

Análisis geofísico de zonas susceptibles a deslizamientos en el valle del Colca (Caylloma - Arequipa)

Informe Técnico N° 002-2020/IGP



Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Danny Scipión

Informe Técnico

Análisis geofísico de zonas susceptibles a deslizamientos en el valle del Colca
(Caylloma – Arequipa)

Autores

Katherine Vargas Alva

Marco Rivera Porras

José Torres Aguilar

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

RESUMEN

El presente informe se elabora a solicitud del Gobierno Regional de Arequipa a fin de realizar el análisis geofísico de las zonas susceptibles a deslizamientos, derrumbes, etc. en la zona del valle del Colca, específicamente entre las localidades de Yanque y Pinchollo. Esta solicitud, es debido a que el 18 de junio y los días 19, 24 y 29 de agosto ocurrieron deslizamientos y derrumbes de tierra en los distritos de Achoma y Maca.

El análisis de interferogramas ha evidenciado anomalías relacionadas a la inestabilidad del terreno en las localidades de Madrigal, Maca y Achoma. En el caso de Madrigal, no se encuentra evidencias históricas o recientes de deslizamientos, por lo cual la ocurrencia de estos eventos en el corto plazo es poco probable. La inestabilidad del terreno en la zona de Maca es persistente desde el año 2015 y en la actualidad ocupa un área de ~86 hectáreas. El deslizamiento ocurrido el 24 de agosto de 2020 afectó un tramo de 80 m de la carretera Maca - Cabanaconde, y un área aproximada de 0.2 hectáreas. La zona deslizada representa el 1 % de la zona “anómala”; por lo tanto, existe una alta probabilidad de que continúen los derrumbes y/o deslizamientos en sectores pequeños, y/o un deslizamiento de gran magnitud que involucraría toda la zona “anómala”, generando el eventual embalse del río Colca, y la pérdida de terrenos de cultivo y tramos de la carretera Maca – Cabanaconde. Asimismo, en la zona de Achoma existe una alta probabilidad de que ocurran deslizamientos y derrumbes debido a que los suelos aún están saturados de agua. Este factor fue uno de los condicionantes principales para los eventos suscitados el 18 de junio, y el 19 y 29 de agosto de 2020.

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1.- Contexto geológico del valle del Colca
- 1.2.- Contexto Tectónico del valle del Colca

2. METODOLOGÍA Y DATOS

- 2.1.- Imágenes de radar
- 2.2.- Fotogrametría y datos de campo
- 2.3.- Modelamiento numérico del derrumbe de 19 de agosto de 2020

3. RESULTADOS

- 3.1.- Zona de Pinchollo – Madrigal
- 3.2.- Zona de Lari – Maca
- 3.3.- Zona de Achoma – Ichupampa
- 3.4.- Zona de Yanque – Coporaque

4. ZONAS SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

1.- INTRODUCCIÓN

El valle del río Colca, es uno de los más dinámicos del Perú desde el punto de vista tectónico, volcánico, sísmico y de procesos de movimientos en masa (deslizamiento, derrumbes, etc.) (Tavera, 2016). Al ser una zona de valle rellena de sedimentos poco consolidados (limo, arena, grava), las laderas son inestables y pueden deslizarse o derrumbarse ante cualquier detonante, como un sismo o precipitaciones pluviales intensas, afectando infraestructura física y medios de vida de la población. Históricamente, en el valle del Colca han ocurrido diversos deslizamientos, derrumbes y erosión fluvial en las márgenes de quebradas, lo que hace que se considere como una zona de muy alta, a alta susceptibilidad a estos eventos (Zavala et al., 2012).

Históricamente, en el año 1959, tras la ocurrencia de un sismo importante, se produjo un deslizamiento de magnitud considerable, con escarpa pronunciada de forma semicircular, a solo 50 m de la localidad de Madrigal, llegándose a observar en su extremo noreste la presencia de rajaduras paralelas sobre el terreno (García, 1966). Posteriormente, en marzo de 1963, ocurrió un deslizamiento de tierras en las laderas del cerro Quehuisa, cabecera de la quebrada Ccallomayo, a 10 km al norte de Madrigal, el cual originó la destrucción de tres hectáreas de cultivos de alfalfa y cebada, tres bocatomas de acequias de regadío, sepultó ganado vacuno y 44 alpacas (García, 1966). La zona deslizada, en forma de abanico, abarcó un área de 4000 m^2 y se estimó un volumen de material desplazado de 10000 m^3 . Es posible que la causa de este deslizamiento sea la saturación del material detrítico existente por filtración de agua (Zavala et al., 2009).

En el año 1979, nuevamente la localidad de Lari fue afectada por un gran deslizamiento que dañó extensos terrenos de cultivo quedando totalmente inutilizados (Yanqui, 1983). Asimismo, en 2008 ocurrió un deslizamiento en el sector de Juanca-Lari que produjo basculamientos y agrietamientos en el terreno constituido de depósitos aluviales (mezcla de

limo, arena, grava y bloques). La altura de la escapa principal fue de 30 m y el deslizamiento afectó varias hectáreas de terrenos de cultivos (Zavala et al., 2009).

En 2016, Araujo et al. (2017) utilizando la tecnología láser y sensores activos, realizaron el monitoreo del deslizamiento de Madrigal, a fin de conocer su grado de deformación, tasa de movimiento y características del mismo. Los altos valores de desplazamiento registrados, entre 10.8 y 21.5 cm, fueron directamente asociados al sismo ocurrido el 14 de agosto de 2016 que originó grietas en superficie a los extremos del deslizamiento. Del mismo modo, Gaidzik y Ciesielczuk (2020) usando técnicas de teledetección realizaron estudios geomorfológicos, geológicos, y el análisis estructural de la zona del valle del Colca para llegar a identificar la ocurrencia de cinco grandes deslizamientos de tierra en los sectores de Pinchollo, Madrigal, Lari y Maca.

El 18 de junio de 2020, a la 01:42 horas, el Centro Sismológico Nacional (CENSIS) reportó el registro de señales sísmicas anómalas en las estaciones sísmicas de Chivay y Patapampa que fueron atribuidas al desarrollo del proceso de deslizamiento de grandes volúmenes de tierra en el valle del Colca, corroborado por pobladores y responsables de Defensa Civil de la Municipalidad Provincial de Caylloma. Este evento ha tenido su génesis en un proceso gravitatorio, afectando un área de 36.4 hectáreas, con un volumen de $\sim 0.016 \text{ km}^3$, que involucra terrenos de cultivo, canales de riego, cabezas de ganado y el embalse del río Colca (Vargas et al., 2020).

Considerando la dinámica del valle del Colca, los deslizamientos pueden ser generados por la ocurrencia de sismos. Las fallas más activas en el valle del Colca son las fallas Huanca e Ichupampa (Huamán, 1995; Mering et al. 1996), fallas Trigal y Solarpampa que hacen parte del sistema de fallas Huambo-Cabanaconde (Sébrier et al., 1985; Huamán, 1995) y la falla Sepina (Huamán et al. 1993; Mering et al. 1996). Todos estos sistemas de fallas generan actividad sísmica muy recurrente, con eventos de magnitudes menores a $M6.0$ afectando mayormente a áreas urbanas con presencia de

viviendas construidas con materiales precarios. Solo el sismo del año 1990, produjo un deslizamiento importante en la localidad de Maca dañando viviendas y algunos tramos de la carretera Maca - Cabanaconde.

Por otro lado, la actividad volcánica ocurre a 18 km al sur del río Colca, y está representada por la presencia del volcán Sabancaya, cuyo proceso eruptivo se inició en el año 1990 y continúa hasta la actualidad. Este proceso se caracteriza por la generación de explosiones e intensas emisiones de gases y cenizas que muchas veces caen en el valle del Colca, lo que afecta principalmente terrenos de cultivos, terrenos de pastizales y bofedales.

En el valle del Colca, la continua ocurrencia de sismos, procesos eruptivos, lluvias intensas y efectos asociados dan origen a un escenario crítico para más de 14 localidades y poblados donde viven cerca de 22 mil personas (INEI, 2018), dedicadas principalmente a la ganadería y agricultura.

El presente informe, elaborado a solicitud del Gobierno Regional de Arequipa, tiene por objetivo mostrar los resultados obtenidos del análisis y procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (método dInSAR), fotogrametría con dron y datos de campo para conocer las zonas en donde existen suelos inestables entre los poblados de Pinchollo y Coporaque (provincia de Caylloma, región Arequipa, Figura 1), pudiendo generarse deslizamientos y derrumbes a futuro.

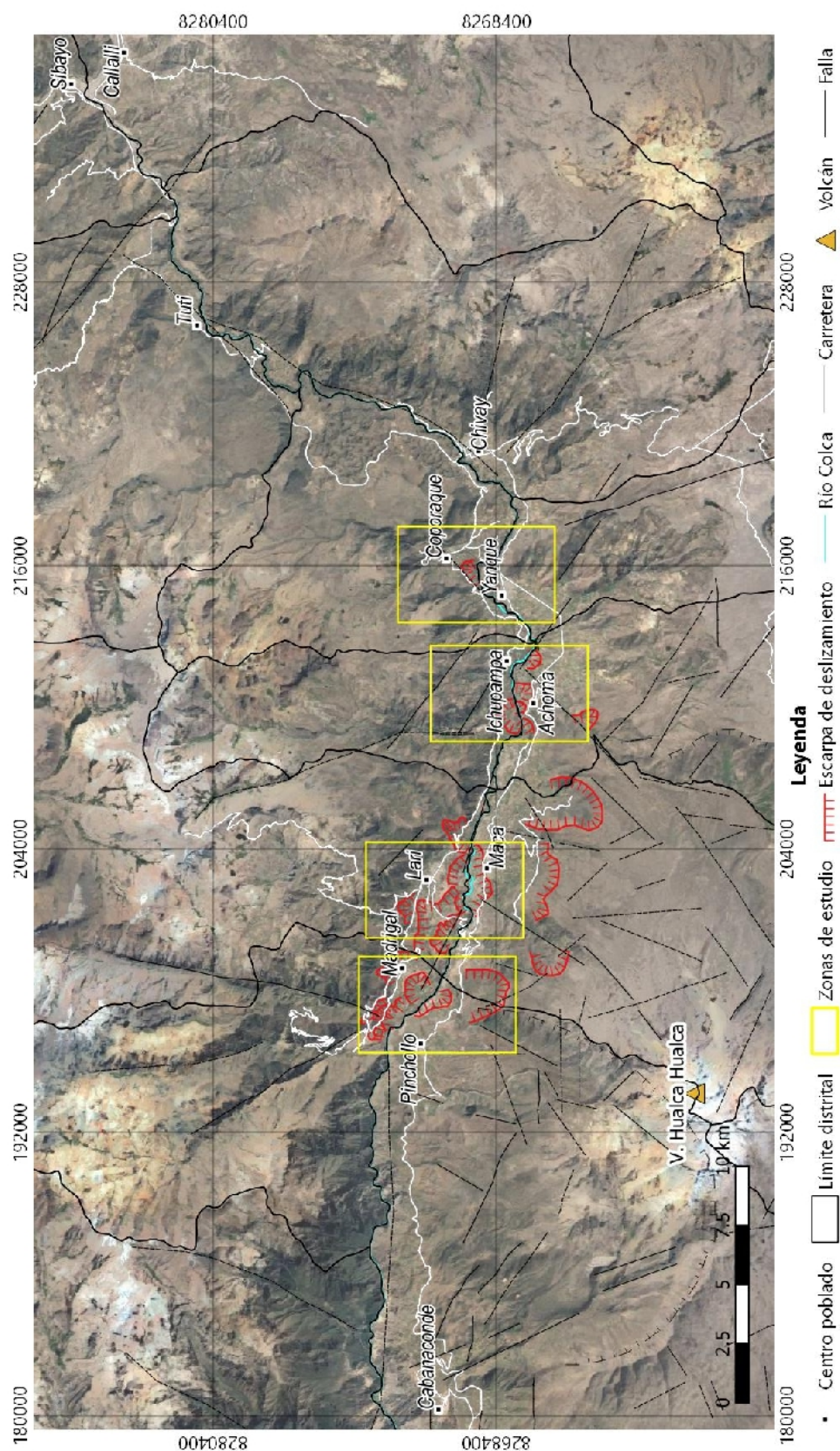


Figura 1: Mapa del valle del Colca y ubicación de las zonas en donde vienen ocurriendo deslizamientos y derrumbes.

1.1.- Contexto geológico del valle del Colca

En la zona de estudio se distinguen diversas unidades litológicas como (Figura 2):

- Depósitos de flujos piroclásticos o tobas de cristales no soldadas, emitidos por el Complejo Volcánico Mismi (pl-lvm/tvm en Figura 2), descritos por Quispesivana y Navarro (2003).
- Flujos de lava andesítica con fuertes pendientes provenientes del volcán Hualca Hualca, visibles en la margen izquierda del río Colca. Esta secuencia lávica posee más de 1000 m de espesor, es del Plio-Pleistoceno (4 y 2 Ma), y ha sido correlacionada con el Grupo Barroso (Thouret et al., 2007).
- Ignimbritas, depósitos volcanoclásticos y flujos de lava del Grupo Tacaza originadas durante un periodo de intensa actividad volcánica ocurrido durante el Mioceno; es decir, entre 23 y 13 Ma (Thouret, et al., 2007; Thouret, et al., 2008; Schildgen, et al., 2009). Asimismo, entre Chivay y Cabanaconde se distinguen importantes afloramientos de estas rocas en ambas márgenes del valle del Colca.
- Depósito de avalancha de escombros que afloran a 3 km de Maca, y entre Madrigal y Pinchollo. El depósito está constituido por fragmentos de rocas volcánicas no consolidadas, en su mayoría hidrotermalizadas incluidas dentro de una matriz limo-arenosa. Los fragmentos líticos son angulosos a subangulosos con un amplio rango de tamaños (centimétricos a más de 2.5 m de diámetro). Los afloramientos poseen coloración amarillo-ocre, rojiza y gris-blancuecina. Se infiere que estos depósitos provienen del flanco norte del volcán Hualca Hualca.

