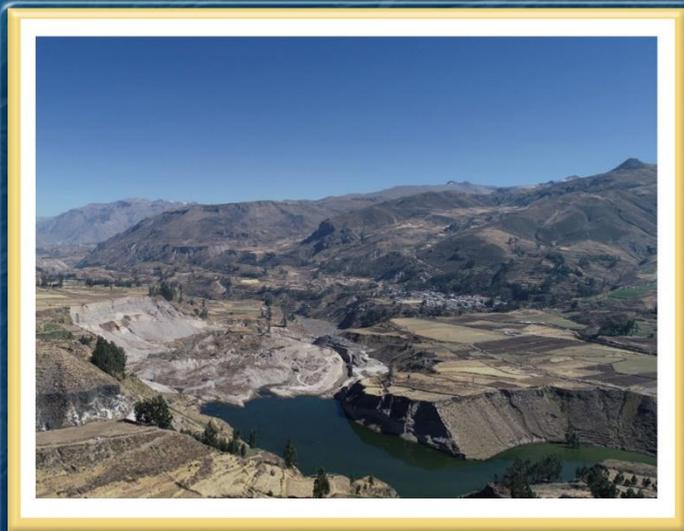


DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGO GEOLÓGICO

Informe Técnico N° A7129

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA

Región Arequipa
Provincia Caylloma
Distrito Achoma



MARZO
2021

Informe Técnico Nro. A7129

MONITOREO DEL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA

Distrito de Achoma
Provincia de Caylloma
Región Arequipa

ACT14: Estudio y Monitoreo de Movimientos en Masa en el Perú

Equipo Técnico

Joseph Huanca Cárdenas
Domingo Ramos Palomino
Rafael Miranda Cruz
Edu Taipe Maquerhua
Rosa Ancasí Figueroa

MARZO – 2021


.....
Ing. Edu Luis Taipe Maquerhua
COORDINADOR DEL OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO INGEMMET - OVI

CONTENIDO

RESUMEN	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. OBJETIVOS	5
1.3. UBICACIÓN	5
1.4. CONTEXTO GEOLÓGICO	6
1.5. CONTEXTO TECTÓNICO	8
2. RED DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICO.....	9
2.1. MONITOREO GEODÉSICO	10
2.2. MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO.....	11
2.3. MONITOREO SÍSMICO	12
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	14
3.1. MONITOREO DE DEFORMACIÓN.....	14
3.2. MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO.....	16
3.3. SISMICIDAD ASOCIADA AL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA.....	17
3.4. FACTORES EXTERNOS	20
3.4.1. PRECIPITACIONES PLUVIALES	20
3.4.2. ACTIVIDAD SISMOTECTÓNICA.....	22
4. DISCUSIÓN.....	23
4.1. SITUACIÓN GEODINÁMICA ACTUAL.....	23
4.2. SITUACIÓN GEODINÁMICA FUTURA DE LA ZONA EN PELIGRO.....	24
CONCLUSIONES	25
RECOMENDACIONES	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
ANEXOS	29

RESUMEN

El presente informe técnico tiene por finalidad dar a conocer la actividad del deslizamiento de Achoma a través de la información que proveen nuestras redes de monitoreo geodésico, monitoreo sísmico y los productos fotogramétricos multitemporales obtenidos para el periodo comprendido entre junio de 2020 y enero de 2021. Además, advierte sobre la determinante influencia que la precipitación y la sismicidad ejerce sobre el proceso evolutivo del deslizamiento.

Los resultados obtenidos del monitoreo pusieron en evidencia la actividad del deslizamiento de Achoma, el cual presenta cambios morfológicos importantes tanto en el cuerpo como en la escarpa principal. Así mismo, se ha determinado que los factores acelerantes del deslizamiento están relacionados a las intensas precipitaciones pluviales (temporada lluviosa) que ha provocado el incremento de la saturación del terreno (producto de la infiltración de agua de lluvia); al socavamiento del río Colca al pie del deslizamiento; a la actividad sísmica local muy activa y la actividad antrópica (malas prácticas de riego y uso de canales no revestidos).

Por lo tanto, el deslizamiento de Achoma, constituye una Zona Crítica de Muy Alto Peligro y en peligro inminente, ya que, debido a sus características geológicas, geomecánicas y a los factores externos antes mencionados, este deslizamiento puede acelerar su actividad y volver a represar el río Colca, así como también continuar afectando terrenos de cultivo e infraestructura ubicados en el área.

1. INTRODUCCIÓN

El valle del Colca, es considerado como una zona de alta a muy alta susceptibilidad a deslizamientos, derrumbes y erosión fluvial en las márgenes de quebradas (Zavala et al., 2012). Así, el 18 de junio del 2020, a la 01:42 a.m. tuvo lugar un gran deslizamiento de tierra de tipo rotacional en el Valle del Colca, distrito de Achoma, región Arequipa. Como consecuencia de este fenómeno geológico, un área de 40 hectáreas de terreno de cultivo se deslizó en dirección al río Colca formando un dique natural y provocando su represamiento (Vela y Taipe, 2020).

A fin de prever y reducir el impacto destructor, el Gobierno Regional de Arequipa (GORE-Arequipa) solicitó monitorear el área de influencia de este peligro geológico (Of. N° 302-2020-GRA/ORDNDC). Y, Ante los trabajos de emergencia para aperturar el represamiento del río Colca, el GORE-Arequipa solicitó un monitoreo periódico de este proceso (Of. N° 411-2020-GRA/ORDNDC). Estas solicitudes fueron atendidas oportunamente con la implementación de estaciones de monitoreo y la emisión de reportes semanales mediante la actividad “ACT14: Estudio y Monitoreo de Movimientos en Masa en el Perú”, de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET.

En esta oportunidad, en respuesta a una nueva solicitud del GORE-Arequipa (Of. N° 093-2021-GRA/GGR/ORDNDC), se ha elaborado el presente informe sobre el monitoreo geodésico, fotogramétrico y sísmico del deslizamiento de Achoma.

1.1. ANTECEDENTES

Después de ocurrido el deslizamiento de Achoma el INGEMMET emitió 2 informes técnicos hasta la fecha.

- En junio de 2020 se emitió el primer informe técnico N° A7066: “Deslizamiento de Achoma ocurrido el 18 de junio del 2020”, el cual sirvió de sustento para la declaratoria de estado de emergencia de los distritos afectados. Este estudio describe ampliamente los acontecimientos ligados a este deslizamiento. Además, señala que la zona de Achoma se encuentra en una Zona de Peligro Muy Alto, debido a las características geológicas del suelo, y la humedad e infiltraciones de agua, que lo dispone a procesos de movimientos en masa. Asimismo, señala que los factores desencadenantes tales como: sismos excepcionales, sismos continuos, precipitaciones intensas y/o actividad antrópica, pueden provocar el futuro avance del deslizamiento y agrietamientos. En consecuencia, entre otras recomendaciones, sugiere implementar sistemas de monitoreo permanente del deslizamiento de Achoma.

- En enero de 2021 se emitió un segundo informe técnico de peligros geológicos que incluyen las inmediaciones del deslizamiento de Achoma. Informe Técnico N° A7115: “Evaluación de Peligros Geológicos por Movimientos en Masa en los Distritos de Achoma (Sector Collpane), Yanque (Sector Chacapi), e Ichupampa (Sectores Anansaya, Urinsaya y Linde)”. En este estudio se concluye que los sectores Collpane, Chacapi, Anansaya y Urinsaya son consideradas de Muy Alto Peligro; y el sector Linde de Alto Peligro. Estos sectores pueden presentar reactivaciones de movimientos en masa, entre ellos deslizamientos, que pueden ser detonados por lluvias intensas y movimientos sísmicos.

1.2. OBJETIVOS

- Dar a conocer el estado de actividad del deslizamiento de Achoma.
- Informar sobre la importancia de la influencia de la precipitación y la sismicidad en la geodinámica del deslizamiento de Achoma.

1.3. UBICACIÓN

El deslizamiento de Achoma se encuentra en la margen izquierda del río Colca a una altitud entre 3310 y 3460 msnm, en el distrito de Achoma, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa (figura 1).

