación propuesta está dirigida a disminuir el agua relacionada con el desplazamiento del cuerpo, retrogresión y avance hacia el río colca, sin embargo, la actividad del deslizamiento también puede ser acelerada, reactivada o detonada por lluvias extraordinarias o excepcionales y sismos de gran magnitud, los cuales, no se pueden controlar.
6. No construir infraestructura (carreteras, caminos de herradura, canales de riesgo u otra actividad antrópica) dentro del deslizamiento de Maca e inmediaciones.
7. Realizar un permanente monitoreo visual y reportar al INDECI, la aparición de nuevas grietas aledañas la zona activa o que puedan aparecer tras la corona del deslizamiento de Maca. De registrar ocurrencias, evacuar inmediatamente a la población afectada.
8. Realizar simulacros de evacuación ante sismos de gran magnitud.

ING. LUIS ALBÍNEZ BACA

.....
ING. JERSY MARIÑO SALAZAR
Director (e)
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

5. BIBLIOGRAFÍA

Antayhua Y. (2002). Análisis de la actividad sísmica en la región del volcán Sabancaya y los sismos de Maca (1991), Sepina (1992) y Cabanaconde (1998). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

Gomez J.C., F. Audemard, J. Quijano (2002), Efectos geológicos asociados al sismo del 23 de junio del 2001 en el sur del Perú. Centro Nacional de Datos Geofísicos Instituto Geofísico del Perú, pp 159 – 174.

Taipe, E., Araujo, G., Miranda, R., & Valderrama, P. (2017). Monitoreo Geodésico y Estudio Geodinámico del deslizamiento de Maca. Informe Técnico N° A6741, INGEMMET - Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico, 2017, 31p. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/785>

Zavala B, Mariño J., Lacroix P., Taipe E., Tatard L., Benavente C., Pari W., Macedo L., Peña F., Paxi R., Delgado F., Fídel L., Vilchez M., Villacorta S., Ochoa M., Luque G., Rosado M., Antayhua Y., Nuñez S., Vasquez S., Wathelet M., Guillier B., Bondoux F., Norabuena E., Gomez C. (2013). Evaluación de la Seguridad Física del Distrito de Maca. Informe Técnico Nro A6628, INGEMMET.

Zerathe, S., Lacroix, P., Jongmans, D., Marino, J., Taipe, E., Wathelet, M., (2016) L. Morphology, structure and kinematics of a rainfall controlled slow-moving Andean landslide, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*.

Zavala B; Mariño J.; Lacroix P, Taipe E.; Tatard L.; Benavente C. & Otros (2012). Evaluación de la seguridad física del distrito de Maca - Estudios geológicos, geofísicos y monitoreo de movimientos en masa, INGEMMET - Dirección de Geología Ambiental y Riesgo geológico, IRD Francia e Instituto Geofísico del Perú, 2012 -159 p.

Bontemps, N., Lacroix, P., Doin, M.-P., 2018. Inversion of deformation fields time-series from optical images, and application to the long term kinematics of slow-moving landslides in Peru. *Remote Sensing of Environment* 210, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.023>

Fidel Smoll, L., Zavala, B., 1994. Estudio geodinámico de la cuenca del río Camana-Majes (Colca): Departamento de Arequipa. Ingemmet Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-.

Figuroa, J. (2019). Arequipa and the Colca valley tourism and colonial heritage in the southern Andes. *Journal of Tourism and Heritage Research*, vol. 2, n° 3, pp. 302-321.

Vela J., Miranda R. (2020) Evaluación de peligros geológicos en la carretera Maca-Cabanaconde, afectada por el deslizamiento ocurrido el 22 de marzo. Informe Técnico N° A7039, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET. 30 p. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2615>

Valderrama, P., Araujo, G. (2016). Peligros geológicos en Maca. Informe Técnico N° A6736, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET. 11 p. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/995>

Taipe, E., Araujo, G. (2017). Evaluación de peligros geológicos de la zona de reubicación de Maca "PB5-Majes". Informe Técnico N° A6773, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico, INGEMMET. 16p. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/823>

Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. & Audin, L. (2017) - Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica 64, 370 p., 1 mapa. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1223>

Sébrier M., Lavenu A., Fornari M. Soulas J-P. (1988). Tectonics and uplift in Central Andes (Peru, Bolivia and Northern Chile) from Eocene to present. *Geodynamique* 3. 1988:85-106.

Mering, C., Huamán, R., Chorowicz, B. y Guillaude, R. (1996). New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images: *Tecton.*, 259, 153-169.

Huamán-Rodrigo D., Chorowicz J., Deffontaines B., Guillaude R., Rudant J-P., 1993. Cadre structural et risques géologiques étudiés à l'aide de l'imagerie spatiale: la région du Colca (Andes du sud Pérou). *Bull. Soc. Géol. France*. T. 164, N°6, pp. 807-818.

Delgado, G. et al (2016). Evaluación geológica post-sismo del 14 de agosto del 2016: Reactivación de la falla Yanque, Arequipa.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). "Evaluación técnico geológica post sismo en la provincia de Caylloma - Arequipa", informe técnico N° 7258, Ingemmet. 22 p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2022). Monitoreo del deslizamiento de Maca, periodo 2021, distrito Maca, provincia Caylloma, departamento Arequipa. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7262, 33 p.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2020). Evaluación de peligros geológicos en la carretera Maca-Cabanaconde, afectada por el deslizamiento ocurrido el 22 de marzo; distrito Maca, provincia Caylloma, departamento Arequipa. Lima: Ingemmet, Informe Técnico A7262, 33 p.

Lacroix, P., Taïpe, E., Zerathe, S., Berthier, E., Guillier, B., Fidel, L. (2014). Monitoreo GPS y satelital del deslizamiento de Maca (Colca). Congreso Peruano de Geología, 17, Lima, 12-15 octubre 2014. Resúmenes, 4 p.

Lacroix, P., H. Perfettini, E. Taïpe, and B. Guillier (2014), Co- and Postseismic motion of a landslide; observations, modelling and analogy with tectonic faults, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6676–6680, doi:10.1002/2014GL061170.

Lacroix, P., Bontemps, N., Taïpe, E., Zerathe, S., Araujo, G., Perfettini, H., Larose, E., Wathelet, M., Guillier, B. (2022). 10 years of permanent instrumentation on the Maca landslide. *Journées Aléas Gravitaires 2022*. Montpelleir, France

Huggel, C., Clague, J., Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains?. *Earth Surface Processes and Landforms*. 37. 77 – 91. <https://doi.org/10.1002/esp.2223>.

Larsen, I., Montgomery, D. (2012). Landslide erosion coupled to tectonics and river incision. *Nature Geoscience*. 5. 468-473. DOI: 10.1038/ngeo1479