- Lutitas y limoarcillitas de la Formación Colca (Klinck et al., 1986) visibles en el tramo Chivay–Yanque–Maca. Corresponden a depósitos delgados y con laminación paralela de color pardo. Tiene un espesor total de ~100 m. En el nivel medio y tope de la secuencia se observan canales de microconglomerados y areniscas de grano medio a grueso con laminaciones oblicuas, así como fallas sinsedimentarias y niveles de sismitas, mayormente *volcanes de arena* y *slumps*. Estos últimos varían entre 0.20 m a 3 m de espesor. Esta secuencia corresponde a una sedimentación de tipo lacustre profunda.
- Depósitos de diatomita, de coloración blanquecina y de algunos metros de espesor identificado en la localidad de Maca. Las diatomitas son rocas sedimentarias, formadas por la acumulación de microfósiles de diatomeas. Estos depósitos se originan normalmente en ambientes lacustres muy tranquilos, de poca profundidad.
- Depósitos coluviales son visibles en las laderas del flanco norte del volcán Hualca Hualca, al sur y oeste de Maca. Un afloramiento importante se ubica a 2 km al sur de Maca. Estos depósitos se caracterizan por presentar fragmentos de roca angulosos, centimétricos, decimétricos y algunos tienen más de 1 m de diámetro. Los bloques están formados por lavas andesíticas englobadas por una matriz de grava, arena y limo.
- Los depósitos aluviales se encuentran a lo largo del río Colca, en ambos márgenes, formando pequeñas terrazas. Son depósitos de algunos decímetros a varios metros de espesor. Litológicamente están conformados por arena, gravas y bloques lávicos, estos últimos son redondeados, subredondeados y subangulosos. En algunos casos estos depósitos se encuentran formando secuencias interestratificadas con sedimentos finos.

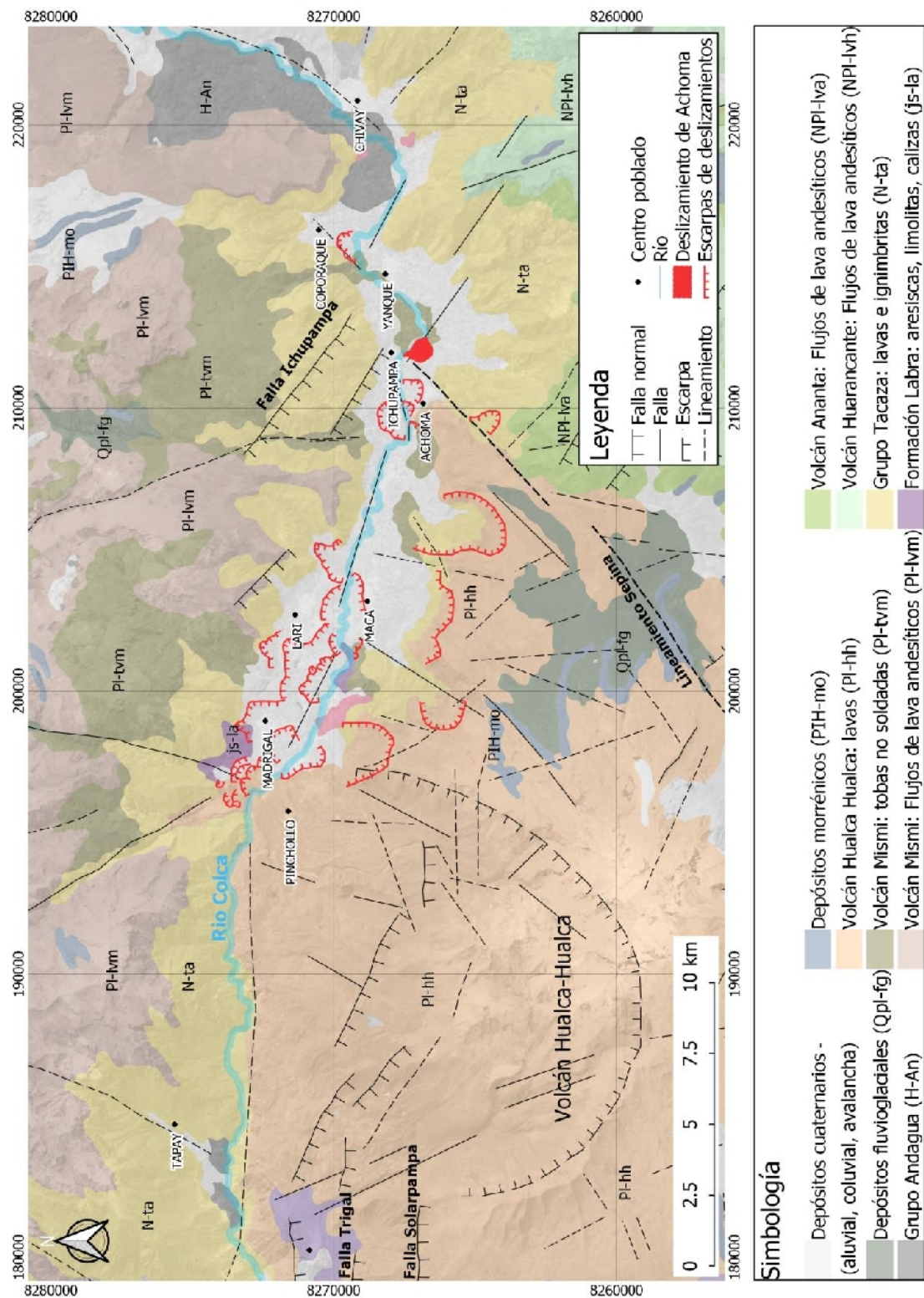


Figura 2: Mapa geológico- estructural del área del valle del Colca (modificado del cuadrángulo 32-s Chivay, Klinck et al., 1986)

1.2.- Contexto Tectónico del valle del Colca

En la zona del valle de Colca se ha identificado tres sistemas fallas y lineamientos de dirección E-O, NO-SE y NE-SO (Figura 2). Los principales sistemas son las fallas Trigal y Solarpampa, ubicadas en la margen izquierda del río Colca, próximas a la localidad de Cabanaconde. La falla normal Ichupampa ubicada al norte de Achoma y el lineamiento Sepina, al suroeste de Achoma (Sébrier et al., 1985; Huamán et al., 1993; Mering et al., 1996).

Dentro del sistema de fallas de dirección E-O, se encuentran las del Trigal y Solarpampa, ubicadas al NE del volcán Hualca Hualca, entre las localidades de Huambo y Cabanaconde. Estas fallas son de tipo normal con rumbo E-O y buzamiento hacia el Sur con valores entre 60° y 70° (Sébrier et al., 1985). Las fallas Trigal y Solarpampa presentan longitudes de 10 a 12 km. Asimismo, al norte y noroeste del volcán Hualca Hualca se observa lineamientos paralelos al río Colca.

Otro sistema de fallas de dirección NO-SE es la de Ichupampa, ubicada próxima a las localidades de Achoma, Yanque e Ichupampa. Es de tipo normal con dirección N135° y buzamiento hacia el suroeste (Huamán et al., 1993). Presenta una longitud aproximada 25 km de largo. También se han observado una serie de fallas y lineamientos en el sector sur de Achoma y sobre la zona del volcán Hualca Hualca.

Asimismo, otro sistema de fallas de dirección NE-SO, es visible en la margen izquierda del río Colca, en la zona denominada pampa Sepina, así como al oeste del poblado Tapay y a lo largo del curso del río Colca, entre las localidades de Chivay y Tuti. Dentro de las principales fallas reconocidas, está el lineamiento Sepina con dirección N50°, la cual está ubicada en el sector este del volcán Hualca Hualca y cruza el cañón del Colca (Huamán et al., 1993; Mering et al. 1996).

2. METODOLOGÍA Y DATOS

Para el análisis espacio-temporal de las zonas susceptibles a procesos de movimientos en masa, se aplicaron técnicas geofísicas de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (INSAR), fotogrametría con sobrevuelo de dron, modelamiento numérico con el software Titan2D y datos de campo. Los resultados permiten proponer escenarios de peligro y riesgo que pueden presentarse a futuro.

2.1.- Imágenes de radar

Para el monitoreo de los derrumbes y deslizamientos que vienen ocurriendo en el valle del Colca se emplea imágenes satelitales Sentinel-1 proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA). Estas imágenes son captadas por satélites que poseen un radar de apertura sintética (SAR) en la banda C (5,40 GHz) y con longitudes de onda de ~ 5.6 cm. La técnica de análisis se basa en la comparación de dos imágenes de radar SAR (imagen máster y esclava) a fin de obtener una imagen resultante (interferograma) que permite identificar y cuantificar la deformación ocurrida en la superficie. Para obtener el interferograma de la zona de estudio, se ha procesado diversos pares de imágenes captadas en órbita descendente y ascendente del satélite, todos con repetitividad temporal de 12 días (Tabla 1). Este análisis se ha realizado con imágenes obtenidas desde el año 2015 hasta el presente.

Adicionalmente, la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) proporcionó al IGP una imagen de radar del satélite TerraSAR-X correspondiente al día 1 de julio de 2020 (Figura 3). El análisis de estas imágenes han permitido definir adecuadamente la zona deslizada el 18 de junio 2020 y la vez, delimitar el embalse del río Colca.

Tabla 1.- Fechas de imágenes SAR para la obtención de interferogramas para el análisis de zonas susceptibles en el valle del Colca.

Interferograma	Imagen máster	Imagen esclava	Órbita
I-1	17/05/2015	11/07/2015	Ascendente
I-2	5/07/2016	29/07/2016	Ascendente
I-3	6/07/2017	30/07/2017	Ascendente
I-4	13/07/2018	25/07/2018	Ascendente
I-5	8/07/2019	20/07/2019	Ascendente
I-6	8/07/2020	20/07/2020	Descendente
I-7	13/07/2020	25/07/2020	Descendente
I-8	20/08/2020	1/08/2020	Descendente
I-9	25/07/2020	6/08/2020	Descendente
I-10	1/08/2020	13/08/2020	Descendente
I-11	6/08/2020	18/08/2020	Descendente
I-12	26/07/2020	19/08/2020	Ascendente
I-13	18/08/2020	30/08/2020	Descendente
I-14	19/08/2020	31/08/2020	Ascendente
I-15	25/08/2020	06/09/2020	Descendente
I-16	06/09/2020	18/09/2020	Descendente

2.2.- Fotogrametría y datos de campo

Para el análisis fotogramétrico se utilizaron videos de sobrevuelos realizados por un vehículo aéreo no tripulado o dron proporcionado por el Sr. José Coaquira, poblador de la localidad de Achoma y colaborador del IGP. Usando la técnica de fotogrametría, el software Agisoft Metashape y el método multivisor de reconstrucción 3D, se obtuvo un modelo en tres dimensiones de las zonas afectadas en base al alineamiento de imágenes.

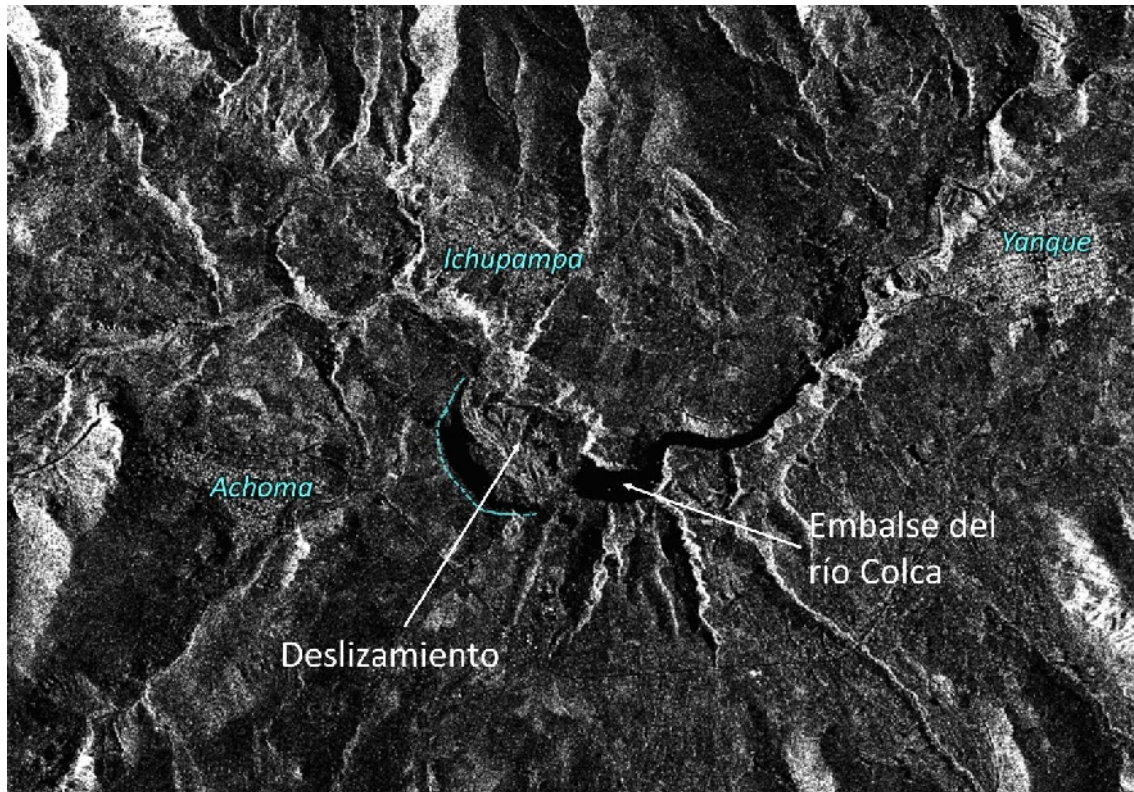


Figura 3: Intensidad de imagen TerraSAR-X. del 01 de julio de 2020.

2.3.- Modelamiento numérico del derrumbe de 19 de agosto de 2020

Utilizado el software TITAN2D, se ha realizado el modelamiento numérico de la dinámica del derrumbe ocurrido el 19 de agosto en el extremo oriental de la escarpa del deslizamiento del 18 de junio 2020. Para su aplicación es importante considerar la fricción de Coulomb para la interfaz, entre el material granular y la superficie basal, y un término de fricción interna para el flujo (Pitman et al., 2003; Patra et al., 2005).