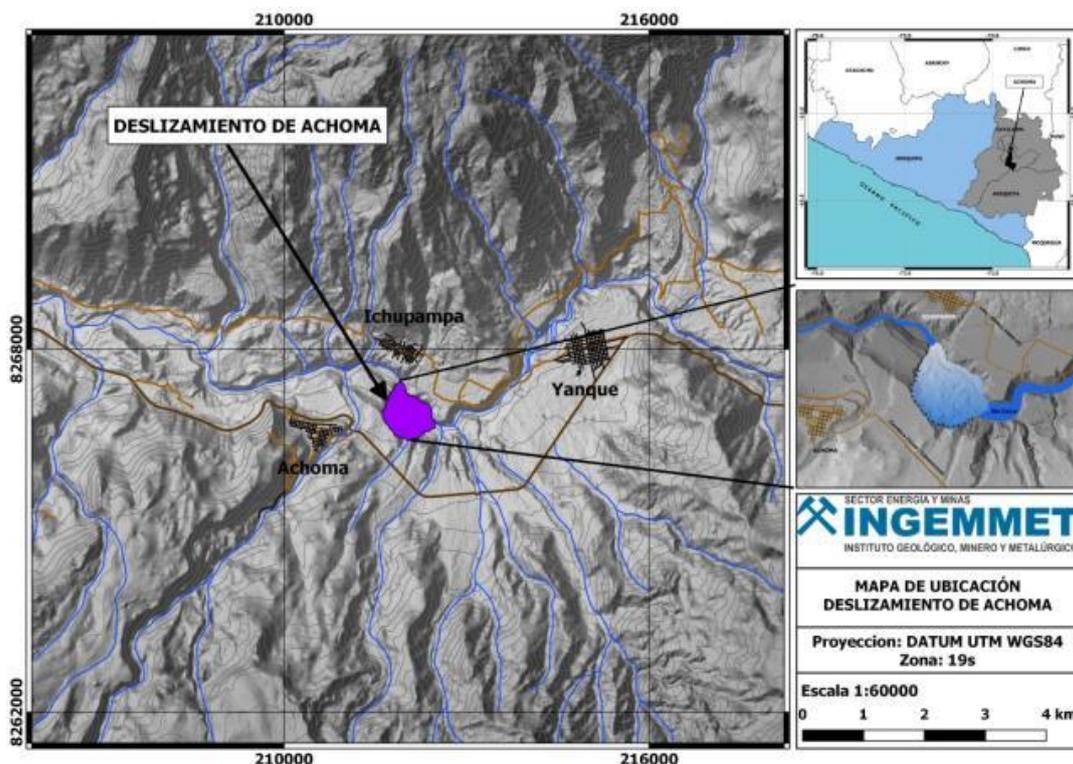
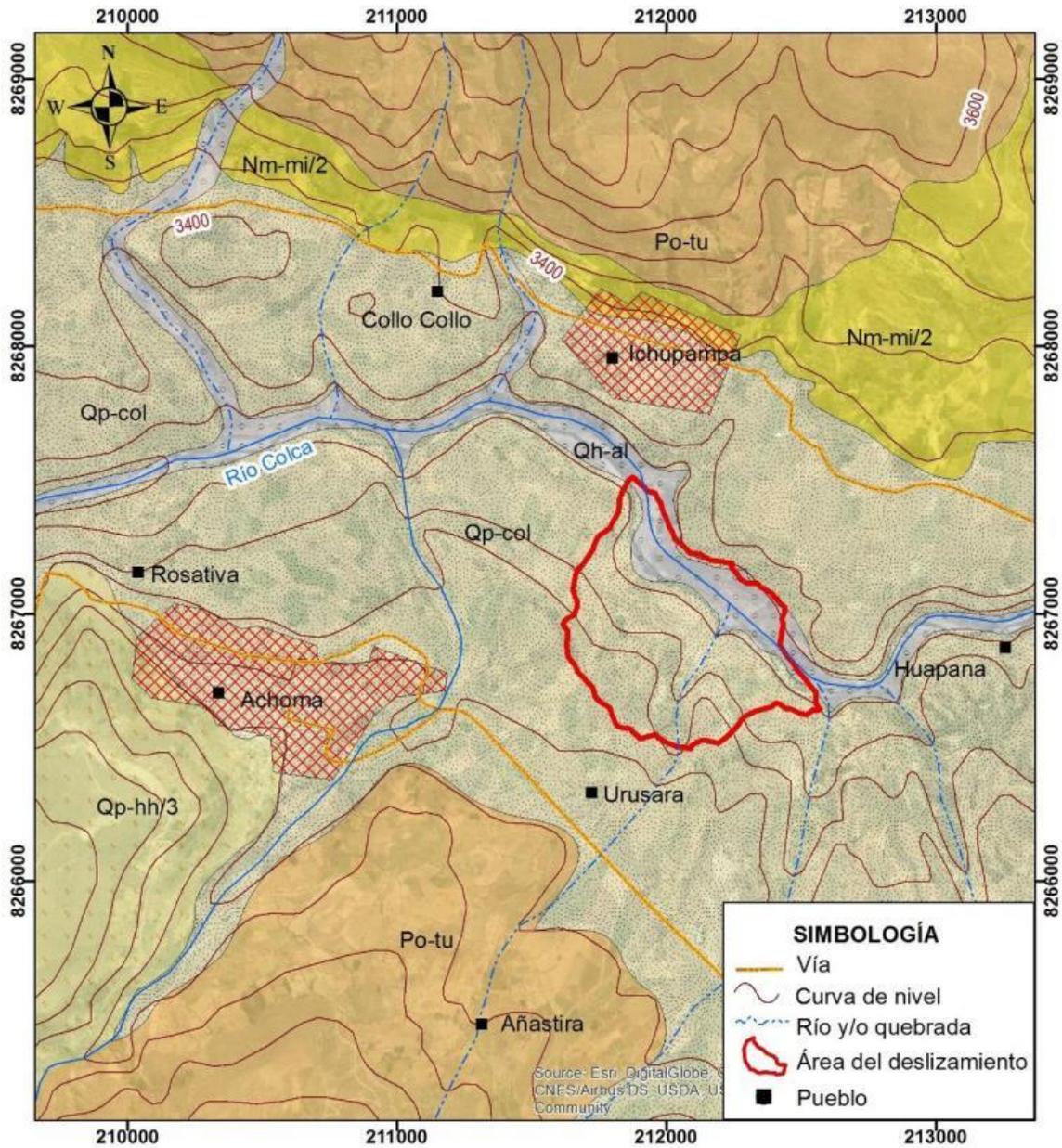


Figura 1. Localización del área de estudio

1.4. CONTEXTO GEOLÓGICO

Las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio, son rocas volcánicas del Paleógeno y Neógeno, y rocas sedimentarias del Cuaternario, así tenemos:

- **Unidad Tuti (Po-tu):** Conformado por flujos de lava gris oscuro y depósitos piroclásticos de cenizas, de color gris. Tienen un espesor aproximado de 1000 m (Cerpa y Paniagua, 2009).
- **Centro volcánico Mismi (Nm-mi/2):** Son secuencias volcanoclásticas con intercalaciones de cenizas blanquecinas en capas de 5 a 10 cm y sedimentos volcanoclásticos gris blanquecinos con cristales retrabajados (Cerpa y Paniagua, 2009).
- **Formación Colca (Qp-col):** Son intercalaciones de limoarcillitas finas y laminadas, y areniscas de color gris con laminaciones paralelas y oblicuas. Hacia el tope presentan conglomerados polimícticos con diámetros que varían entre 1 a 5 cm, de formas subredondeados a redondeados. Esta secuencia sedimentológica, que corresponde a un medio lacustre, se encuentra en la mayoría de los deslizamientos, derrumbes y reptación de suelos que ocurren en el valle del Colca (Zavala, et al., 2012).
- **Centro volcánico Hualca Hualca (Qp-hh/3):** Conformado por flujos de ceniza con cristales gris verdosos, y lavas andesíticas porfiríticas gris violáceas. Su espesor promedio es de 200 m (Cerpa y Paniagua, 2009). Los flujos de lava que afloran al oeste de Achoma (datado en 0.61 Ma), sobreyacen a los depósitos lacustres de la Formación Colca (Thouret et al., 2007).
- **Depósitos aluviales (Qh-al):** Se encuentran, a manera de terrazas, a lo largo del río Colca. Litológicamente están conformados por arena y limo en capas subhorizontales. Tienen espesores de 10 a 20 m (Cerpa y Paniagua, 2009).



Era-tema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Qh-al Depósito aluvial
		Pleistoceno	Qp-hh/3 Centro volcánico Hualca Hualca
			Qp-col Formación Colca
	Neógeno	Mioceno	Nm-mi/2 Centro volcánico Mismi
Paleógeno	Oligoceno	Po-tu Unidad Tuti	

INGEMMET SECTOR ENERGÍA Y MINAS INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO	
MAPA GEOLÓGICO SECTOR ACHOMA - CAYLLOMA - AREQUIPA	
Proyección UTM Datum WGS 84 Zona 18S	Escala 1:20,000 0 250 500 1,000 m

Figura 2. Mapa geológico de Achoma y alrededores (Tomado de Cerpa y Paniagua, 2009).

1.5. CONTEXTO TECTÓNICO

Próximos a la zona del estudio se ha identificado un extenso sistema de fallas activas y lineamientos (Figura 3): al oeste, el sistema de fallas Huambo-Cabanaconde, que está conformada por las fallas normales Trigal y Solarpampa y fallas subparalelas menores; al norte y noreste, las fallas normales Ichupampa y Yanque; y al sur y suroeste, la zona de fallas normales Hualca-Hualca, Mucurca-Ampato y lineamientos Sepina (Benavente et al., 2017; Sebrier et al., 1988; Mering et al., 1996 y Huamán-Rodrigo et al., 1993).

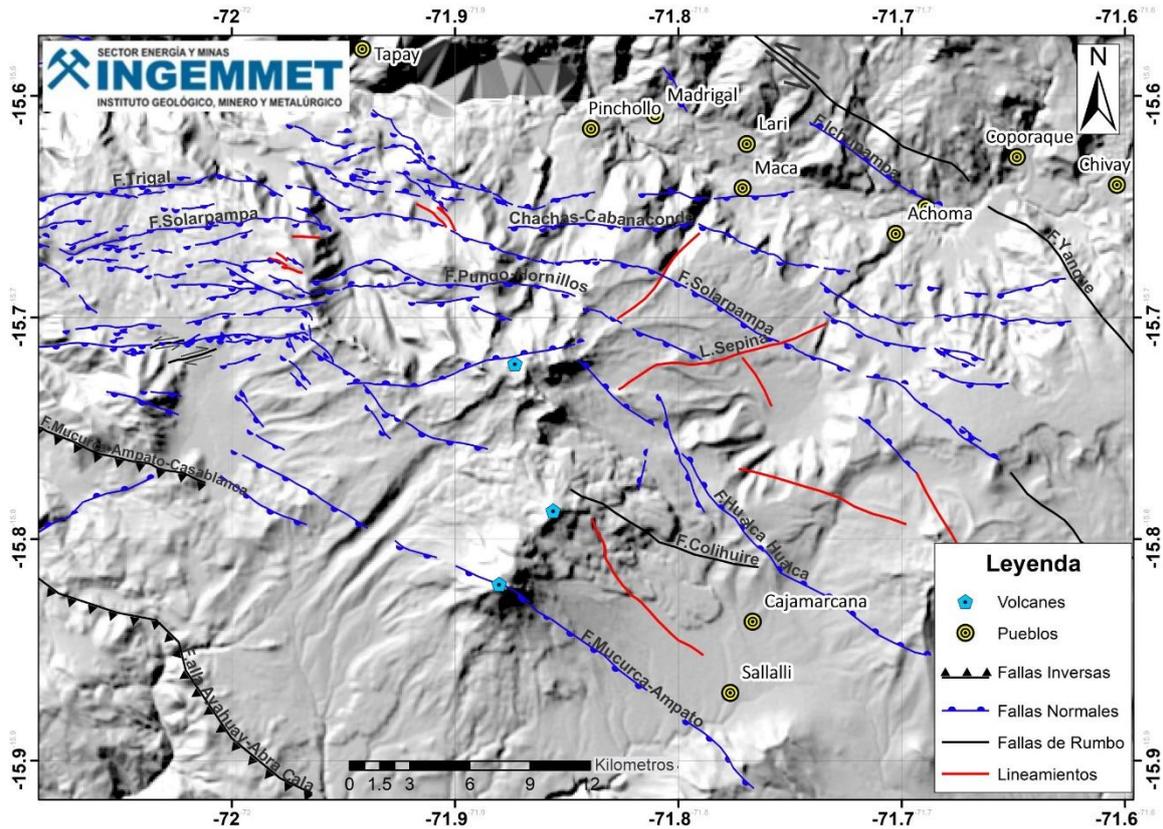


Figura 3. Fallas y lineamientos próximos a la zona de estudio

2. RED DE MONITOREO MULTIPARAMÉTRICO

En las inmediaciones del deslizamiento de Achoma se han construido 3 casetas de concreto (figura 4), para albergar los equipos que conforman la red de monitoreo geodésico y sísmico. Las estaciones están acondicionadas con paneles solares y baterías para garantizar el suministro eléctrico. La información registrada se transmite en tiempo real a través de internet hasta el centro de procesamiento en Arequipa.

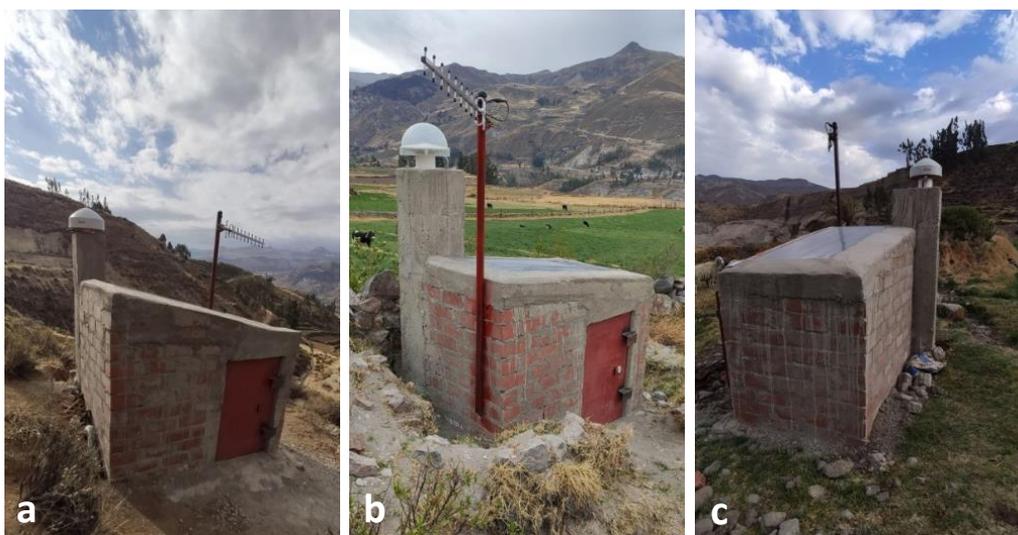


Figura 4. Casetas que albergan los receptores GNSS y los sismómetros. Caseta en el sector Collpane (a), Caseta en el sector Cotopampa (b) y Caseta en el sector Urasara (c)

La red de monitoreo geodésico cuenta con receptores GNSS permanentes: ACPE (Collpane), ACTP(Cotopampa) y AURS (Urasara). Así mismo, la red de monitoreo sísmico cuenta con 3 sismómetros codificados como: ACH01, ACH02 y ACH03 (figura 5).

Por otro lado, para el monitoreo fotogramétrico se ha implementado 14 puntos fijos de control terrestre.

En suma, la distribución espacial de la red de monitoreo multiparamétrico en el deslizamiento de Achoma se puede observar en la figura 5.

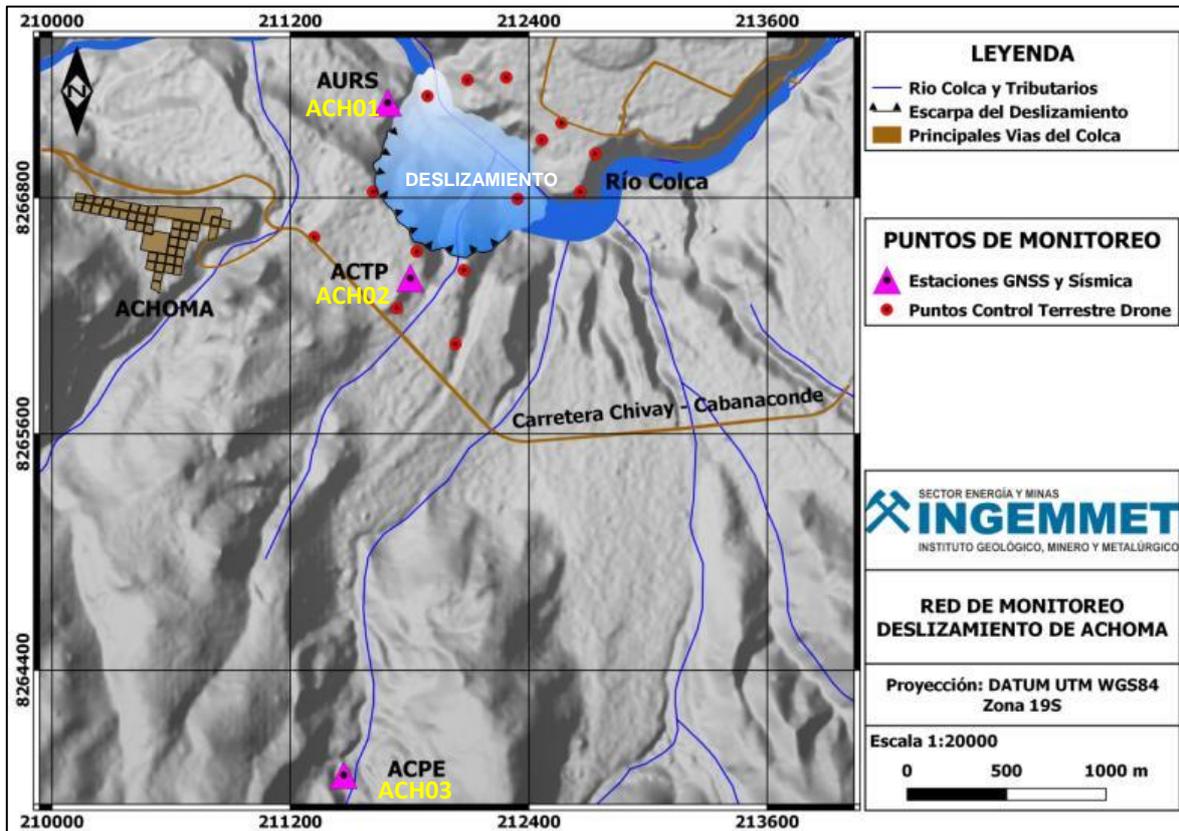


Figura 5. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo geodésico y sísmico. También se puede apreciar los 14 puntos de control terrestre para monitoreo fotogramétrico

2.1. MONITOREO GEODÉSICO

Cada una de las 3 estaciones de monitoreo geodésico consta de un receptor GNSS CORS. Estos nos permiten conocer y cuantificar la magnitud, velocidad y dirección del desplazamiento en cada punto. El procesamiento de estos datos se llevó a cabo utilizando el programa científico GAMIT/GLOBK v.10.7 (Herring et al.,2010).

Cabe resaltar que estas estaciones están ubicadas fuera del cuerpo del deslizamiento. La estación AURS se ubica sobre el flanco izquierdo del deslizamiento, la estación ACTP se ubica entre la escarpa principal y la carretera Chivay-Cabanaconde y la estación ACPE se localiza a más de 2 km al sur del deslizamiento (sector 9 del canal de la Irrigación Majes).

El periodo de análisis comprende desde el 07 de agosto de 2020 (fecha en que se inicia el monitoreo geodésico) al 31 de enero de 2021.

En la Figura 6, se observa el periodo de operatividad de cada estación. Lo registros presentan cortes debido a problemas técnicos que no pudieron ser resueltos a su debido momento debido a las restricciones vigentes por protocolos de sanidad del covid-19.

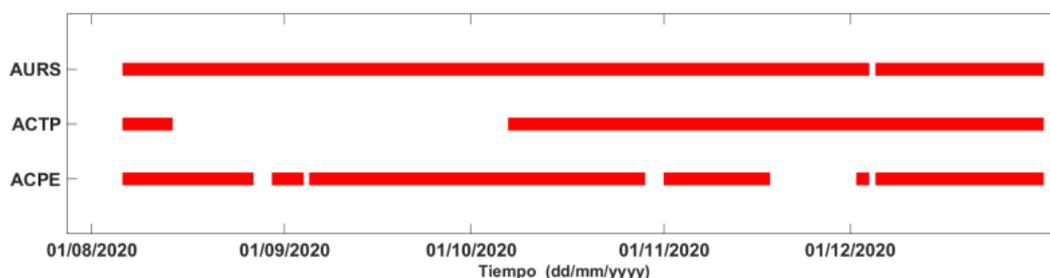


Figura 6. Cuadro de Operatividad de cada estación GNSS de la red geodésica

2.2. MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO

Para el monitoreo fotogramétrico del deslizamiento de Achoma se han utilizado drones de ala fija (eBee Plus) y multirrotor (Phantom 4 Pro), durante dos campañas de campo llevadas a cabo en junio y diciembre de 2020.

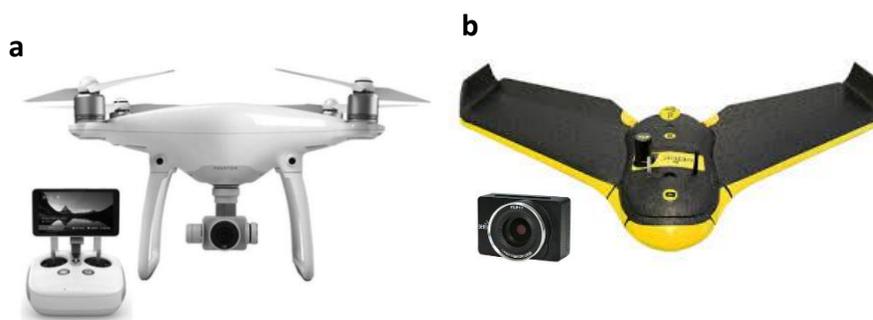


Figura 7. Drone Phantom 4 Pro (a) y Drone de ala fija eBee Plus (b)

Para la georreferenciación de las fotos capturadas con el dron se colocaron 14 puntos de foto-control terrestre dentro y fuera del deslizamiento (figura 5). El levantamiento de estos puntos se realizó a través de un equipo GNSS diferencial, empleándose para las observaciones la técnica de medida RTK (cinemático en tiempo real).

Para identificar las áreas que presentan desplazamiento dentro del cuerpo del deslizamiento se ha realizado un análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones de junio y diciembre de 2020. Así mismo para el seguimiento del avance de la escarpa principal se han utilizado las ortofotos correspondientes al mismo periodo (figura 8).