Además, para este modelamiento numérico, se ha considerado un área de colapso representado por un paraboloide de dimensiones, coordenadas y volumen obtenidos a partir de las imágenes de radar Sentinel-1 y el modelamiento fotogramétrico. Además, se considera una escala de longitud de 200 m desde el centro del paraboloide, valores de 35° para el ángulo de fricción interno y de 15° para el ángulo de fricción basal de acuerdo al método

de Stinton et al. (2004). En la simulación, no se considera la velocidad inicial del proceso debido a que el colapso del bloque se produce por gravedad (velocidad inicial en sentido vertical).

3. RESULTADOS

El análisis de movimientos en masa de la zona del valle del río Colca muestra la presencia de deslizamientos y derrumbes antiguos y recientes concentrados en la zona central del valle, entre los poblados de Pinchollo y Coporaque. Los resultados obtenidos fueron divididos en 4 zonas, mostrando la evolución temporal y espacial de los movimientos en masa identificados en la zona de estudio.

3.1.- Zona Pinchollo – Madrigal

Esta zona está ubicada en el extremo occidental del valle del Colca (Figura 1) y en ella se ha identificado la ocurrencia de antiguos deslizamientos y derrumbes (Figura 4).



Figura 4: Vista del poblado de Madrigal en cuyo sector suroeste se distingue una gran escarpa y el cuerpo de un deslizamiento “antiguo”.

El análisis de las imágenes satelitales recientes muestra la presencia de una zona anómala a 1.5 km de longitud ubicada en el extremo noreste de la localidad de Pinchollo y 1.7 km al oeste de Madrigal. A continuación, se describe su evolución (Figura 5), mostrando en líneas discontinuas de color azul las zonas anómalas asociadas a la inestabilidad de suelos:

- *Interferograma (Figura 5a): utilizando imágenes correspondientes a los días 17 de mayo y 11 de julio del 2015 se ha identificado la presencia de una zona anómala que ocupa un área de ~34 hectáreas.*
- *Interferograma (Figura 5b): utilizando imágenes correspondientes a los días 5 y 29 de julio de 2016, se ha identificado la existencia de una zona anómala que ocupa un área de aproximadamente 19 hectáreas.*
- *Interferograma (Figura 5c): utilizando imágenes correspondientes a los días 6 y 30 de julio de 2017, se ha observado que la zona anómala se ha disipado.*
- *Interferograma (Figura 5d): utilizando imágenes de los días 13 y 25 de julio de 2018, se observa algunos vestigios de una zona anómala en la ribera del río Colca.*
- *Interferograma (Figura 5e): utilizando imágenes para los días 8 y 20 de julio de 2019 se identifica una zona anómala en la ribera del río Colca que ocupa un área de ~7 hectáreas.*
- *Interferograma (Figura 5f): utilizando imágenes para los días 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020, se observa que la zona anómala ocupa un área de aproximadamente 9 hectáreas.*

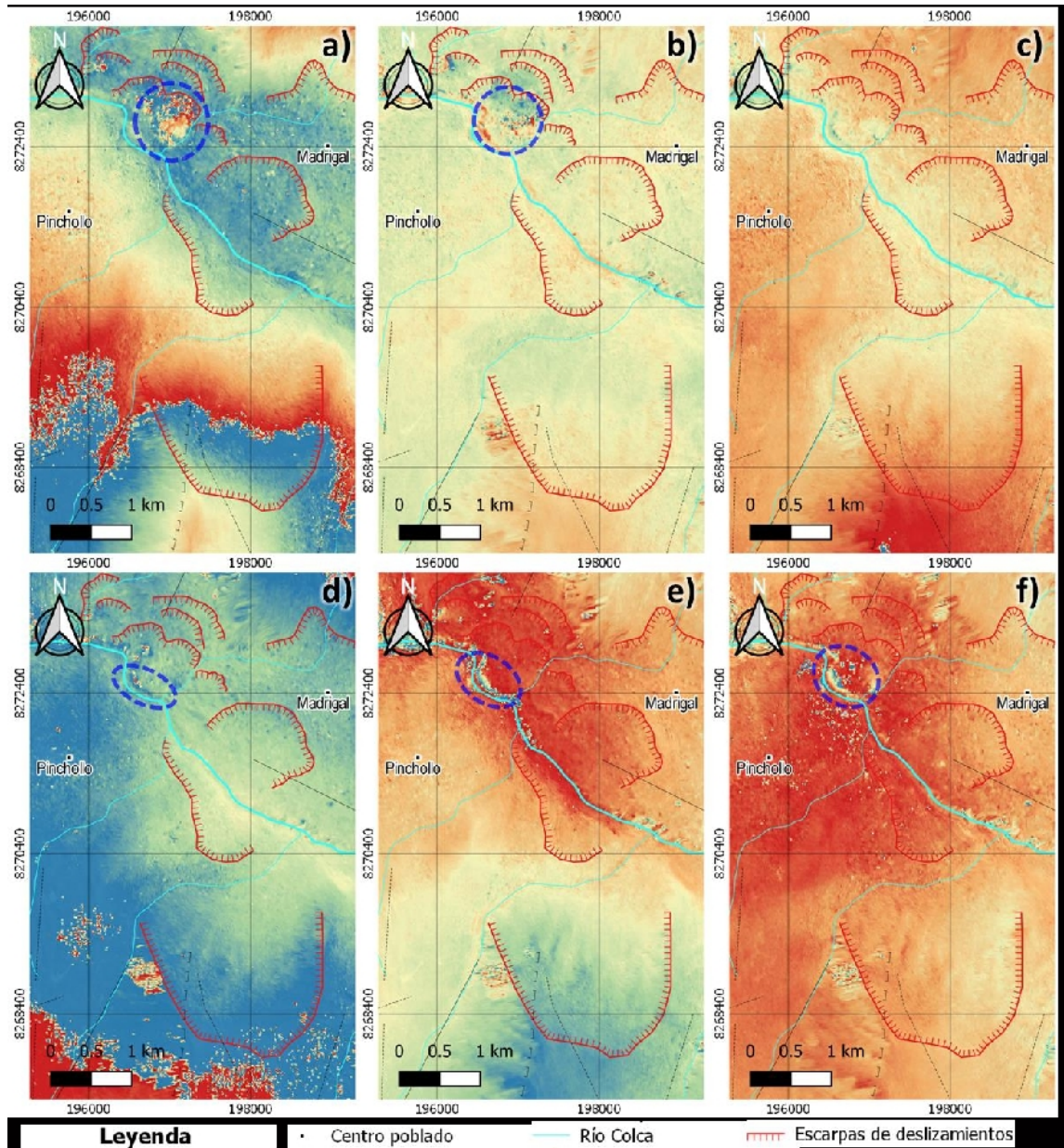


Figura 5: Interferogramas de la zona Pinchollo - Madrigal obtenidos a partir de imágenes satelitales de fechas: a) 17 de mayo y 11 de julio del 2015, b) 5 y 29 de julio de 2016, c) 6 y 30 de julio de 2017, d) 13 y 25 de julio de 2018, e) 8 y 20 de julio de 2019 y f) 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020.

3.2.- Zona de Lari – Maca

Esta zona está ubicada en la parte central del valle del Colca (Figura 1) y en ella se identificó la ocurrencia reciente de deslizamientos y derrumbes (Figura 6).



Figura 6: Vista del poblado de Maca en cuyo extremo noroeste se distingue una gran escarpa y el cuerpo de un deslizamiento.

El análisis de imágenes satelitales recientes muestra la presencia de una zona anómala a 0.5 km de longitud, ubicada al oeste de la localidad de Maca y a 2 km al sur de Lari. A continuación, en la Figura 7 se describe su evolución, mostrando en líneas discontinuas de color azul las zonas anómalas asociadas a inestabilidad de suelos:

- *Interferograma (Figura 7a): utilizando imágenes de los días 17 de mayo y 11 de julio del 2015, se ha identificado la presencia de una zona anómala que ocupa un área de ~42 hectáreas.*
- *Interferograma (Figura 7b): utilizando imágenes de los días 5 y 29 de julio de 2016, se ha identificado la presencia de una zona anómala que ocupa un área de aproximadamente 70 hectáreas.*
- *Interferograma (Figura 7c): utilizando imágenes de los días 6 y 30 de julio de 2017, se ha identificado la presencia de zona anómala que ocupa un área menor a ~41 hectáreas.*

- *Interferograma (Figura 7d): utilizando imágenes de los días 13 y 25 de julio de 2018, se observa que la zona anómala incrementó su tamaño a ~75 hectáreas.*

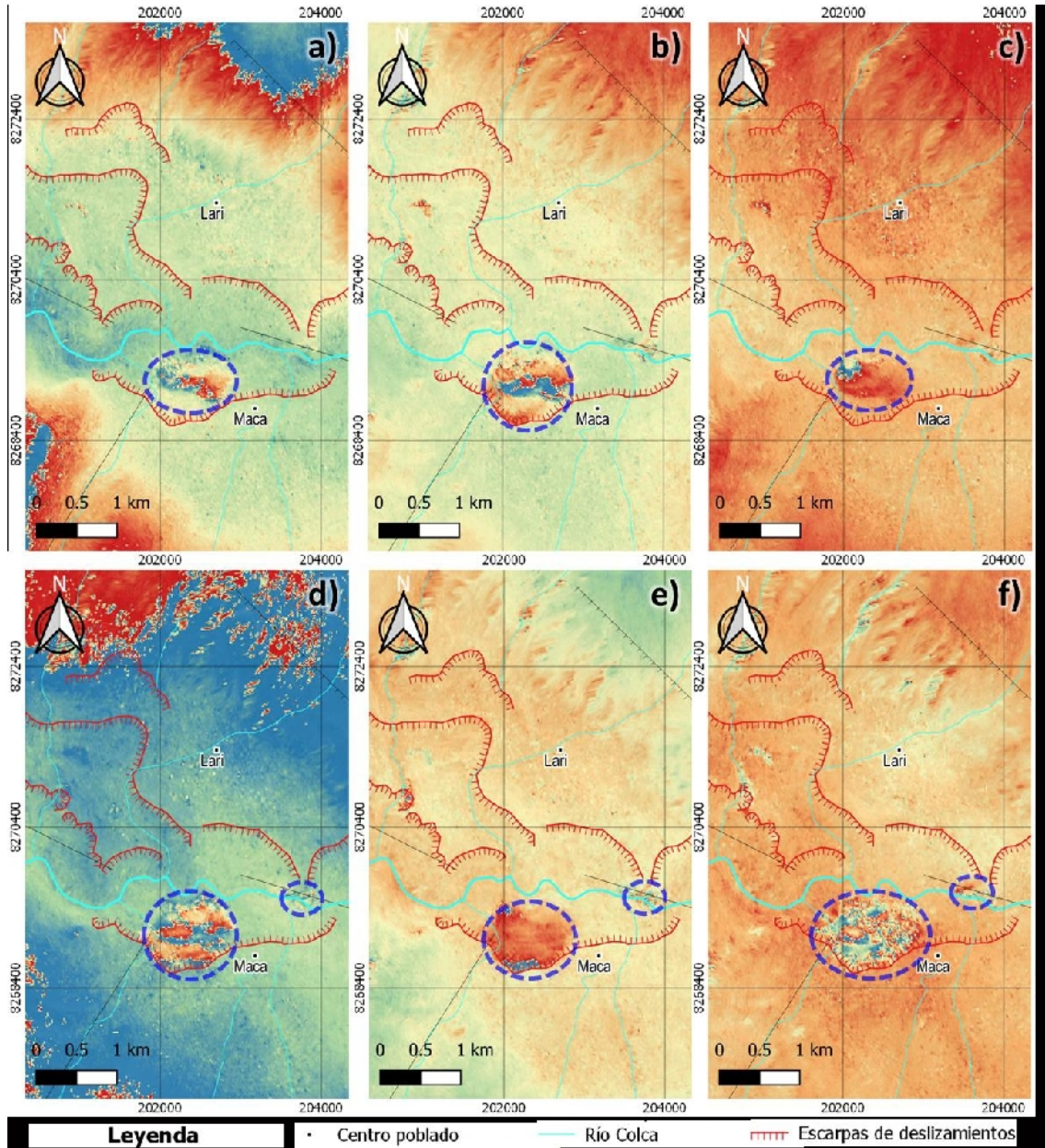


Figura 7: Interferogramas de la zona Lari - Maca obtenidos a partir de imágenes satelitales de fechas: a) 17 de mayo y 11 de julio del 2015, b) 5 y 29 de julio de 2016, c) 6 y 30 de julio de 2017, d) 13 y 25 de julio de 2018, e) 8 y 20 de julio de 2019, y f) 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020.

- *Interferograma (Figura 7e): utilizando imágenes de los días 8 y 20 de julio de 2019, se identifica que la zona anómala persiste, ocupando un área de ~69 hectáreas.*

- *Interferograma (Figura 7f): utilizando imágenes de los días 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020, se observa que la zona anómala ocupa un área mayor, ~86 hectáreas.*

Por otro lado, usando las imágenes satelitales se identificó la presencia de otra zona anómala asociada a una posible inestabilidad de suelos, a 850 m al noreste de Maca, próximo al cauce del río Colca. Esta zona ocupa un área de aproximadamente 6 hectáreas, la misma que fue también identificada en los interferogramas de los años 2018, 2019 y 2020 (Figura 7).