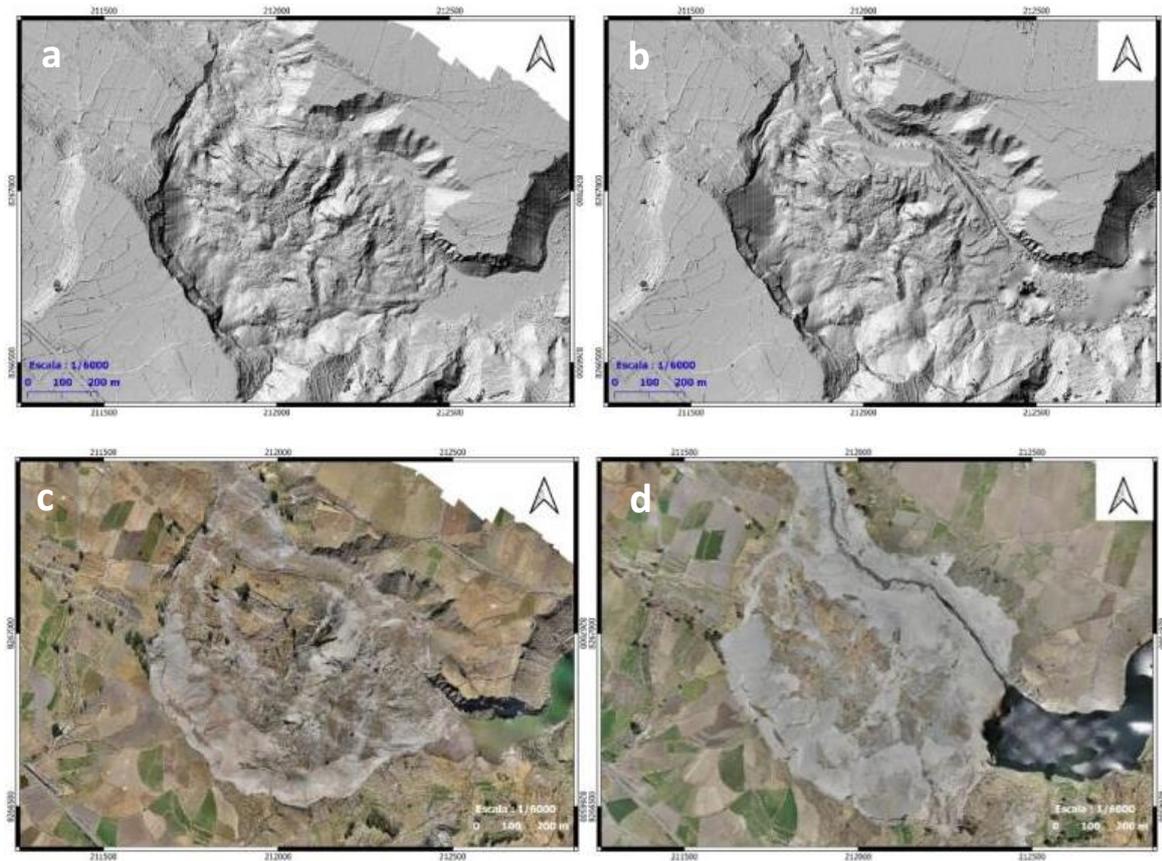


Figura 8. Modelos digitales de elevaciones (a y b) y ortofotos (c y d) del deslizamiento de Achoma en diferentes periodos logrando una resolución de 4 cm/px.

2.3. MONITOREO SÍSMICO

Se ha demostrado que los sismómetros son equipos muy susceptibles a todo tipo de movimientos del subsuelo, como la subducción de las placas, fallas tectónicas o fracturamiento en los volcanes, sin embargo, también son capaces de registrar eventos superficiales como: lahares, colapsos de rocas y deslizamientos de tierra.

Para el monitoreo de deslizamiento de Achoma se instaló una red sísmica compuesta por sismómetros triaxiales (Z; N-S y E -O) de banda ancha SILICON AUDIO y digitalizadores MINIMUS. Estos equipos calibran los tiempos de registro con un GPS (Figura 9).



Figura 9. Izquierda: Sensor sísmico SILICON y digitalizador MINIMUS; Derecha: Sensor SILICON instalado en campo.

El monitoreo sísmico del deslizamiento de Achoma se implementó en agosto del 2020 y continua hasta la fecha, transmite la información en tiempo real para su procesamiento y análisis. La data adquirida fue registrada en modo continuo en archivos de 60 minutos en formato GURALP (.gcf) y a su vez también se registra en formato .sac, el cual es empleado para realizar el procesamiento a través del programa Classification_v02 (Modificado por personal del OVI del programa *Classification de Lesage, 2009*), desarrollado en la plataforma MATLAB. Dicho programa permite analizar la forma de onda, contenido espectral y espectrograma, además estimar la frecuencia principal, la amplitud máxima, la duración del evento y la energía del mismo. Esta información es catalogada y almacenada en archivos *.txt.

En la Figura 10, se muestra el periodo de operatividad de las estaciones sísmicas que monitorean el deslizamiento de Achoma. Las barras verticales de color rojo representan a periodos con gaps de registro, debido a problemas técnicos en el registrador.

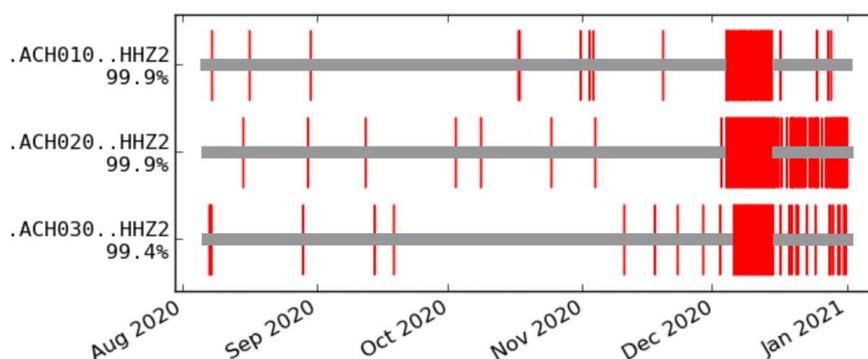


Figura 10. Periodo de operatividad de la red sísmica instalada para el monitoreo del deslizamiento de Achoma

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. MONITOREO DE DEFORMACIÓN

Para analizar el comportamiento geodinámico de la zona de peligro se graficaron series temporales de posición para cada una de las componentes de las estaciones GNSS: AURS, ACTP y ACPE (figuras 11, 12 y 13).

Las series temporales para las 3 estaciones evidencian ligeros desplazamientos en casi todas sus componentes. Las magnitudes de los desplazamientos y el margen de error de los cálculos se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1. Desplazamiento de las estaciones geodésicas de la zona de peligro entre agosto de 2020 y enero de 2021

Estacion	Desplazamiento			Error		
	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	σ_x (mm)	σ_y (mm)	σ_z (mm)
ACTP	9.4	-3.6	13.9	1.7	0.8	5.7
ACPE	5.8	-0.6	-4.4	0.9	0.6	3.1
AURS	8.5	2.0	12.8	0.8	0.9	3.6

Esta deformación en el orden de los milímetros es atribuible a efectos locales, dado que se ha eliminado el efecto del movimiento de placas tectónicas.

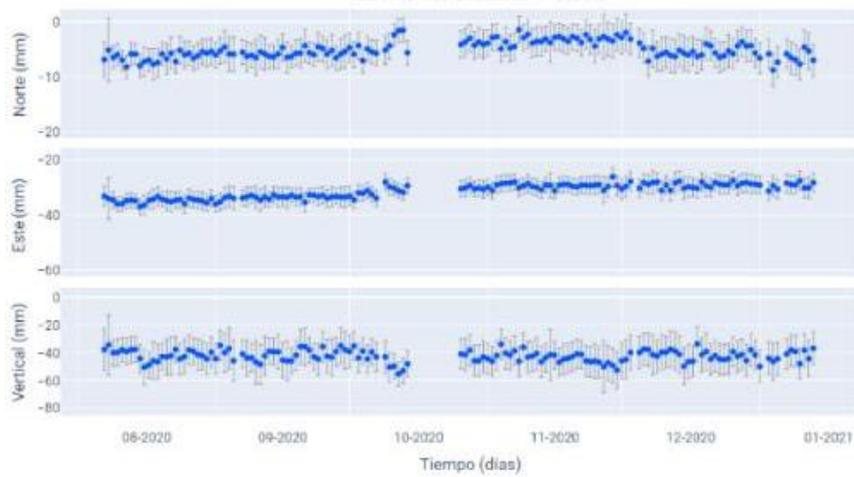


Figura 11. Serie temporal de Posición GNSS para la estación AURS

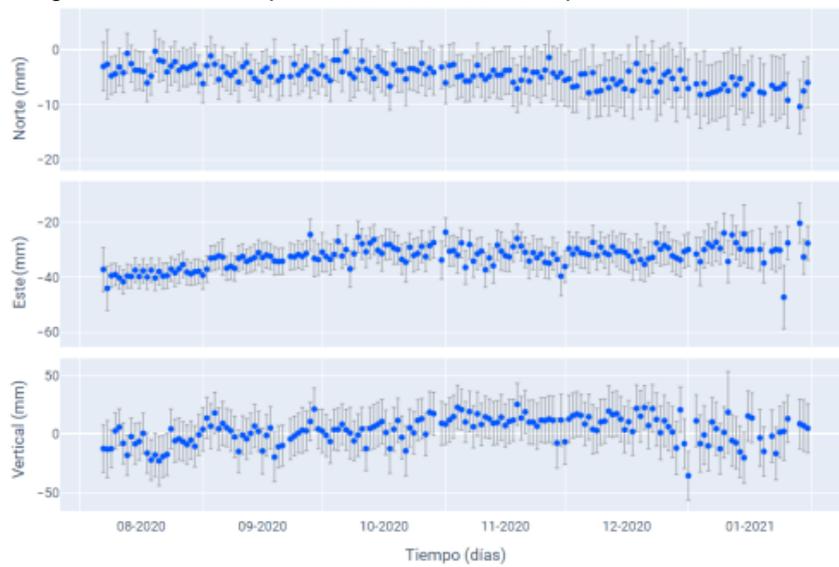


Figura 12. Serie temporal de Posición GNSS para la estación ACTP

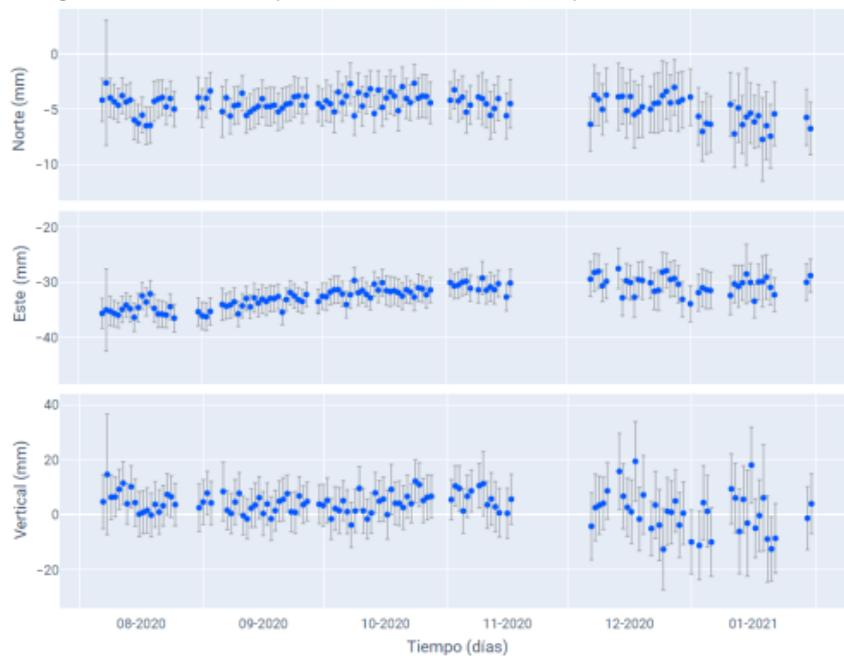


Figura 13. Serie temporal de Posición GNSS para la estación ACPE

3.2. MONITOREO FOTOGRAMÉTRICO

Este análisis consiste en la comparación de los dos DEM obtenidos en junio y diciembre de 2020 (≈6 meses). El mapa resultante (figura 14) nos muestra que para este periodo de tiempo hubo cambios en la morfología del terreno: en el cauce del río, en las zonas cercanas a la escarpa y principalmente en la escarpa del deslizamiento. Todo esto se representa en el mapa con las diferencias de colores: azules para las zonas que presentan levantamiento (acumulación de material) y rojos para las zonas con pérdida de masa (derrumbes y desplazamientos).