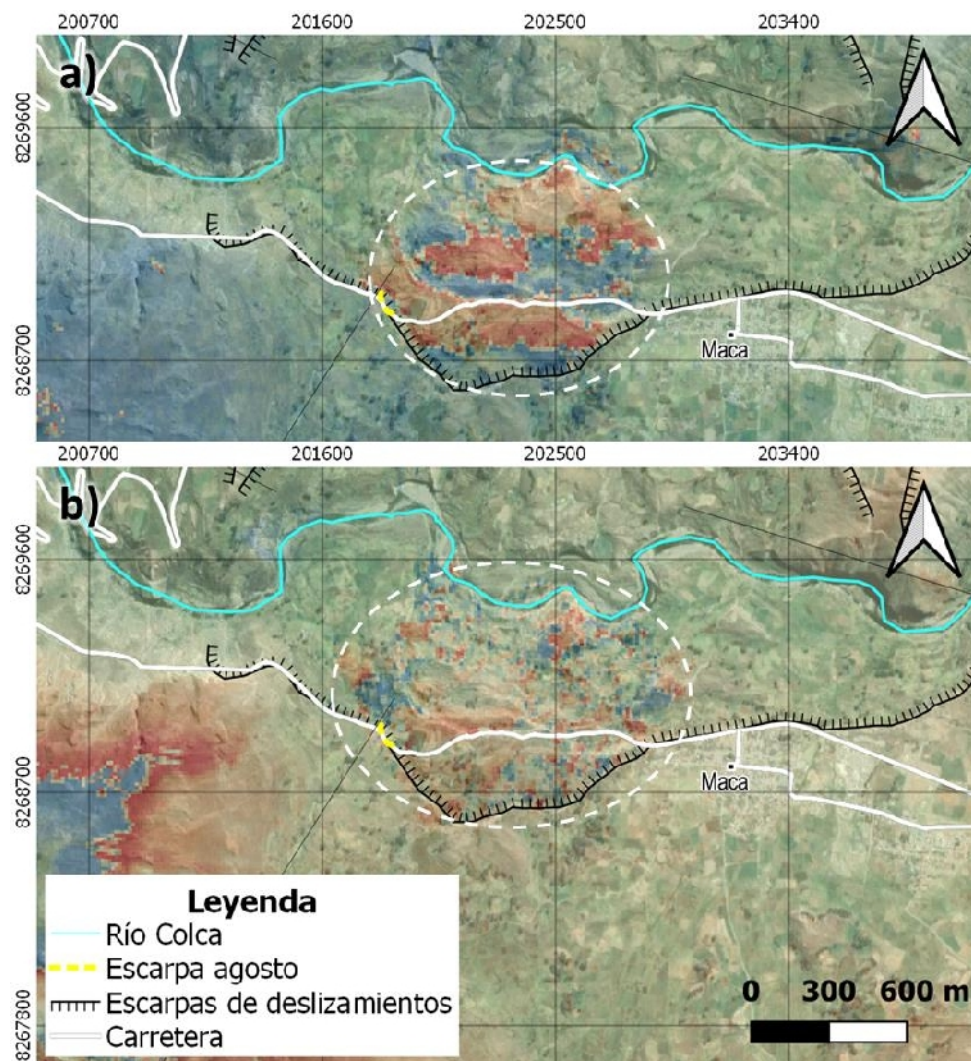


Figura 8: Interferogramas de la zona de Maca obtenidos a partir de imágenes del año 2020: a) 13 y 25 de julio, b) 25 de agosto y 6 de septiembre. Se resalta en línea discontinua blanca la zona inestable.

Según el análisis realizado, la zona anómala principal persiste en todos los interferogramas, con la diferencia que en este año ocupa un área de mayor dimensión. Por ejemplo, en las imágenes de los días 13 y 25 de julio de 2020, la zona anómala ocupa un área ~ 69 hectáreas (Figura 8a); es decir, 17 hectáreas menos que lo estimado usando imágenes del 25 de agosto y 6 de septiembre de 2020 (Figura 8b).

En este escenario, se debe considerar que el 24 de agosto de 2020 ocurrió un derrumbe que afectó un tramo de 80 m de la carretera Maca – Cabanaconde (km 105+700), en el sector de Chaccaña, distrito de Maca (Figuras 9 y 10). El derrumbe se produjo en una zona de ladera constituida de depósitos aluviales no consolidados (limos, arenas con bloques de lavas).



Figura 9: La plataforma de la carretera Maca- Cabanaconde fue afectada por un derrumbe ocurrido el 24 de agosto.

Asimismo, usando imágenes satelitales y el modelamiento fotogramétrico, se determinó las características del derrumbe ocurrido el 24 de agosto de 2020 en la zona de Lari – Maca (Figuras 11 y 12), siendo estas las siguientes:



Figura 10: Vista de la plataforma de la carretera Maca - Cabanaconde afectada por un derrumbe ocurrido el 24 de agosto.

- *La longitud de la escarpa fue calculada en ~ 100 m, y de ella, 80 m involucra a la carretera Maca - Cabanaconde.*
- *El área del terreno deslizado es de ~ 0.2 hectáreas.*
- *La escarpa principal presenta una pendiente de $\sim 60^\circ$ en dirección noreste (Figura 12).*

Es importante remarcar que el área del derrumbe ocurrido el 24 de agosto de 2020 en la zona de Maca, representa menos del 1 % de la zona considerada anómala según los resultados obtenidos en este estudio.



Figura 11: Vista de la carretera Maca – Cabanaconde de fechas: a) 28 de abril de 2019 (Google Earth), b) 24 de agosto de 2020 (imagen obtenida mediante fotogrametría).

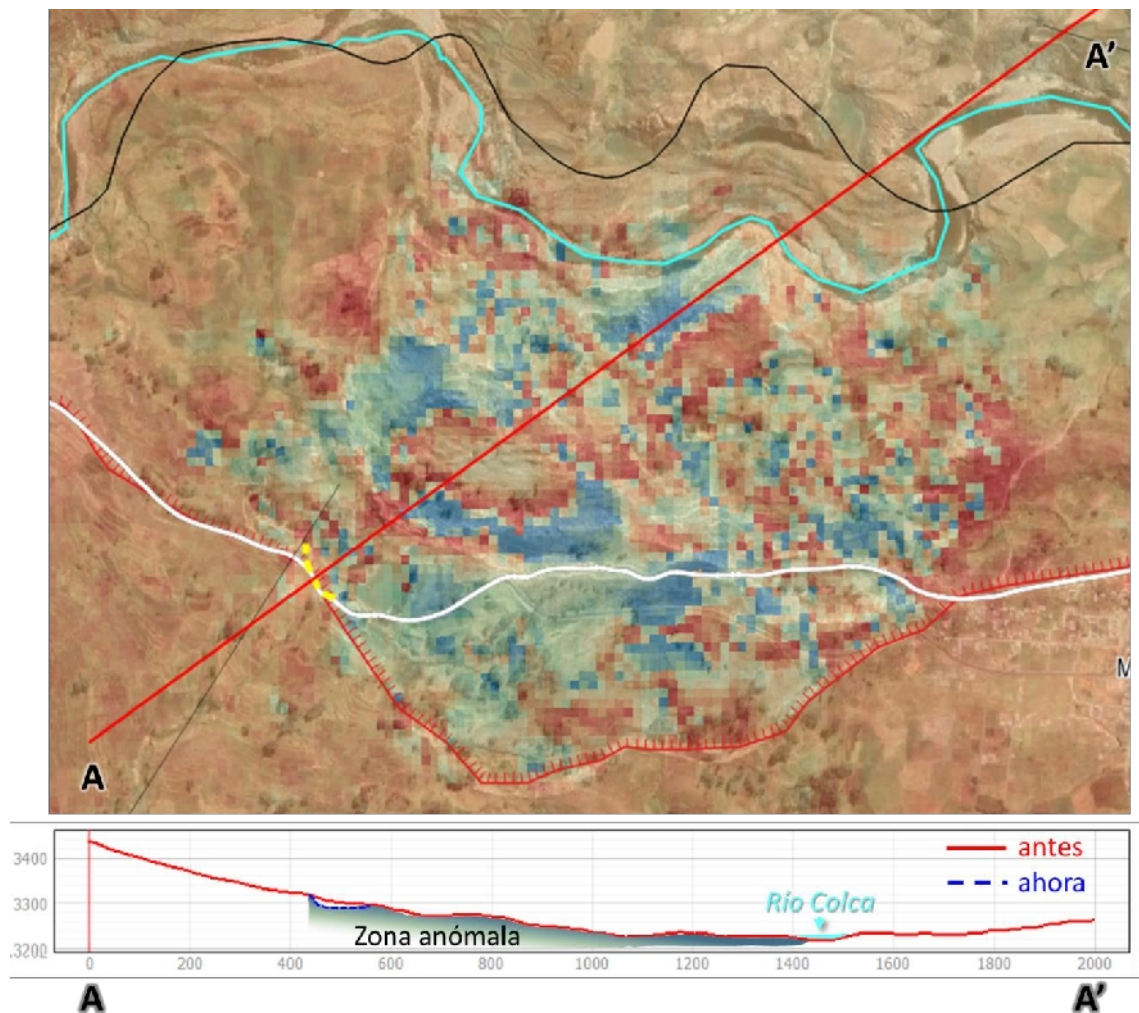


Figura 12: Perfil de la anomalía detectada en Maca a partir de imágenes de radar del 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020.

3.3.- Zona de Achoma – Ichupampa

Los interferogramas obtenidos del análisis de imágenes satelitales muestran que, entre los años 2015 a 2019, no se observaban la presencia de zonas anómalas (Figuras 13a, 13b, 13c, 13d, 13e); sin embargo, en el año 2020, combinando imágenes del 25 de agosto y 06 de septiembre (Figura 13f), se observan la presencia de perturbaciones asociadas al deslizamiento de tierra que ocurrió el 18 de junio en la zona de Achoma (circulo azul).

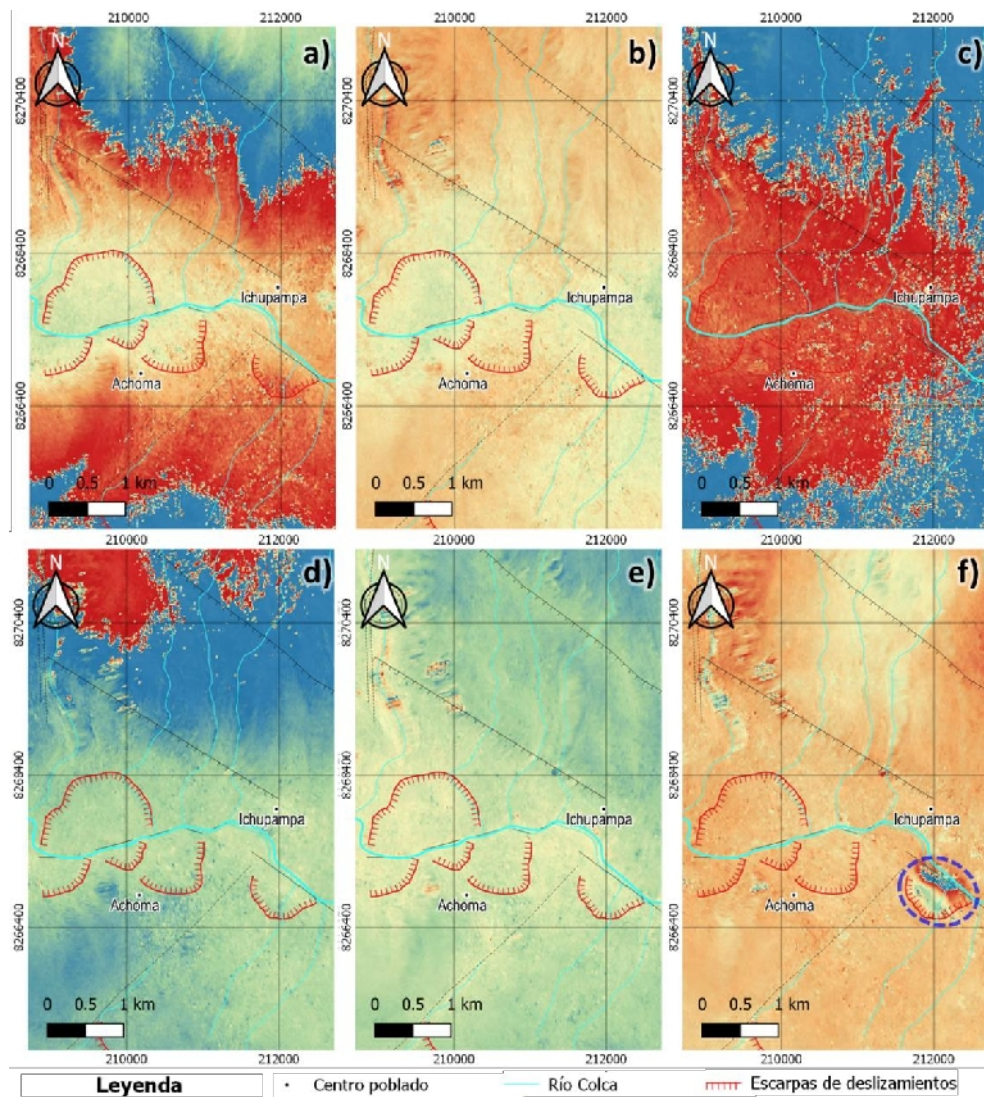


Figura 13: Interferogramas de la zona Achoma - Ichupampa obtenidos a partir de imágenes de fechas: a) 17 de mayo y 11 de julio del 2015, b) 5 y 29 de julio de 2016, c) 6 y 30 de julio de 2017, d) 13 y 25 de julio de 2018, e) 8 y 20 de julio de 2019, y f) 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020.

En el interferograma obtenido, usando imágenes satelitales de los días 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020, se distingue la presencia de una zona anómala que ocupa un área de aproximadamente 18 hectáreas que corresponde al deslizamiento de Achoma, ocurrido el 18 de junio del presente año. Dicho deslizamiento (Figuras 14 y 15), ocurrió a la 01:42 horas debido a un proceso gravitatorio que llegó a afectar un área de 36.4 hectáreas, y movilizando un volumen de $\sim 0.016 \text{ km}^3$ de suelos que involucra terrenos de cultivo y canales de riego, que además afectaron a cabezas de ganado y hasta el embalse del río Colca (Vargas et al., 2020).