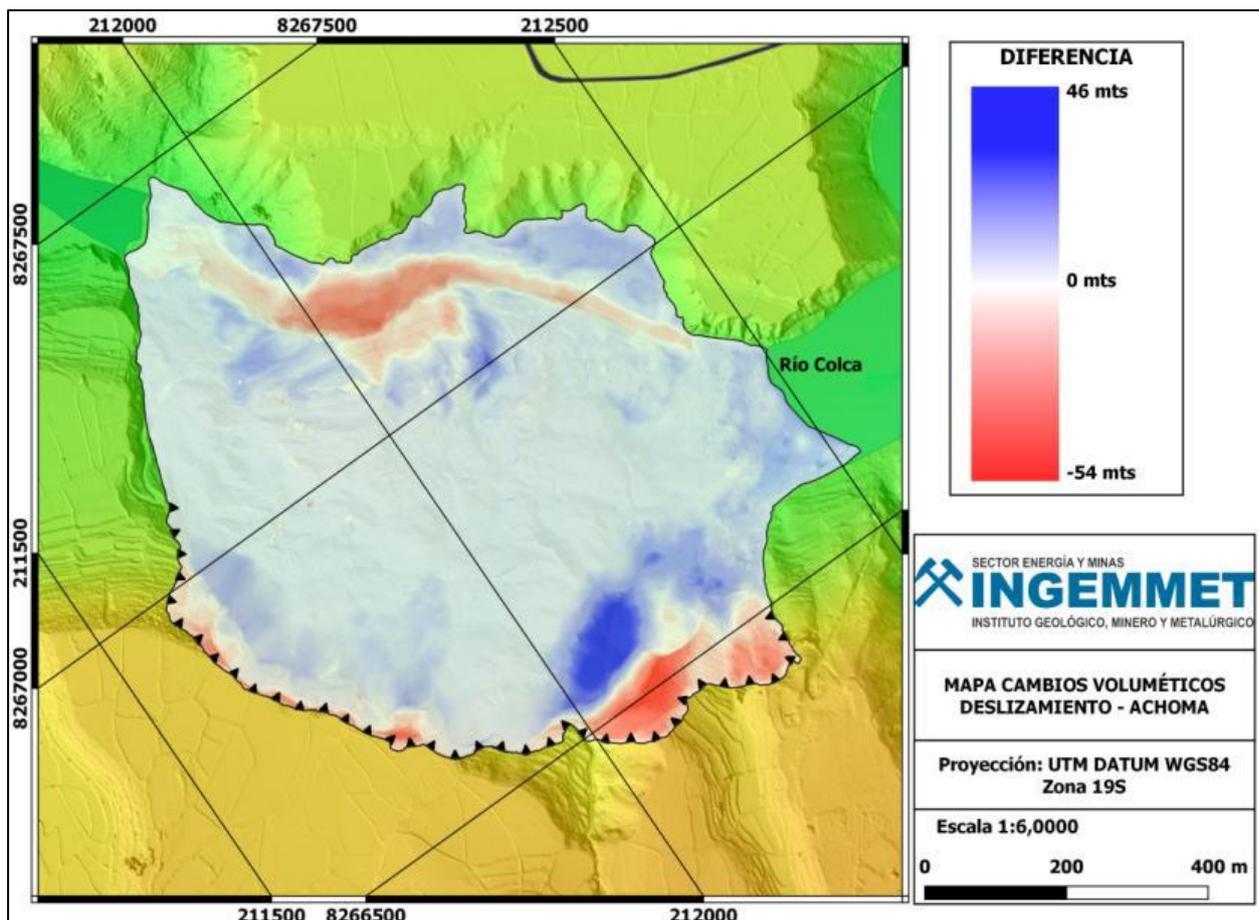


Figura 14. Resultados de la diferencia de Modelos digitales de elevación de terreno calculados mediante fotogrametría con drones.

En la figura 15, se presenta el orto-mosaico de la zona de estudio, donde se ha delimitado los contornos de la escarpa principal en junio de 2020 (línea azul) y la escarpa principal en diciembre de 2020 (línea amarilla). Durante este periodo de tiempo se observa que el avance retrogresivo es muy activo sobre todo al sureste del deslizamiento donde se alcanzó un retroceso de 150 metros en 6 meses.

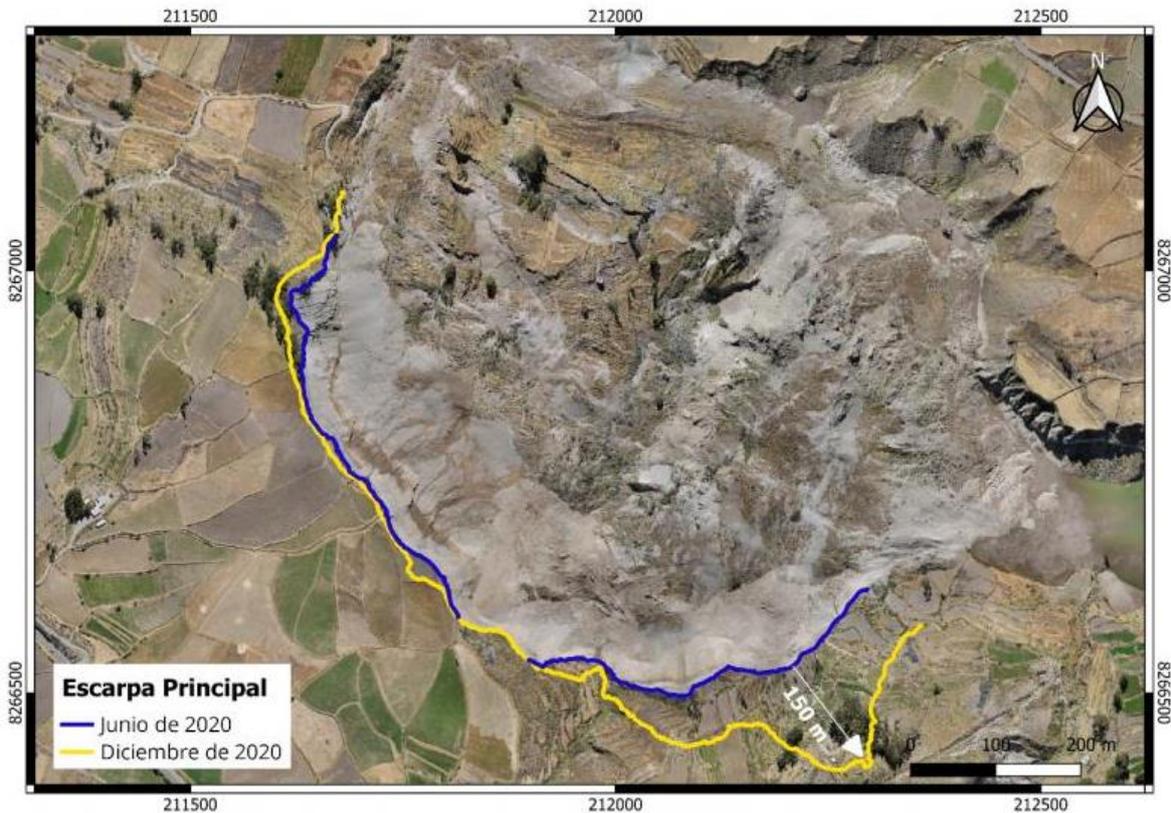


Figura 15. Evolución de la escarpa principal del Deslizamiento de Achoma. La flecha indica el segmento de mayor avance (150 m) en \approx 6 meses. Ortofoto de junio de 2020

3.3. SISMICIDAD ASOCIADA AL DESLIZAMIENTO DE ACHOMA

A principios del mes de mayo la estación sísmica denominada MAC03 (ubicada en el distrito de Maca), así como la red sísmica del volcán Sabancaya (SAB07, SAB11, SAB16 y SAL01) localizadas entre 8 y 22 km del distrito de Achoma, empezaron a registrar de manera esporádica pequeños eventos sísmicos caracterizados por poseer inicios emergentes, un contenido de bajas frecuencias $< 3\text{Hz}$ y una amplitud variable (Figura 16 y 17). Por las características antes mencionadas, este tipo de sismicidad fue asociada a fuentes superficiales (deslizamientos de tierra), los cuales se incrementaron en ocurrencia a principios de junio, a una tasa entre 2 y 6 sismos por día (Figura 18) y con magnitudes promedio $< 2.5 M_L$.

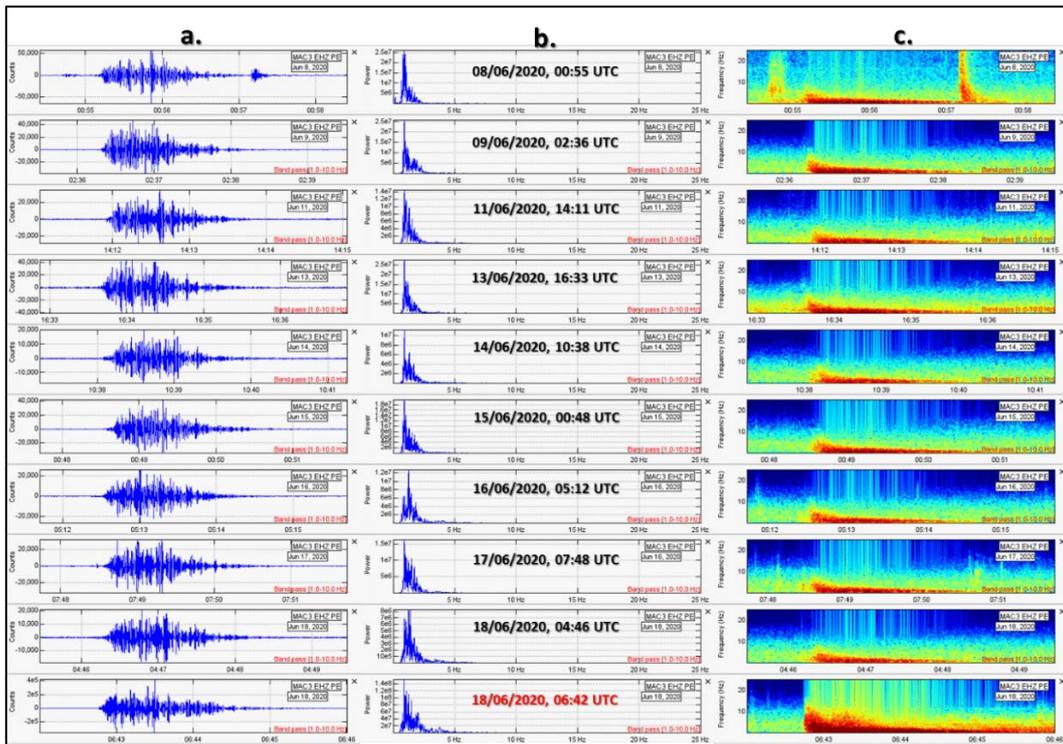


Figura 16. a. Sismograma; b. Espectro de frecuencias; c. Espectrograma de sismos asociados a deslizamientos de tierra registrados entre el 8 y 18 de junio por la estación MAC03.

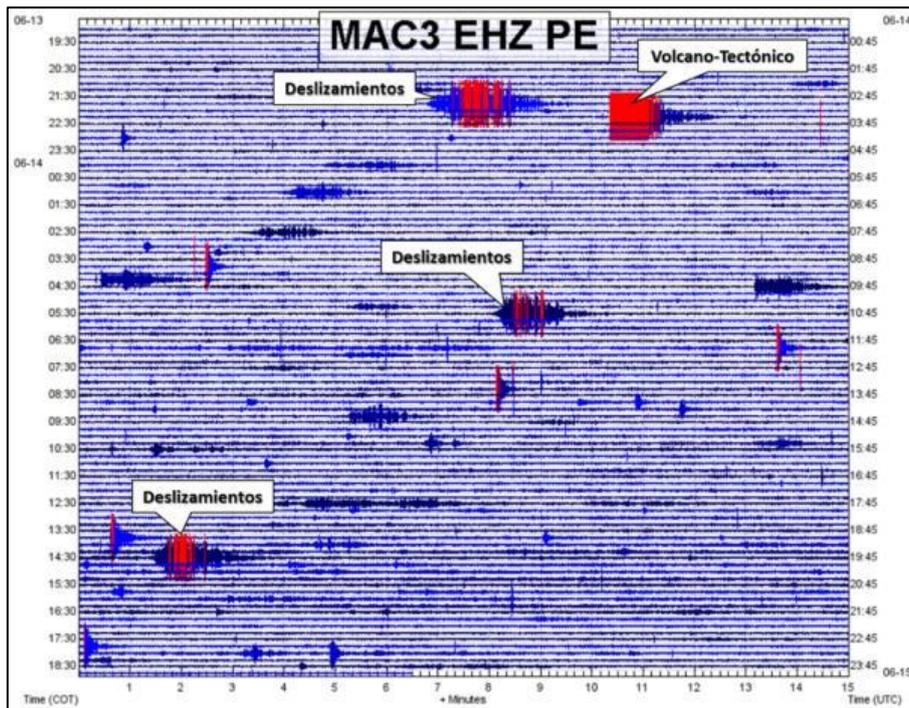


Figura 17. Helicorder sísmico correspondiente a la estación MAC03 registrado el 14 de junio, donde se observa sismos asociados a deslizamientos de tierra.

El 18 de junio a las 06:42 UTC (1:42 am hora local) se registró el sismo asociado al deslizamiento principal de Achoma, este fue detectado con mayor energía en las estaciones de Maca, en menor medida en las estaciones del Sabancaya, e incluso se registraron en las estaciones del volcán Misti, ubicada a más de 70 km de Achoma (Figura 18).

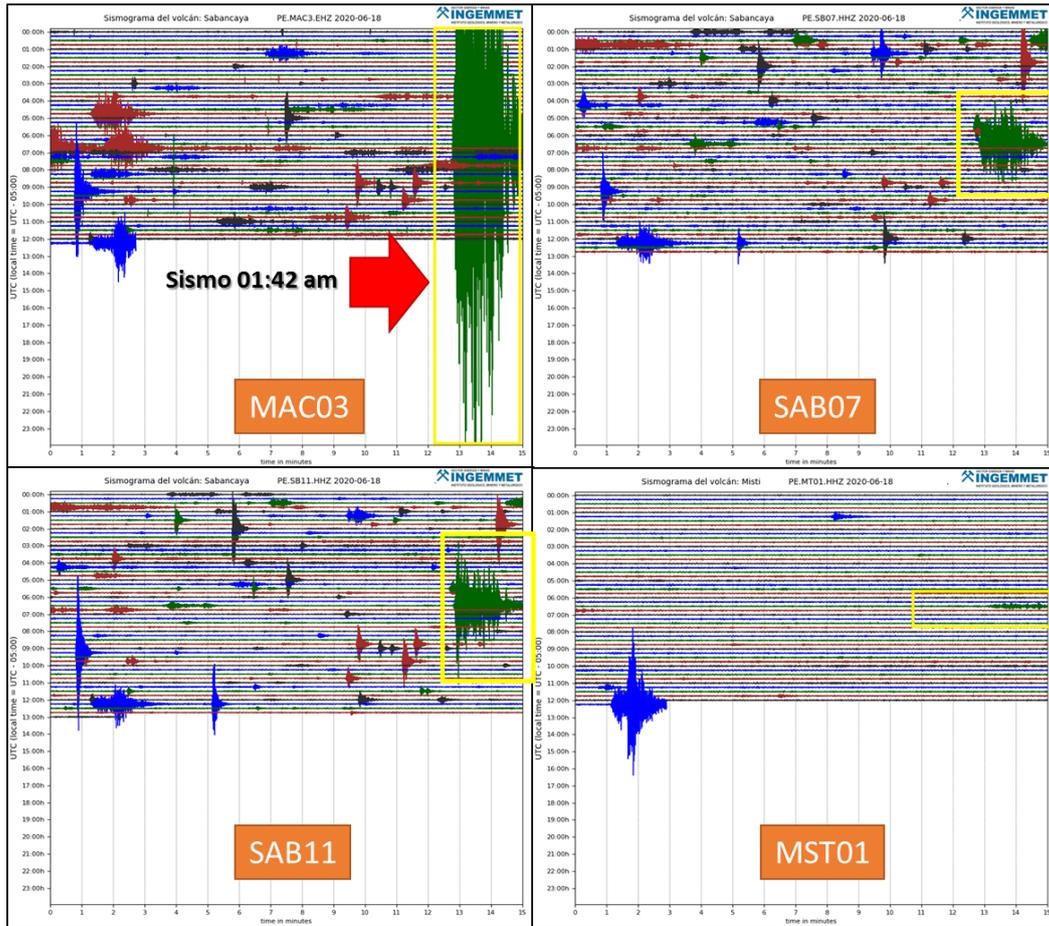


Figura 18. Helicordes sísmicos de las estaciones MAC03, SAB07, SAB11 y MST01, donde se observa el registro de un sismo a las 06:42 hora UTC (01:42 am hora local) resaltado en amarillo.

Una de las características sísmicas de los procesos geodinámicos superficiales, es que presentan altas frecuencias. En la figura 19, se presenta la serie temporal de la frecuencia dominante, la amplitud sísmica en cuentas y la duración en segundos de sismos asociados a desprendimientos de tierra, registrados por la estación SAB07 y ACH02. La evolución temporal del contenido espectral muestra que los valores de la frecuencia dominante son mayores después del evento principal y estas se mantienen constantes, lo que significa que es un deslizamiento muy activo.

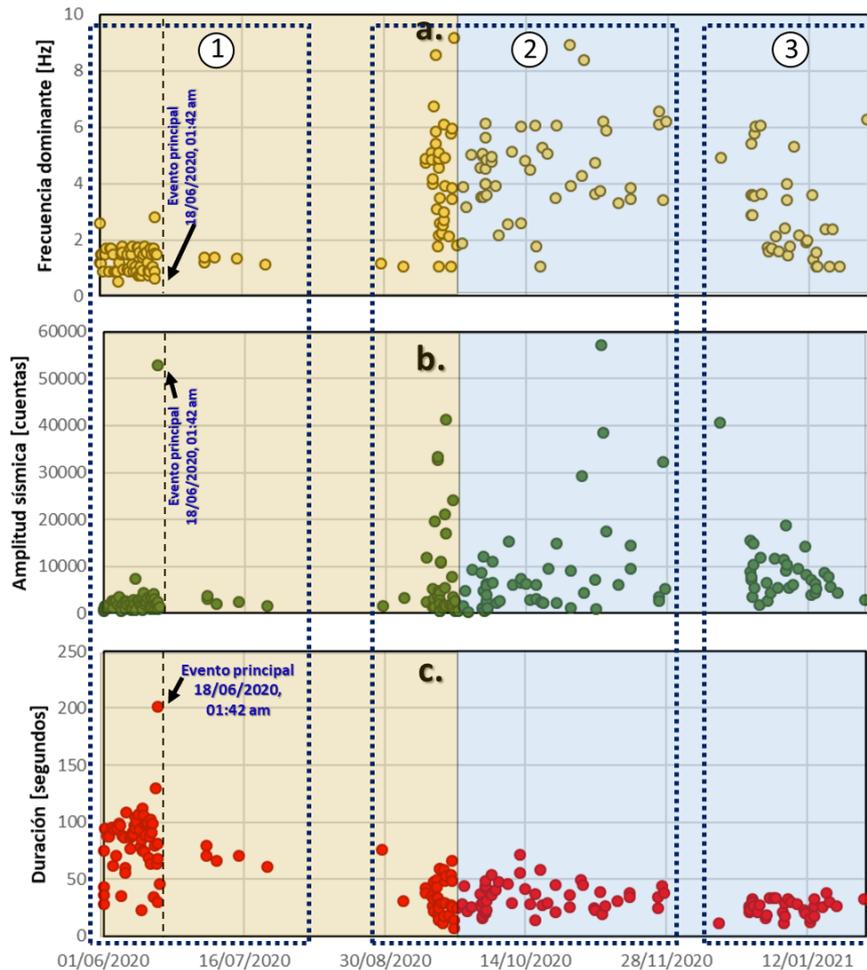


Figura 19. Variación temporal de: a. Frecuencia dominante en Hz; b. Amplitud sísmica en cuentas; c. Duración en segundos de sismos asociados a deslizamiento de tierra. Los datos corresponden a la estación SAB07 (sombreado en rojo) y ACH02 (sombreado en azul)

3.4. FACTORES EXTERNOS

En general, de acuerdo a los estudios y monitoreo de los deslizamientos en el valle del Colca, la evolución de estos está fuertemente influenciado por factores externos como las temporadas de alta precipitación y la sismicidad local.

3.4.1. PRECIPITACIONES PLUVIALES

Las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) denominadas Chivay y Madrigal, se localizan a 9 y 14 km del área en estudio respectivamente.

Las precipitaciones pluviales intervienen tanto en los procesos condicionantes como en los desencadenantes debido a las condiciones climáticas de la zona, con la mayor tasa de precipitación durante los meses de enero a marzo como se puede observar en la tabla 2 y figura 20.