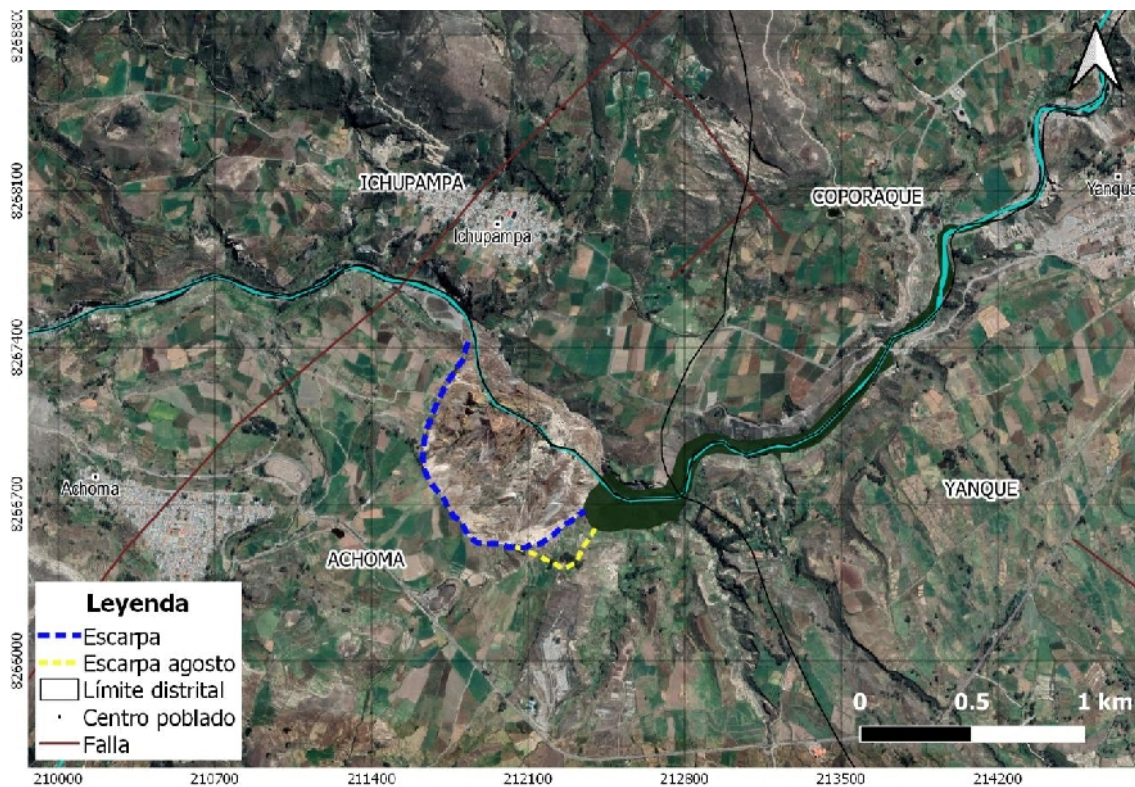


Figura 14: Imagen satelital mostrando la ubicación de la escarpa del deslizamiento del 18 de junio (línea discontinua azul) y la escarpa del derrumbe del 19 de agosto de 2020 (línea discontinua amarilla).

Según los estudios y el análisis de susceptibilidad del deslizamiento de Achoma, se consideran los siguientes factores desencadenantes y condicionantes:

- Factores desencadenantes: lluvias intensas, actividad antropogénica.

- Factores condicionantes: pendiente elevada, suelos saturados de agua, suelos pocos o no consolidados, presencia de fallas.



Figura 15: Vista de la zona del deslizamiento ocurrido el 18 de junio de 2020 en la zona de Achoma, el cual represó el río Colca.

A continuación, se muestra el análisis detallado de los interferogramas obtenidos de imágenes posteriores al deslizamiento del 18 de junio de 2020, siendo sus resultados los siguientes (Figuras 16):

- *Interferograma (Figura 16a): utilizando imágenes de los días 8 y 20 de julio, se llega a identificar la presencia de perturbaciones en la zona de estudio para la apertura del dren.*
- *Interferograma (Figura 16b): utilizando imágenes de los días 13 y 25 de julio, se continúa observando la presencia de la zona anómala en la apertura del desembalse.*

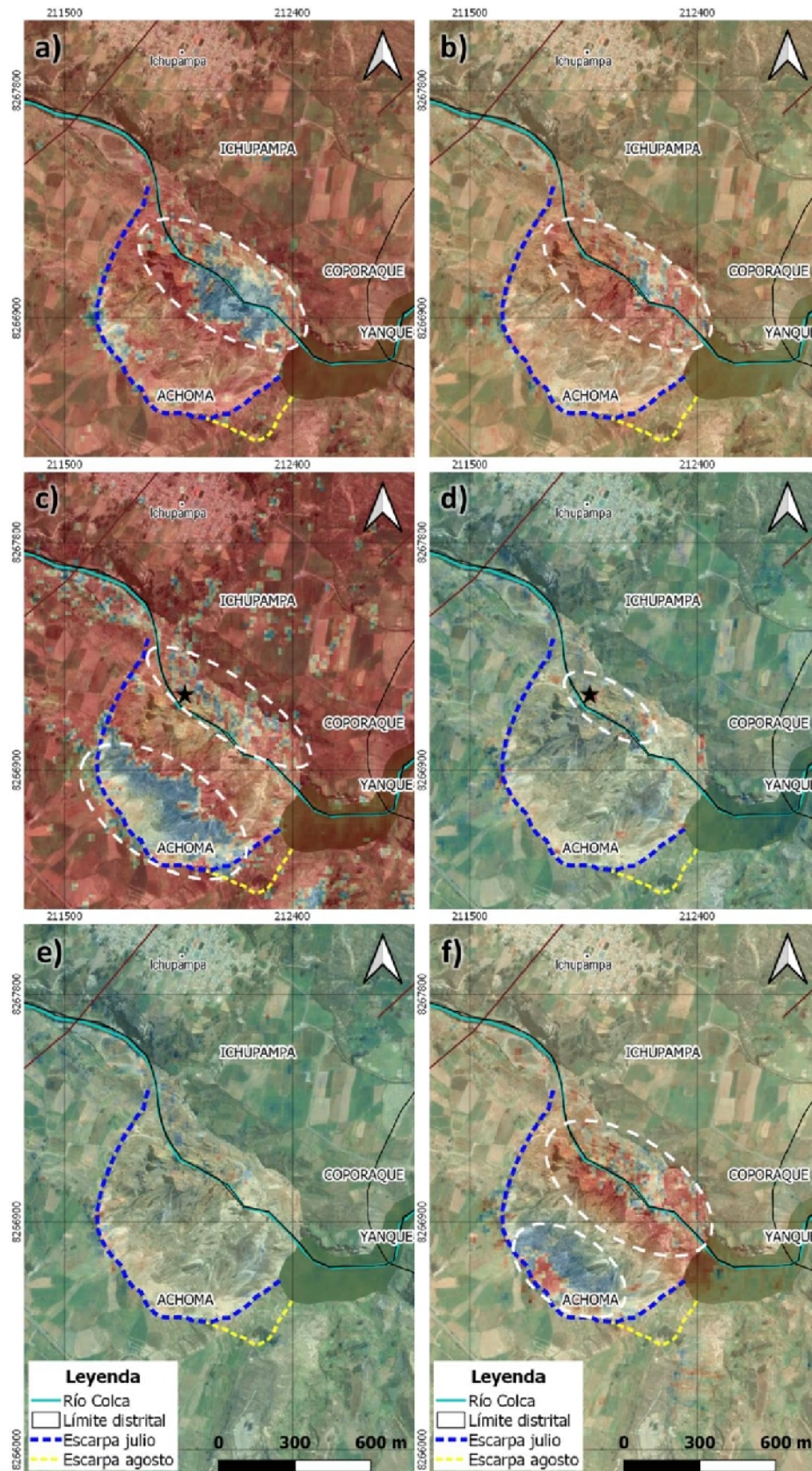


Figura 16: Interferogramas obtenidos a partir de imágenes de fechas del año 2020: a) 8 y 20 de julio, b) 13 y 25 de julio, c) 20 de julio y 1 de agosto, d) 25 de julio y 6 de agosto, e) 1 y 13 de agosto, f) 6 y 18 de agosto. La estrella indica la ubicación de los agrietamientos reportados en una inspección de la zona de estudio.

- *Interferograma (Figura 16c): utilizando imágenes de los días 20 de julio y 1 de agosto, se observa la presencia de una zona anómala en la margen derecha del dren y que corresponde a agrietamientos del terreno (color azul), asociadas a la modificación de la topografía por acumulación del material removido y por la ocurrencia de pequeños desprendimientos de tierra que continuaron ocurriendo en la base de la escarpa.*
- *Interferograma (Figura 16d): utilizando imágenes de los días 25 de julio y 06 de agosto se observa una disminución del área de la zona anómala, aunque se continua observando la presencia de ligeras perturbaciones en la margen derecha del canal, posiblemente asociados a la aparición de agrietamientos en el terreno.*
- *Interferograma (Figura 16e), utilizando imágenes de los días 1 y 13 de agosto, se continúa observando la disminución de las zonas anómalas debido a la desestabilización del terreno u ocurrencia de derrumbes o deslizamientos.*
- *Interferograma (Figura 16f): utilizando imágenes de los días 6 y 18 de agosto, se identificó la existencia de dos zonas anómalas; la primera donde se reportaron los agrietamientos del suelo (de color rojo) y la segunda, en el sector suroeste, cercano a la escarpa principal del deslizamiento del 18 de junio (de color azul).*
- *Interferograma (Figura 17a): utilizando imágenes de satélite de los días 26 de julio y 19 de agosto, se observan perturbaciones debido al derrumbe ocurrido el 19 de agosto en su sector SE; además de la presencia de otras zonas anómalas asociadas a inestabilidad del terreno en ambas márgenes del dren construido para el desembalse del río Colca. Asimismo, en la margen izquierda del embalse del río*

Colca (Figura 17a, círculos blancos) y que presenta alta probabilidad de generar derrumbes.

- *Interferograma (Figura 17b): utilizando imágenes de los días 13 y 25 de agosto (ascendentes), se tiene resultados consistentes con el interferograma anterior, persistiendo la alta probabilidad de ocurrencia de nuevos derrumbes (Figura 17b, círculos blancos).*

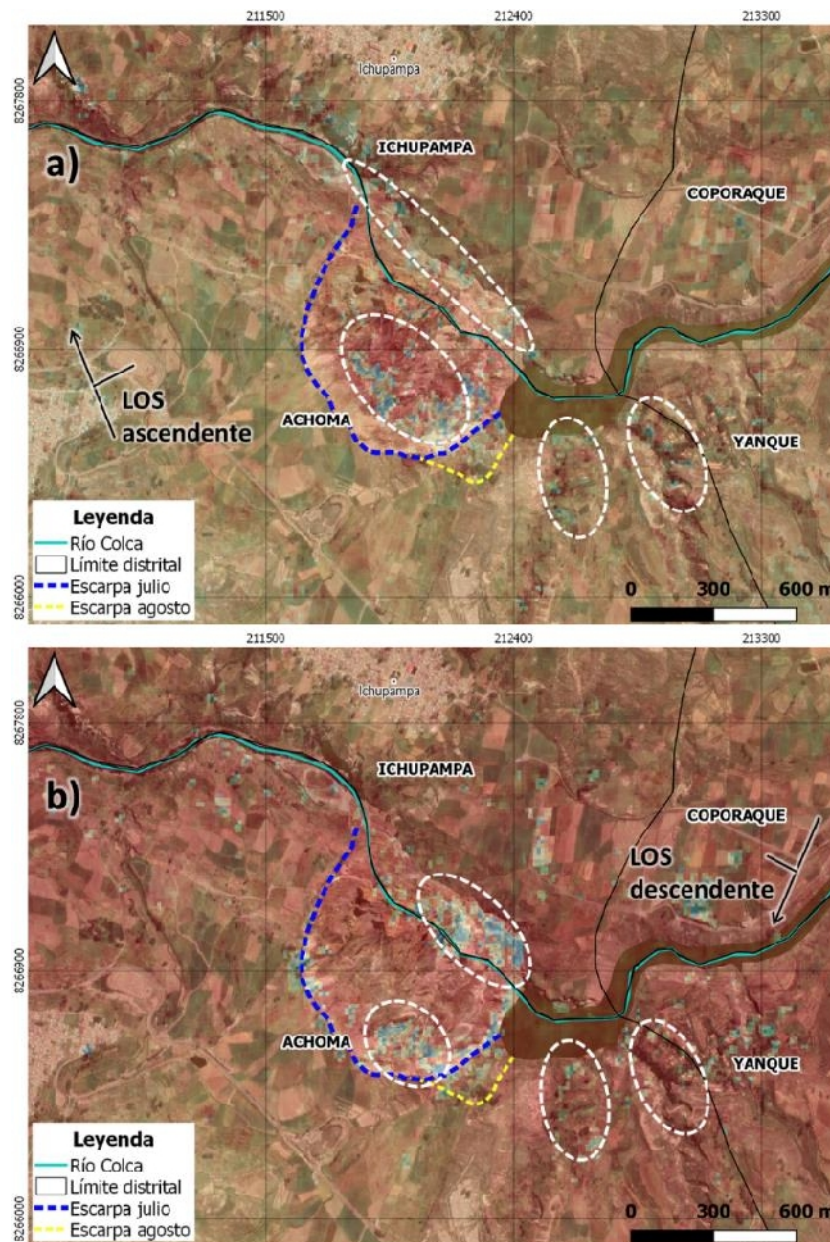


Figura 17: Interferograma obtenido a partir de imágenes de fechas del año 2020: a) 26 de julio y 19 de agosto (ascendente), b) 13 y 25 de agosto (descendente).

- *Interferograma (Figura 18a): usando imágenes de los días 18 y 30 de agosto, se observan la presencia de perturbaciones debido al derrumbe del 29 de agosto (círculo rojo) y persiste la alta probabilidad de que ocurran nuevos derrumbes (círculos blancos).*
- *Interferograma (Figura 18b): usando imágenes de los días 19 y 31 de agosto, se obtiene resultados consistentes con el interferograma anterior.*

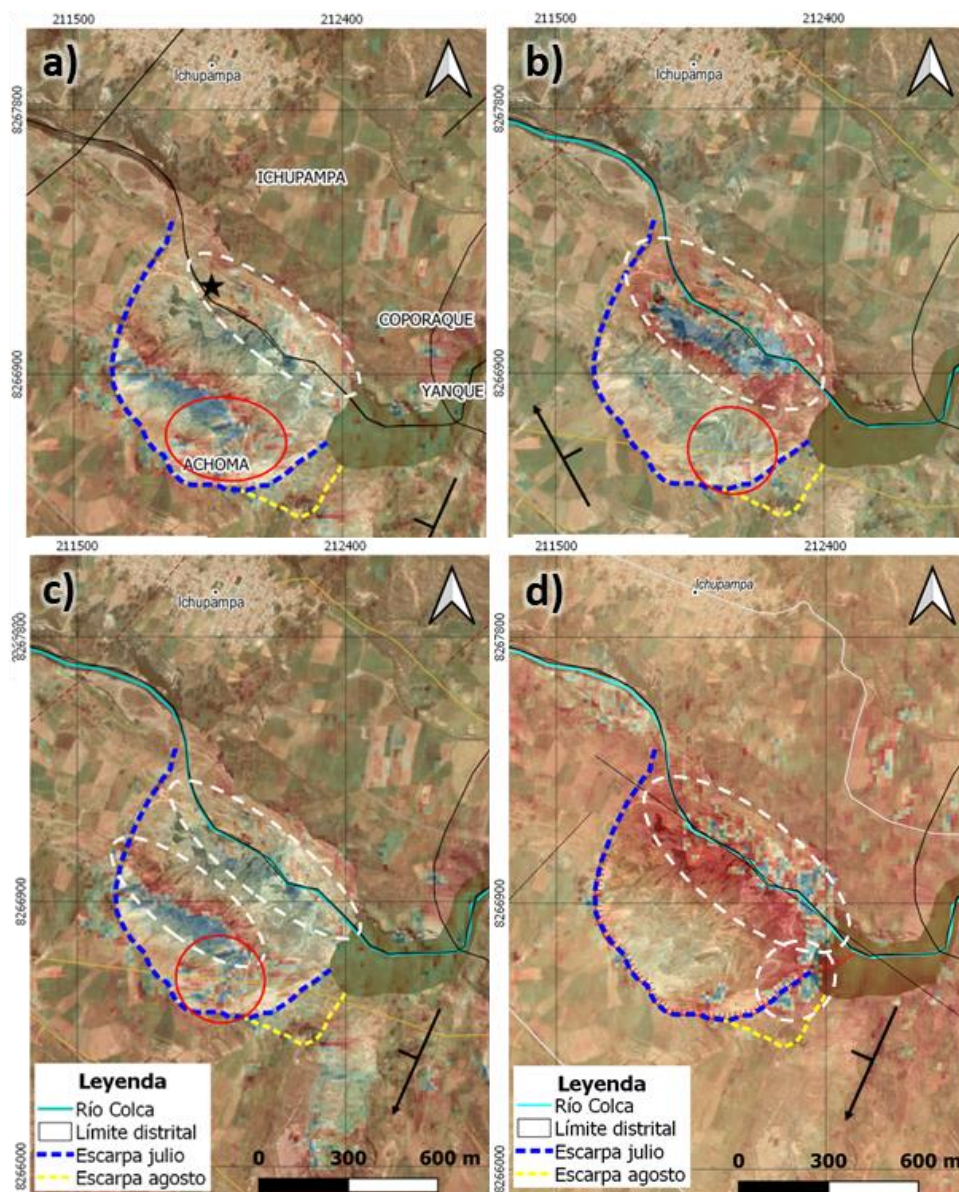


Figura 18: Interferogramas obtenidas a partir de imágenes de fechas del año 2020: a) 18 y 30 de agosto (descendente), b) 19 y 31 de agosto (ascendente), c) 25 de agosto y 06 de septiembre (descendente), d) 06 y 18 de septiembre (descendente).

- *Interferograma (Figura 18c): usando imágenes de los días 25 de agosto y 06 de septiembre se observa que persiste la alta probabilidad de que ocurran nuevos derrumbes (círculos blancos).*
- *Interferograma (Figura 18d), con uso de imágenes de los días 06 y 18 de septiembre, se observan anomalías en la zona trabajada para la apertura del desembalse y en el sector sureste del deslizamiento (círculos blancos).*

Por otro lado, utilizando el algoritmo de correlación cruzada, se ha realizado el análisis de intensidad de los interferogramas basado en el registro en píxeles de dos imágenes de radar SAR, a fin de observar la secuencia temporal de cambios topográficos y morfológicos en la zona afectada por el deslizamiento del 18 de junio de Achoma (Figura 19). En la Figura 19a se observa la intensidad de la imagen del 27 de mayo (antes del deslizamiento) y del 2 de julio posterior al evento (Figura 19b). En estas figuras se observa la escarpa del deslizamiento y el embalse del río Colca generado por dicho deslizamiento.

Las imágenes posteriores al 26 de julio (Figura 19c), evidencian el embalse del río Colca y de una zona en la parte media del deslizamiento correspondiente al dren aperturado para el desembalse. En la imagen del 19 de agosto (Figura 19d) se observa el derrumbe ocurrido ese mismo día y en la imagen del 31 de julio (Figura 19e), se observa la presencia de una sombra en el sector sureste del deslizamiento del 18 de junio que se asocia al derrumbe del 29 de agosto. Por último, en la imagen del 12 de septiembre (Figura 19f), se observa que el dren aperturado para el desembalse, es más ancho que en las imágenes anteriores.

En efecto, después de aproximadamente dos meses de haber ocurrido el deslizamiento de Achoma, el 18 de junio (línea discontinua azul en Figura

20), y a un mes del inicio del primer desembalse del río Colca, el 19 de agosto de 2020, en horas de la madrugada, ocurrió un nuevo derrumbe en el distrito de Achoma (Figura 20, línea discontinua de color amarillo).

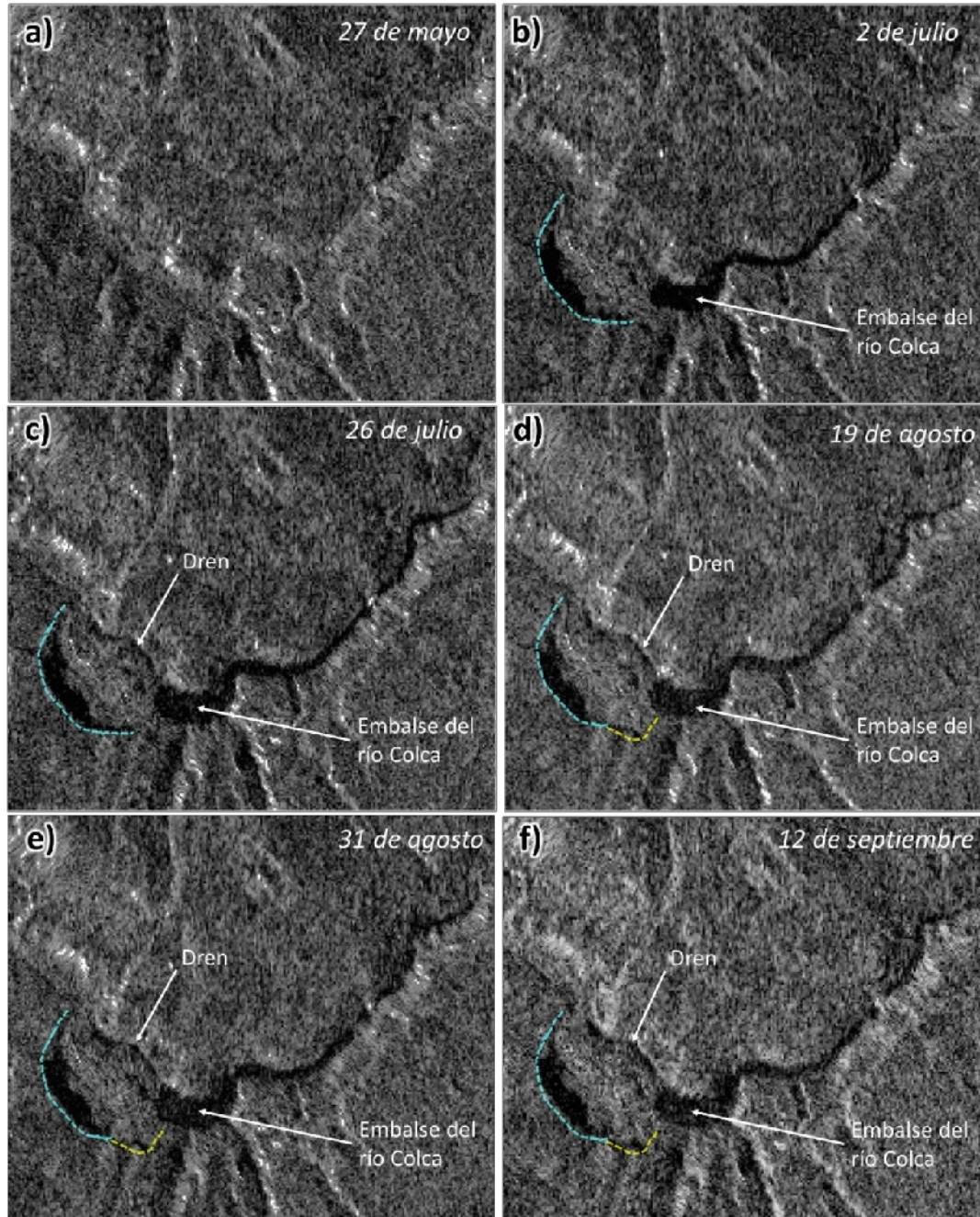


Figura 19: Intensidad de interferogramas de la zona del deslizamiento de Achoma obtenidos a partir de las imágenes de radar Sentinel-1 del año 2020: a) 27 de mayo, b) 2 de julio, c) 26 de julio, d) 19 de agosto, e) 31 de agosto, y f) 12 de septiembre. La escarpa del deslizamiento del 18 de junio es representada en líneas discontinuas celestes, y del derrumbe del 19 de agosto en líneas discontinuas amarillas.

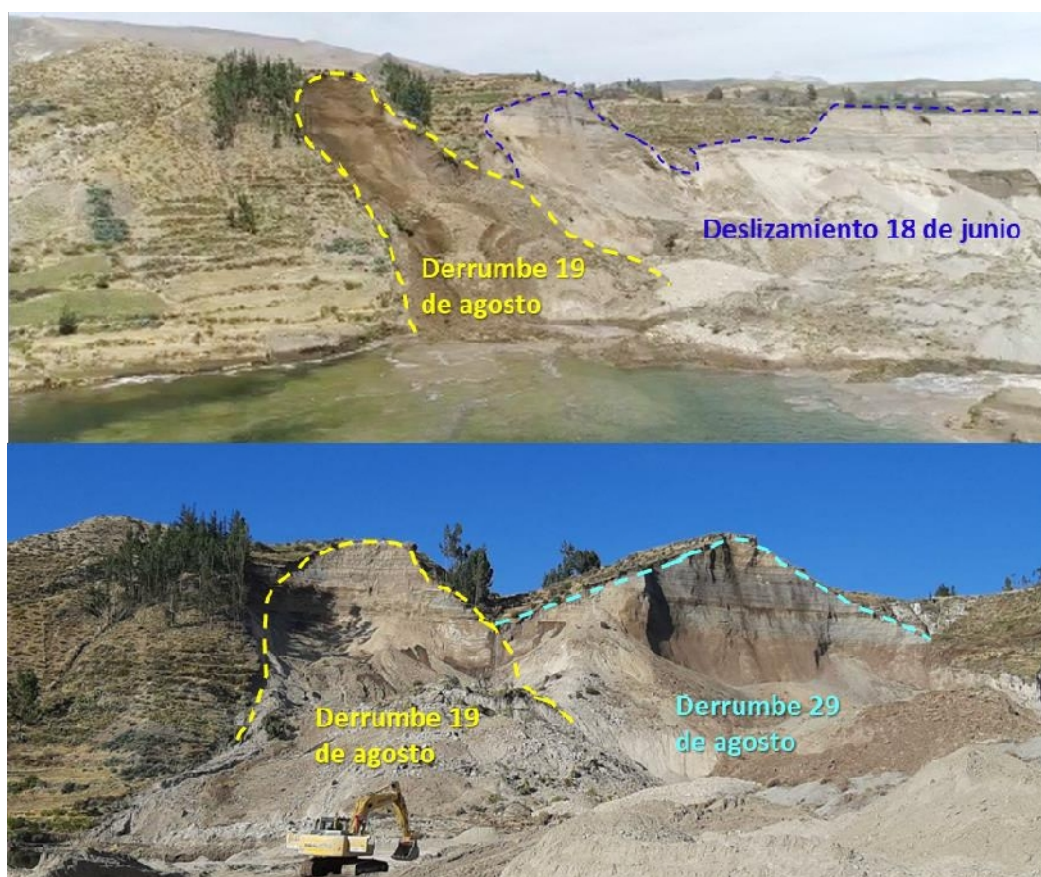


Figura 20: Vista de la zona afectada. El deslizamiento ocurrido el 19 de agosto es delimitado con una línea discontinua de color amarillo, mientras que derrumbe ocurrido el 18 de junio con línea discontinua de color azul, y el derrumbe del 29 de agosto con línea de color celeste.

Posteriormente, el 19 de agosto en horas de la mañana se deslizó un área de menor volumen de suelo y de una construcción en el mismo sector y que fue registrado y reportado por los pobladores (Figura 21).



Figura 21: Deslizamiento acaecido el 19 de agosto de 2020 en horas de la mañana.

Haciendo uso de las imágenes de radar obtenidas para este estudio, así como el modelamiento fotogramétrico (Figura 22a), las fotografías y videos recolectados en campo, se construyó un modelo del terreno para determinar las características del derrumbe ocurrido el 19 de agosto de 2020:

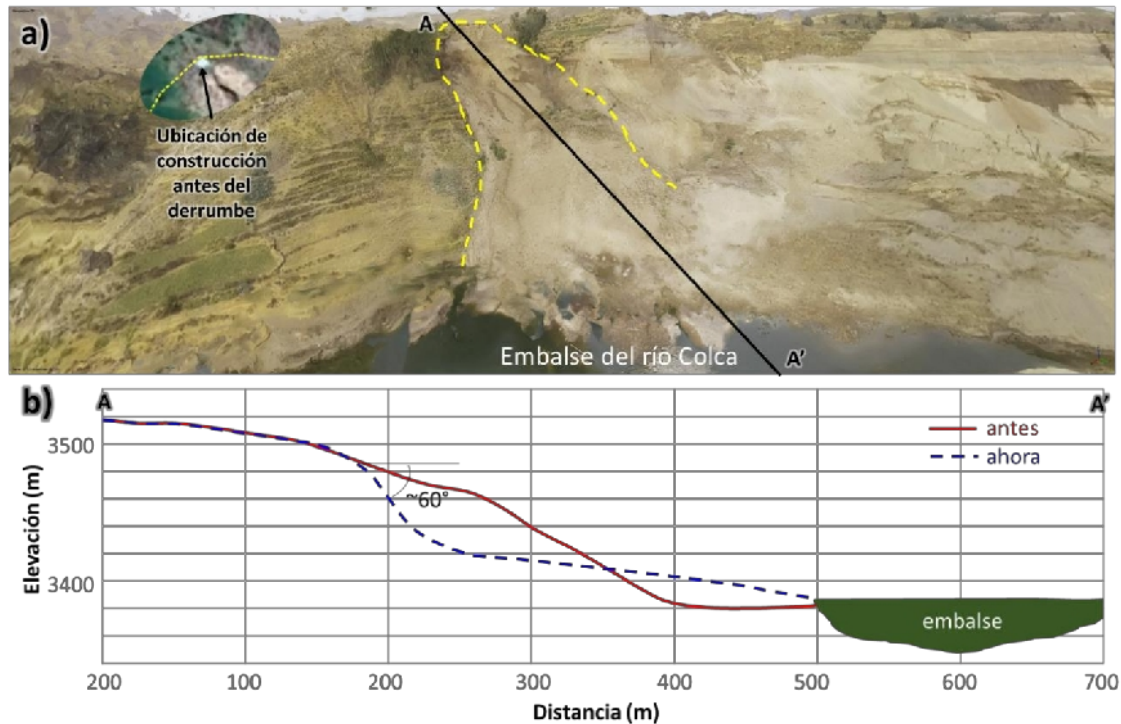


Figura 22: a) Modelo 3D del derrumbe ocurrido en Achoma el 19 de agosto de 2020, obtenido a partir de modelamiento fotogramétrico, b) Perfil en dirección suroeste a noreste. La línea roja, es la topografía antes del derrumbe y línea azul, después del mismo.