Tabla 2. Precipitaciones mensuales y anuales de las estaciones de Chivay y Madrigal

	Estación Madrigal Precipitación (mm/mes)				Estación Chivay Precipitación (mm/mes)			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
Enero	179	139	216	114	156	94	124	94
Febrero	63	146	177		62	129	188	
Marzo	116	101	126		83	63	96	
Abril	24	9	-		44	20	13	
Mayo	0	0	-		0	4	2	
Junio	12	0	-		13	0	0	
Julio	19	2.3	-		27	3	0	
Agosto	0	0	0		7	0	0	
Setiembre	0	4.2	1		12	5	0	
Octubre	3	33.9	31		2	38	28	
Noviembre	3	8	11		4	18	15	
Diciembre	12.	16	92		38	17	85	
Total (mm/año)	432	458	654		444	392	551	

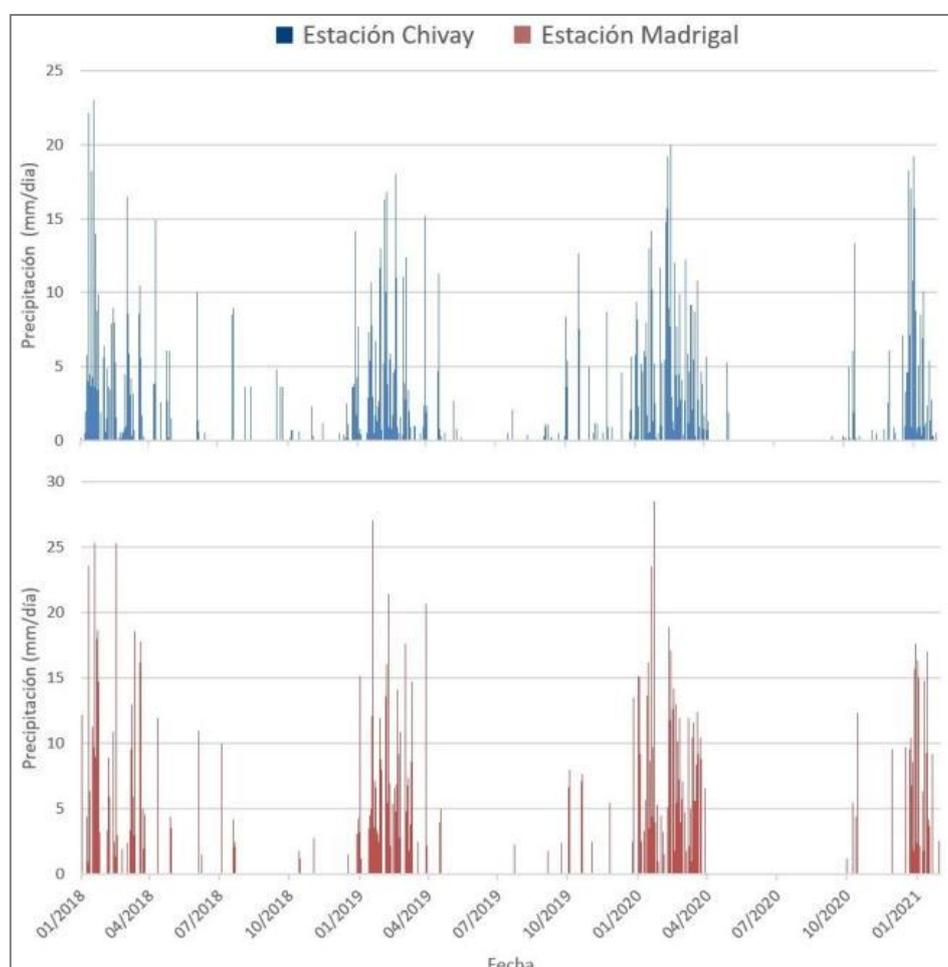


Figura 20. Precipitación diaria de las estaciones de Chivay y Madrigal
(Periodo: enero de 2018 a enero de 2021).

Así mismo, se observa que actualmente la zona de estudio se encuentra en temporada de precipitación, lo que viene provocando la saturación del terreno como producto de la infiltración de agua de lluvia. Además, estas precipitaciones pluviales incrementan el caudal del río Colca favoreciendo el socavamiento del pie del deslizamiento.

Por otro lado, es importante aclarar que existen otras fuentes de infiltración de agua que aportan a la saturación hídrica del suelo, como el sistema de riego por inundación y canales no revestidos. De igual modo, es probable que las fugas de agua en ciertos tramos del canal que conduce agua para la Irrigación Majes, ubicado a 2.5 km del pueblo de Achoma, también contribuyan a la saturación del terreno en la zona de estudio (Vela y Taipe, 2020).

3.4.2. ACTIVIDAD SISMOTECTÓNICA

En el valle del Colca existe un sistema de fallas que presentan una intensa actividad sísmica superficial (Benavente et al, 2017). Estas fallas geológicas junto a la actividad volcánica constituyen las principales fuentes sísmicas en el área de estudio. Así lo reafirman la distribución espacial de los epicentros de los sismos registrados entre enero de 2020 y febrero de 2021 (figura 21).

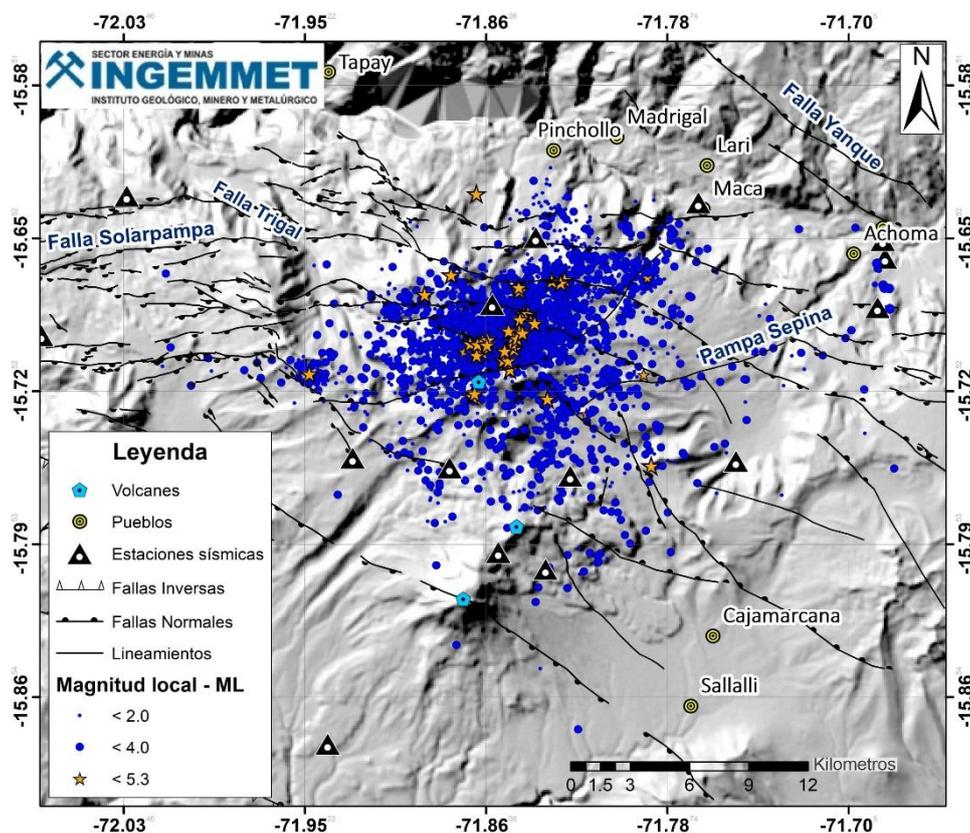


Figura 21. Sismicidad volcano-tectónica (enero 2020 y febrero 2021) y distribución de fallas activas en el área de estudio.

Un ejemplo de dicha actividad es el sismo superficial que ocurrió el 14 de agosto de 2016, con una magnitud de 5.3 ML, que fue producto de la reactivación de la Falla Yanque (figura 21). 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). Eventos como este tendrían un alto impacto en la geodinámica del deslizamiento de Achoma.

4. DISCUSIÓN

4.1. SITUACIÓN GEODINÁMICA ACTUAL

Sobre la base de los resultados obtenidos a través del monitoreo geodésico, fotogramétrico y sísmico se afirma lo siguiente:

- La comparación de los modelos digitales de elevación de terreno a partir de los sobrevuelos con dron, ha permitido conocer la variabilidad espacial de los desplazamientos de la zona deslizada. Además, la evolución del deslizamiento plasmada en el orto-mosaico de la Figura 15, muestra retrocesos considerables en la escarpa principal. Consecuentemente, se evidencia un cuerpo deslizando muy activo.
- Los sismos registrados por la red sísmica de Achoma, muestran claras diferencias en cuanto a forma de onda y frecuencia a los sismos generados por actividad tectónica o volcánica. Estas particulares características han podido determinar que la fuente estaría asociada a desprendimientos de material (suelo y rocas). Cabe resaltar que el incremento de las duraciones de estos sismos, actuaron como precursores del gran deslizamiento en Achoma el 18 de junio, esto podría deberse a que la cantidad de material que iba desprendiéndose aumentó hasta desencadenar el deslizamiento. Posteriormente, la duración de los sismos fue disminuyendo paulatinamente durante los siguientes meses, sin embargo, aún se continúa registrando este tipo de sismicidad que estaría vinculado a los continuos desprendimientos de material.
- Los puntos monitoreados con las estaciones GNSS permanentes no presentan, en la actualidad, actividad geodinámica importante. Esto se debe a que se encuentran ubicados fuera de la zona que presenta mayor inestabilidad (cuerpo del deslizamiento). No obstante, son de mucha utilidad para el monitoreo del área de influencia del deslizamiento.
- La combinación de estas técnicas de monitoreo nos ha permitido caracterizar toda la zona en peligro. A partir del monitoreo fotogramétrico y sísmico se determinó que existe un considerable nivel de actividad en la masa deslizando la cual hace notar que aún constituye un peligro inminente. Por su parte, el monitoreo geodésico nos permitió monitorear las zonas cercanas a la masa deslizando y en un futuro nos podrá advertir con anticipación la ocurrencia de desplazamientos horizontales o hundimientos.

4.2. SITUACIÓN GEODINÁMICA FUTURA DE LA ZONA EN PELIGRO

Para tener una idea más clara del potencial del peligro del deslizamiento de Achoma a futuro, recurrimos a los resultados obtenidos del monitoreo permanente y en tiempo real del deslizamiento de Maca, uno de los deslizamientos más activos en el Valle del Colca y que viene siendo estudiado desde 2013 hasta la fecha.

El deslizamiento de Maca, localizado a 9 km de la zona de estudio, posee el mismo contexto geológico (material poco competente), climático (temporadas de lluvias estacionales) y tectónico (intensa actividad sísmica local) que el deslizamiento de Achoma. Por esta razón, constituye una excelente referencia para dar a conocer la importancia de los factores externos como la precipitación y la sismicidad en la geodinámica del deslizamiento en análisis. Fenómenos que son recurrentes en este sector, como se puede ver en las figuras 20 y 21.