- La longitud de la escarpa principal fue calculada en ~200 m.
- El área de la nueva zona afectada es de ~3 hectáreas.
- La escarpa presenta una pendiente de 60° en dirección noreste (Figura 22b).
- La distancia alcanzada por el derrumbe fue de ~200 m llegando hasta el actual embalse del río Colca.

- *Se construyó la topografía del terreno antes del derrumbe (línea roja) y la topografía actual (línea azul), Figura 22b.*
- A partir del modelamiento realizado con el software TITAN2D, se calculó la velocidad del derrumbe ocurrido el 19 de agosto, siendo esta variable conforme avanza el material hacia el cauce del río Colca (Figura 23):
 - *A los 6 segundos (Figura 23b), el derrumbe alcanza una velocidad promedio de 14 m/s.*
 - *A los 12 segundos (Figura 23c), el derrumbe alcanza una velocidad promedio de 13 m/s.*
 - *A los 18 segundos (Figura 23d), el derrumbe alcanza una velocidad promedio de 2 m/s.*
 - *A los 24 segundos (Figura 23e), el derrumbe alcanza una velocidad promedio de 0.5 m/s.*
 - *A los 30 segundos (Figura 23f), el derrumbe ya no presenta velocidad.*

Estos resultados muestran que la mayor velocidad alcanzada por el derrumbe fue directamente proporcional a la pendiente del terreno. Mayor velocidad cerca de la escarpa y en pendientes menores, la velocidad decreció considerablemente.

Posteriormente, el 29 de agosto en la zona del deslizamiento de Achoma, ocurre un nuevo derrumbe en una de las paredes del sector SE del deslizamiento principal (Figura 24), lo cual evidencia que el terreno continúa

inestable. En efecto, la humedad del suelo evidencia la alta influencia de las aguas subterráneas que desestabilizan los taludes en la zona del deslizamiento y en algunos sectores del valle del Colca.

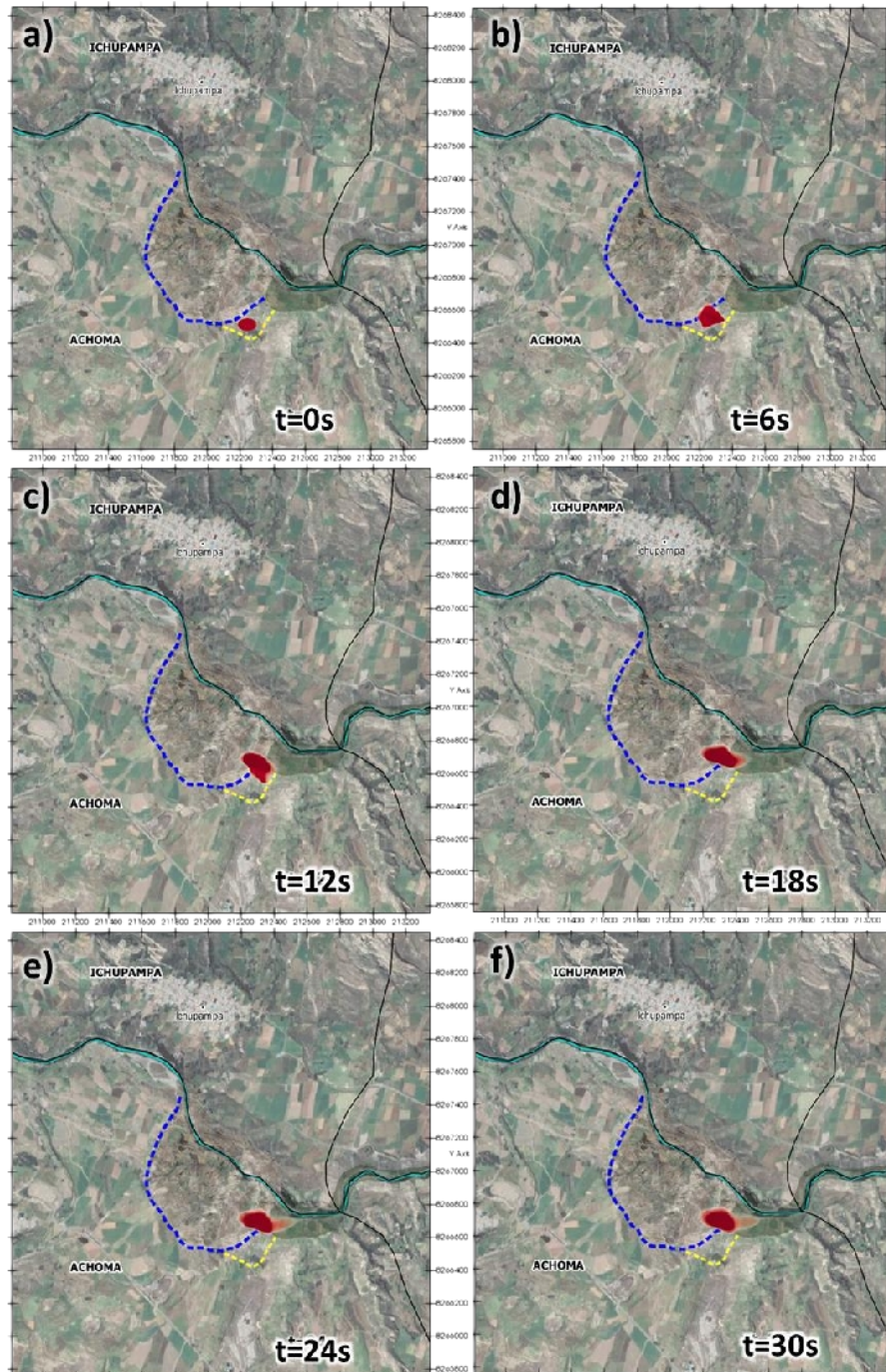


Figura 23: Resultados de velocidad de propagación del derrumbe del 19 de agosto en Achoma obtenidos con el software Titan 2D. En la imagen, se observa el avance del material a diferentes tiempos: a) 0 segundos, b) 6 segundos, c) 12 segundos, d) 18 segundos, e) 24 segundos, f) 30 segundos.



Figura 24: Derrumbe ocurrido el 29 de agosto en una de las paredes del deslizamiento de Achoma del 18 de junio.

3.4.- Zona de Yanque – Coporaque

Esta zona está localizada en el extremo oriental de nuestra zona de estudio (Figura 1) y en ella se identifica la presencia de una gran escarpa entre las localidades de Yanque y Coporaque (Figura 25).



Figura 25: Vista de los poblados de Yanque y Coporaque, entre ellos se distingue una gran escarpa ligada a un deslizamiento antiguo.

El análisis de los interferogramas obtenidos de imágenes satelitales muestra, que entre los años 2015 a 2020, no existían anomalías asociadas a la inestabilidad del terreno en la zona comprendida entre las localidades de Yanque y Coporaque (Figura 26).

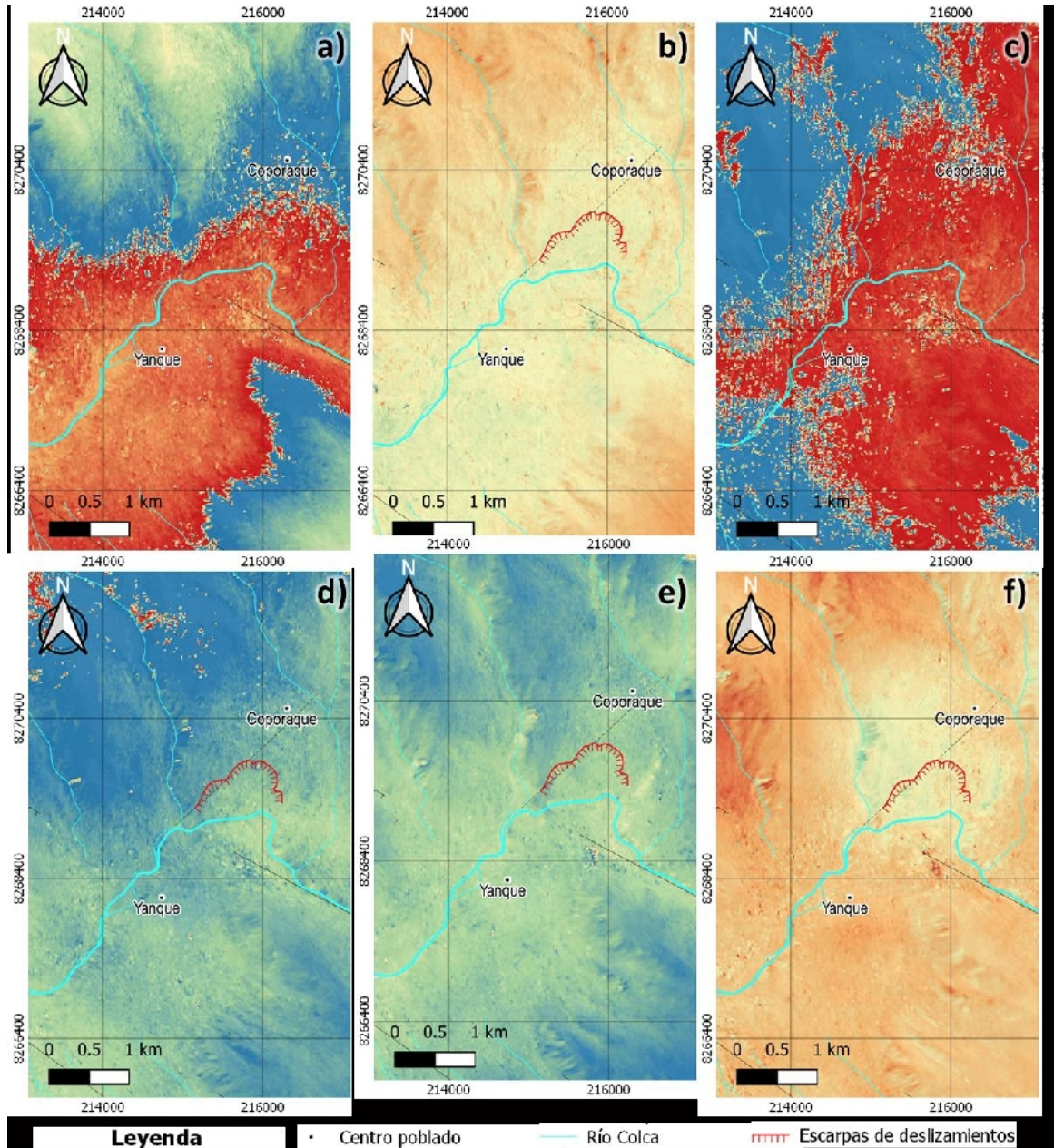


Figura 26: Interferogramas de la zona Yanque – Coporaque obtenidos a partir de imágenes satelitales de fechas: a) 17 de mayo y 11 de julio del 2015, b) 5 y 29 de julio de 2016, c) 6 y 30 de julio de 2017, d) 13 y 25 de julio de 2018, e) 8 y 20 de julio de 2019, y f) 25 de agosto y 06 de septiembre de 2020.

4. ESCENARIOS PROBABLES EN ZONAS SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, en la zona del valle del Colca con presencia de taludes verticales y terrenos conformados de depósitos de avalancha, aluviales, coluviales y sedimentos detríticos poco o no consolidados, representan ser un peligro latente para la ocurrencia de procesos de movimientos en masa, como deslizamientos o derrumbes. En este estudio y en base a la técnica de interferometría, se han identificado tres zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y derrumbes de suelos (Figura 27, círculos amarillos) y sus características son:

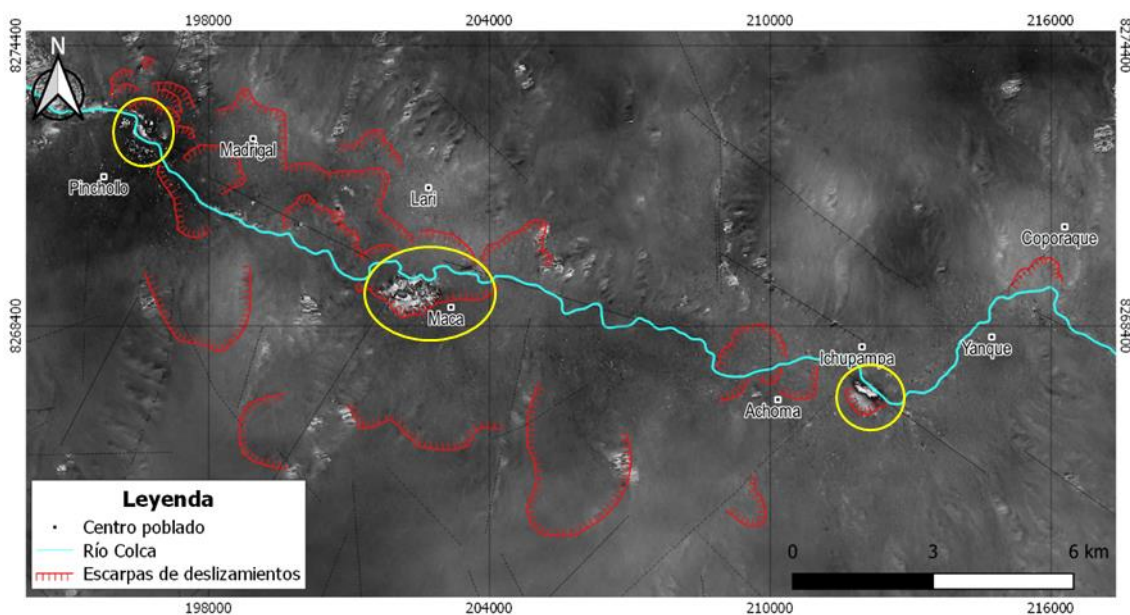


Figura 27: Zonas inestables identificadas en el cañón del Colca a partir de la técnica de interferometría utilizando imágenes de radar recientes del 25 de agosto y 06 de septiembre (intensidad del interferograma). En círculos amarillos, las zonas inestables identificadas en los distritos de Madrigal, Maca y Achoma.

- La zona identificada se encuentra entre los poblados de Pinchollo y Madrigal y corresponde a una zona anómala no recurrente en todos los interferogramas; por lo tanto, existe una baja probabilidad de producirse un deslizamiento o derrumbe, siendo necesario seguir monitoreando.

- La anomalía asociada a la inestabilidad de suelos en la zona de Maca, se observa desde el año 2015 y persiste a la fecha; por lo tanto, existe una alta probabilidad de ocurrir un deslizamiento similar o menor al derrumbe de Achoma del 18 de junio de 2020. Se debe considerar que la zona anómala muestra mayor extensión con respecto al derrumbe de Achoma.

Asimismo, el derrumbe ocurrido el 24 de agosto de 2020 en la carretera Maca - Cabanaconde, representa menos del 1 % del área total de la zona anómala identificada en este estudio. En este caso se propone dos escenarios futuros: (1) continuarán ocurriendo derrumbes y/o deslizamientos por sectores que involucran áreas pequeñas y/o (2) ocurrirá un deslizamiento de gran magnitud involucrando a las 86 hectáreas que comprenden la zona anómala. En este último escenario se produciría un eventual embalse del río Colca, con la consecuente pérdida de terrenos de cultivo, tramos de carretera Maca - Cabanaconde, etc.

Por otro lado, la pequeña zona anómala identificada al noreste de la localidad de Maca, no es recurrente en todos los interferogramas, pero debe ser monitoreada periódicamente. Finalmente, en la Figura 28, se muestra con línea roja discontinua una antigua escarpa de derrumbe, lo cual muestra que en la zona del valle del Colca son comunes la ocurrencia de derrumbes y deslizamientos.

- La zona anómala visible en la localidad de Achoma persiste mostrando la inestabilidad del terreno. De acuerdo a la topografía de la escarpa del deslizamiento de Achoma, se tienen alta probabilidad de continuar derrumbándose debido a que los suelos continúan aún saturados de agua. Asimismo, los taludes del embalse pueden continuar derrumbándose por sectores, ya que sus bases continúan húmedos o saturados de agua. Del mismo modo, el represamiento del río Colca también representa un peligro para las zonas ubicadas aguas arriba.



Figura 28: Zonas inestables identificadas en ambas márgenes del valle del río Colca.

En general, ambas riberas del río Colca presentan pendientes elevadas y es evidente que están humedecidas debido a la presencia del embalse (Figura 29), y que ya generaron algunos derrumbes en su margen derecha. La humedad presente en la base de los taludes es un factor que genera la inestabilidad de suelos en la zona, por lo cual seguirán produciendo nuevos deslizamientos y derrumbes.

Por ejemplo, aguas arriba del embalse, se ha reportado el debilitamiento del puente colonial Cervantes (Figura 30) y la presencia de algunos agrietamientos en la plataforma de la carretera cercana al puente Chacapi que une a las localidades de Chivay con Ichupampa (Figura 30b). Esta zona comprende un área muy pequeña para ser parte del análisis con interferometría, pero en la Figura 30c, se observa la presencia de una zona anómala de unos cuantos píxeles; por tal motivo, se debe continuar con los trabajos de desembalse del río Colca a la brevedad.



Figura 29: Vista de la zona del embalse, en la cual algunos taludes vienen presentando inestabilidad y existe posibilidad a que se produzcan nuevos deslizamientos o derrumbes.

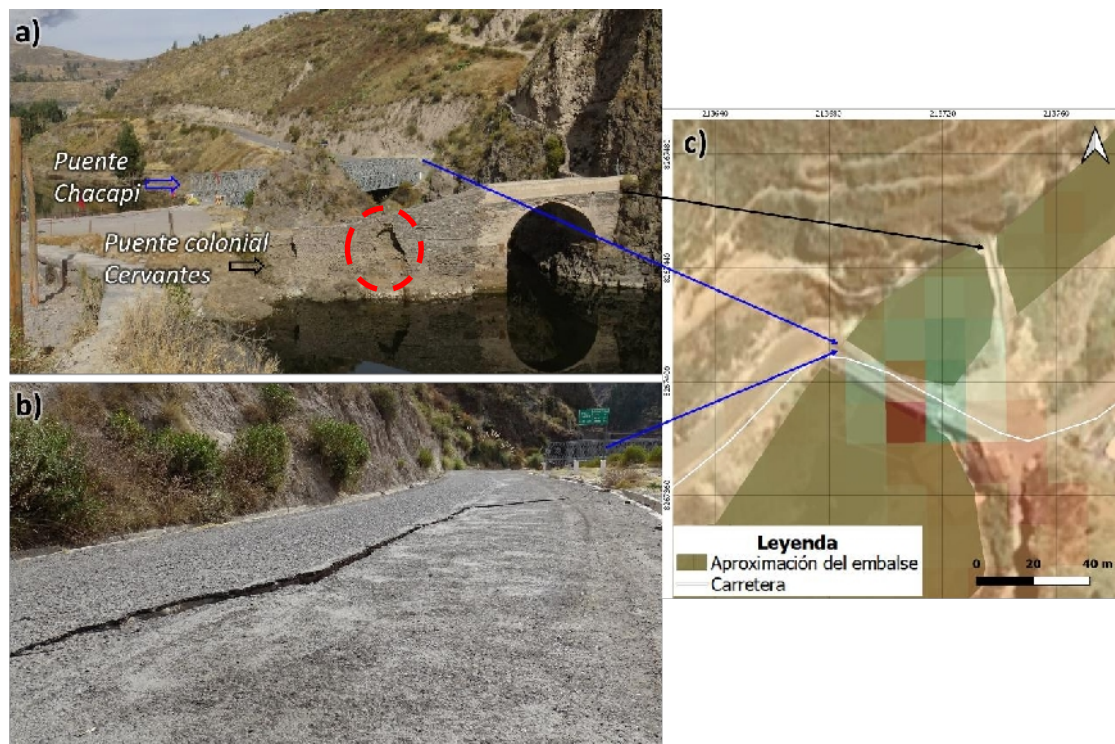


Figura 30: a) Puente colonial Cervantes (adelante) y puente Chacapi (detrás), b) agrietamientos en la carretera Ichumpampa - Chivay, c) ubicación de ambos puentes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones del presente estudio son:

- El valle del Colca, principalmente en la zona comprendida entre las localidades de Pinchollo y Yanque, es susceptible a la ocurrencia de deslizamientos, derrumbes, etc. Esto es debido a que los suelos están compuesto por sedimentos poco o no endurecidos, además de escarpas con pendientes elevadas, saturación de los suelos con agua de filtración, presencia de fallas geológicas, ocurrencia de sismos, entre otros.
- La zona anómala identificada entre los poblados de Pinchollo y Madrigal, no es recurrente en todos los interferogramas analizados; por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de derrumbes o deslizamientos es moderada; sin embargo, se recomienda continuar con su monitoreo.
- La zona anómala asociada a la inestabilidad de suelos en Maca es persistente desde el año 2015 y en la actualidad ocupa un área mucho más extensa (~86 hectáreas). El derrumbe ocurrido el 24 de agosto de 2020 afectó un área aproximada de 0.2 hectáreas, correspondiendo al 1 % de la zona anómala; por lo tanto, existe alta probabilidad de ocurrencia de derrumbes y/o deslizamientos de tierra por sectores pequeños, y/o un deslizamiento de gran magnitud que involucraría toda la zona anómala. En este último escenario, se produciría un eventual embalse del río Colca, y la pérdida de terrenos de cultivo, tramo de la carretera Maca - Cabanaconde, etc. Se recomienda realizar un nuevo trazo para la carretera Maca – Cabanaconde por una zona alejada de la zona de alto riesgo.

- En Achoma, se ha identificado la presencia de zonas anómalas con terrenos inestables en la misma área afectada por el gran deslizamiento ocurrido el 18 de junio de 2020. Asimismo, se ha identificado la presencia de una nueva escarpa de ~200 m de longitud en forma de arco en la misma área afectada por el derrumbe ocurrido el 19 de agosto de 2020. De acuerdo a este escenario, existe una alta probabilidad de que ocurran derrumbes en la escarpa indicada y en ambos márgenes del dren aperturado para el desembalse.

- En las zonas identificadas en este estudio y en los terrenos contiguos al embalse del río Colca (Achoma), existe una alta posibilidad de que ocurran deslizamientos y derrumbes debido a que los suelos están saturados de agua. Este factor fue uno de los condicionantes principales para los eventos suscitados el 18 de junio, y el 19 y 29 de agosto de 2020. Por tal motivo, se recomienda a los pobladores y autoridades mejorar los sistemas de regadío, asesorados por profesionales en la materia. No es apropiado emplear la técnica de regadío por inundación, ya que ello genera a largo plazo saturación de suelos y por ende la inestabilidad del terreno. Asimismo, es necesario continuar con la limpieza del drenaje a fin de desaguar el agua embalsada del río Colca.

REFERENCIAS

- Araujo, G. E., Huarez, C. M., Taipe, E. L., & Miranda Cruz, R. (2017). *Estudio geológico, geodinámico y monitoreo geodésico del deslizamiento de Madrigal. Distrito Madrigal, provincia Caylloma, región Arequipa.*
- Gaidzik, K., Żaba, J., & Ciesielczuk, J. (2020). *Tectonic control on slow-moving Andean landslides in the Colca Valley, Peru. Journal of Mountain Science, 17(8), 1807-1825.*
- García, W. (1966). *Deslizamiento en el cerro Quehuísa en los distritos de Lari y Madrigal. Boletín, 13, 88-93.*
- Huamán, D. (1995). *Métodos y aplicaciones de las imágenes de satélite en la cartografía geológica: el caso del seguimiento y evolución de la amenaza volcánica del Sabancaya (región del Colca, Arequipa, Perú). Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 138 p.*
- Huamán, 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). Bulletin Société Géologique de France, 164(6): 807-818.*
- Klinck, B.A., Ellison, R.A., Hawkins, M.P., Palacios, O., De la Cruz, J.S. & De la Cruz, N.S. (1986). *Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al oeste del Lago Titicaca. Sur del Perú. INGEMMET. Bol. Serie A: Carta Geológica Nacional, v. 42, 253 p.*
- Mering, C., Huamán, D., Chorowicz, J., Deffontaines, B. & Guillaude, R. (1996). *New data on the geodynamics of southern Perú from computerized analysis of SPOT and SAR ERS-1 images. Tectonophysics, 259 (1-3): 153-169.*
- Patra, A., Bauer A., Nichita, C., Pitman, E.B., Sheridan, M. F. Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. And Renschler, C. (2005). *Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139:1-21.*
- Pitman, E.B., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M.F., Bursik, M.I. (2003). *Computing debris flow and landslides. Physics of Fluids 15, 3638-3646.*
- Quispesivana, L. & Navarro, P. (2003), *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Caravelí (32-p), Chuquibamba (32-q), Chivay (32-s), Cailloma (31-s), Velille (30-s), Livitaca (29-s) y Pacapausa (30-*

- p). Escala 1:100 000; Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Regional.*
- Sébrier, M., Mercier, J., Mégard, F., Laubacher, G., Carey- Gailhardis, E. (1985). Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. Tectonics, 7, 895-928.*
- Schildgen, T.; Hodges, K.; Whipple, K.; Pringle, M.; van Soest, M.; Cornell, K. (2009). Late Cenozoic structural and tectonic development of the western margin of the central Andean Plateau in southwest Perú. Tectonics 28: 21 p.*
- Stinton, A. J., Sheridan, M.F., Patra, A., Dalbey, K., & Namikawa, L.M. (2004). Integrating variable bed friction into TITAN2D mass-flowmodel: application to the Little Tahoma Peak avalanches. Washington. Acta Vulcanol. 16, 153-163.*
- Tavera, H. (2016). Análisis de los Principales Peligros Naturales en el Valle del Colca – Arequipa. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.*
- Thouret, J.C., Wörner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., Souriot, T. (2007). Geochronologic ad stratigraphic constrains on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. Earth and Planetary Science Letters 263: 151-166.*
- Thouret J.-C., Mariño J., Davila J., Rivera M., Fuvigne E., Loutsch I. (2008). Erupciones explosivas durante el Pleistoceno tardío y Holoceno en el sur del Perú, Proyecto Tefro - estratigráfico del sur del Perú TESSOPE.*
- Vargas, K., Rivera, M., Villegas, J., Martínez, J., Tavera, H., Arapa, E., Cruz, J., Puma, N., Torres, J., (2020) Evaluación geofísica del deslizamiento ocurrido el 18 de junio de 2020 en el distrito de Achoma. Instituto Geofísico del Perú.*
- Yanqui, C. (1983). Geotecnia del deslizamiento de Lari. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 72, p. 287-299.*
- Zavala, B. L., Vilchez, M. S., & Rosado, M. (2009). Aspectos geodinámicos en los distritos de Lari, Madrigal y Maca. Provincia Cailloma, región Arequipa. Informe Técnico N° 6513 INGEMMET.*
- Zavala, B. Mariño, J. Lacroix, P. Taipe, E. Benavente, C. Pari, W. Macedo, L. Peña, F. Paxi, R. Delgado, F. Fidel, L. Tatard, L. (2012), Evaluación de la seguridad física del distrito de Maca- Estudios geológicos, geofísicos y monitoreo de movimientos en masa, Informe Técnico, INGEMMET, 160p.*