Los estudios sobre el deslizamiento de Maca (Zerathe et al., 2016; Taipe et al., 2017 y Bontemps et al., 2020) pusieron en evidencia la sensibilidad significativa de este deslizamiento frente a las precipitaciones y los sismos, presentándose una mayor incidencia en el proceso de aceleración cuando interactúan ambos factores y una menor deformación cuando actúan por separado. Debido a que es influenciado constantemente por estos procesos, sumado a las prácticas inadecuadas de riego, carencia de drenajes apropiados y el socavamiento del río, presenta un avance progresivo (hacia el río Colca) y retrogresivo (hacia el poblado de Maca) afectando durante los últimos años terrenos de cultivo y a la carretera que une todo el Valle del Colca.

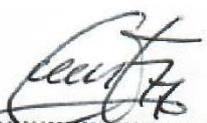
Dado que los factores condicionantes y detonantes son similares, se puede asumir que la evolución temporal y espacial del deslizamiento de Achoma tendría un comportamiento semejante al deslizamiento de Maca, afectando en un futuro terrenos de cultivo e infraestructura ubicados en sus inmediaciones. Esto ya se viene evidenciando, como se demostró con el monitoreo fotogramétrico, en el avance retrogresivo de su escarpa principal. Lo expuesto refuerza lo establecido en el informe técnico N° A7066 donde se recomienda prohibir cualquier tipo de actividad antrópica dentro de una distancia de 200 metros detrás de la escarpa principal del deslizamiento por considerarse una zona de muy alto peligro.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos del monitoreo fotogramétrico muestran que el deslizamiento de Achoma se encuentra activo. En un periodo de 6 meses presentó cambios morfológicos importantes tanto en el cuerpo como en la escarpa principal, con un avance retrogresivo al sureste de la escarpa de hasta 150 metros.
- El registro de la actividad sísmica está asociada a desprendimientos de suelo y roca provenientes del deslizamiento de Achoma. Esto constituye un indicativo más de la actividad del deslizamiento durante el periodo en estudio.
- Se ha determinado que los factores acelerantes del deslizamiento están relacionados a las intensas precipitaciones pluviales que provocan la saturación hídrica del terreno, al socavamiento del río Colca al pie del deslizamiento, a la actividad sísmica local muy activa y a la actividad antrópica.
- El deslizamiento de Achoma, constituye una **Zona Crítica de Muy Alto Peligro y en Peligro Inminente**, ya que, debido a sus características geológicas, estructurales y a los factores externos antes mencionados, este deslizamiento puede acelerar su actividad y volver a represar el río Colca, así como también continuar afectando terrenos de cultivo e infraestructura ubicados en el área.

RECOMENDACIONES

- Continuar con el monitoreo multiparamétrico permanente y en tiempo real del deslizamiento de Achoma. Además, se recomienda ampliar el monitoreo geodésico instalando hitos de control temporal en el cuerpo del deslizamiento.
- Prohibir la construcción de carreteras, canales de riego, caminos de herradura, la ampliación de áreas con fines agrícolas u otra actividad antrópica, dentro de una distancia de 200 metros detrás de la escarpa principal del deslizamiento de Achoma. Además, se debe restringir el acceso de las personas a esta zona.
- Reasentar a la población que habita en los minifundios de las áreas cercanas al cuerpo del deslizamiento, ya que representa una amenaza para la vida y bienestar de los pobladores de la zona.
- Sensibilizar y capacitar a través de talleres dirigidos a los agricultores del pueblo de Achoma sobre el uso eficiente del agua.
- Colocar paneles informativos para explicar las causas que originaron el deslizamiento de Achoma y por qué se mantiene activo. Este texto puede ser extraído del presente informe.



Ing. Edu Luis Taipe Maquerhua
COORDINADOR DEL OBSERVATORIO
VULCANOLÓGICO INGEMMET - OVI



Ing. LIONEL V. FIDEL SMOLL
Director
Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico
INGEMMET

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Bontemps, N., Lacroix, P., Larose, E. et al (2020). Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. *Nat Commun* 11, 780.

Cerpa, L. & Paniagua M. (2009). Carta Geológica del Perú: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Chivay, Hoja 32-s, Cuadrante I, escala 1:50 000. Mapa publicado por INGEMMET.

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

Huamán-Rodrigo D., Chorowicz J., Deffontaines B., Guillande 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.

Klinck, B., Ellison, R., Hawkins, M. (1986) - The geology of the Cordillera Occidental and Altiplano, west of Lake Titicaca, southern Peru. INGEMMET, Preliminary Report Lima.

Herring, T., Floyd, M., King, R., Y McClusky, S. (2010). Introduction to Gamit/Globk. Massachusetts Institute of Technology.

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

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. (2012). Informe Técnico N° A6628: Evaluación de la Seguridad Física del Distrito de Maca., INGEMMET. 159p. 2012.

Soncco, Y., Cueva, K. y Japura, S. (2021). Evaluación de peligros geológicos en los Distritos de Achoma (sector Collpane), Yanque (sector Chacapi), e Ichupampa (sectores Anansaya, Urinsaya y Linde), INGEMMET, Informe Técnico N° A7115, 47 p.

Thouret, J., Wörner G., Gunnell Y., Singer B., Zhang X., Souriot T. (2007) - Geochronologic and stratigraphic constraints on canyon incision and Miocene uplift of the Central Andes in Peru. *Earth Plan. Sci. Letters*, 263: 151-166.

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.

Vela, J. & Taípe, E. (2020). Deslizamiento de Achoma ocurrido el 18 de junio del 2020. Región Arequipa, provincia Caylloma, distrito Achoma, INGEMMET, Informe Técnico N° A7066, 31p.

Zavala B, Mariño J., Lacroix P., Taípe E., Tatard L., Benavente C., Pari W., Macedo L., 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.

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

ANEXOS

OFICIOS EMITIDOS POR EL GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA



GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA

"Año del bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"



Oficina Regional de
Defensa Nacional y
Defensa Civil

GOBIERNO REGIONAL

Arequipa, 04 de febrero del 2021

OFICIO N° 093 -2021-GRA/GGR/ORDNDC

Señor:

Ing. SUSANA VILCA ACHATA

Presidente Ejecutivo del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico- INGEMMET

Presente. -

Asunto : Solicito informe técnico actualizado sobre las estaciones de monitoreo del deslizamiento de tierra en el Sector Quello – Huancaro - Achoma.

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Usted, para hacerle llegar un cordial saludo a nombre del Gobernador Regional de Arequipa Arq. Elmer Cáceres Llica, y el mío propio, a la vez solicito un informe técnico actualizado sobre las estaciones de monitoreo ubicadas en el deslizamiento de tierra del sector Quello Huancaro del distrito de Achoma, provincia de Caylloma, Arequipa.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterarle los sentimientos de mi estima personal.

Atentamente,

GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA


ic. Alfonso Mamani Quespe
EFE DE LA OFICINA REGIONAL DE DEFENSA
NACIONAL Y DEFENSA CIVIL

AMQ/amq
Archivo
Reg. Doc: 3495021
Reg. Exp: 2303011

WWW.REGIONAREQUIPA.GOB.PE

AREQUIPA SOMOS TODOS

Av. Unión N° 200, Urb. Cesar Vallejo,
Distrito de Paucarpata, Provincia Arequipa
co@comunicacionesagr@regionarequipa.gob.pe
Teléfono N° 054 - 401318



GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA

"Año de la Universalización de la Salud"



Oficina Regional de
Defensa Nacional y
Defensa Civil

Arequipa, 31 de agosto del 2020

OFICIO N° 411 -2020-GRA/GGR/ORDNDC

Señor:
ING. SUSANA VILCA ACHATA
PRESIDENTA EJECUTIVO INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO - INGENMET
Presente.-

Asunto : Solicito reporte periódico del monitoreo sobre el desplazamiento del sector de Achoma.

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ustedes, para hacerle llegar un cordial saludo a nombre del Gobernador Regional de Arequipa Arq. Elmer Cáceres Llica, y el mío propio y a la vez en base a lo ocurrido del 18 de junio sobre el deslizamiento de tierra en el sector de Achoma se concluyó con la implementación de estaciones para el monitoreo del deslizamiento de tierra, el cual solicitamos el reporte periódico (semanal) del monitoreo del deslizamiento de tierra en el sector de Achoma.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterarle los sentimientos de mi estima personal.

Atentamente,

AMQ/dccc
Archivo:
Reg. Doc: 3124561
Reg. Exp: 2066700

GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA


Lic. Alfonso Mamani Quispe
JEFE DE LA OFICINA REGIONAL DE DEFENSA
NACIONAL Y DEFENSA CIVIL

WWW.REGIONAREQUIPA.GOB.PE

Av. Unión N° 200, Urb. Cesar Vallejo,



GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA



Oficina Regional de
Defensa Nacional y
Defensa Civil

"Año de la Universalización de la Salud"

GOBIERNO REGIONAL

Arequipa, 10 de julio del 2020

OFICIO N° 302 -2020-GRA/ORDNDC

Señor:

ING. HENRY LUNA CÓRDOVA
PRESIDENTE EJECUTIVO INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO - INGENMET
Presente.-

Asunto : *Monitorear el área de influencia del deslizamiento que ocurrió en el río Colca con el fin de preveer y reducir el impacto destructor*

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Ustedes, para hacerle llegar un cordial saludo a nombre del Gobernador Regional de Arequipa Arq. Elmer Cáceres Llca, y el mío propio y a la vez mencionar que el Gobierno Regional de Arequipa viene realizando trabajos de emergencia para la apertura del embalse del río Colca producto del deslizamientos ocurridos en el sector de Achoma y estando la zona de desastre en una zona de fallas geológicas y actividad volcánica; es que convoco a la institución que usted preside con el fin de que nos apoye a monitorear el área de influencia del deslizamiento que ocurrió en el río Colca con el fin de preveer y reducir el impacto destructor que podría originar el deslizamiento al momento de la apertura del embalse por actividad volcánica u otra actividad relacionada a las competencias del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico; además solicitamos prevea realizar escenarios sísmicos producto de la actividad volcánica o fallas geológicas que puedan ocurrir durante los trabajos emergencia. Agradeceremos nos haga llegar y exponga lo antes posible los resultados del monitoreo a fin de mitigar los riesgos y desastres en la zona.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterarle los sentimientos de mi estima personal.

Atentamente,

GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA

Alfonso Mamani Quispe
Lic. Alfonso Mamani Quispe
JEFE DE LA OFICINA REGIONAL DE DEFENSA
NACIONAL Y DEFENSA CIVIL

AMQ/EYM/zva
C.C.
Archivo
(1) fl
Reg. Doc: 3060493
Reg. Exp: 2025459

WWW.REGIONAREQUIPA.GOB.PE

AREQUIPA SOMOS TODOS

Av. Unión N° 200, Urb. Cesar Vallejo,
Distrito de Paucarpata, Provincia Arequipa
coordinacion@regionarequipa.gob.pe
Teléfono N° 054 - 401318