



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA ACTIVIDAD DEL VOLCÁN COROPUNA REGIÓN AREQUIPA

Informe Técnico N°027-2023/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Noviembre, 2023

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera
Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Estado del conocimiento sobre la actividad del volcán Coropuna – Región Arequipa

Autores

Katherine Vargas
José Torres
Marco Rivera
Jorge Mamani
Jorge Concha

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

**ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA ACTIVIDAD DEL
VOLCÁN COROPUNA
Región Arequipa**

Lima – Perú
Noviembre, 2023

RESUMEN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), a través de su servicio el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), realiza el monitoreo e investigación de los volcanes activos ubicados en el sur peruano, entre ellos el volcán Coropuna, ubicado en la región Arequipa. Este volcán es monitoreado con equipos geofísicos permanentes como sismómetros, inclinómetros, cámara de vigilancia y sistemas satelitales, con el objetivo de conocer su comportamiento dinámico y reportar de manera diaria y mensual a las autoridades e instituciones del SINAGERD. Toda la información generada, se encuentra disponible en la página web del CENVUL, como reportes, boletines e informes técnicos.

Se han realizado estudios de evaluación de peligro por descenso de lahares del volcán Coropuna, en la cual se muestra un mapa por descenso de lahares (flujos de lodo) considerando tres zonas de peligro: bajo, moderado y alto, con base a tres tipos de volumen de agua. Asimismo, el IGP ha publicado dos informes técnicos y ha asesorado una tesis de maestría, sobre la actividad sísmica del volcán Coropuna registrada entre los años 2001 y 2020, así como la deformación del cono volcánico cuantificado mediante campañas temporales.

Como parte de las actividades de difusión sobre estado del volcán Coropuna, el IGP ha elaborado un dashboard personalizado para uso del COER-Arequipa, que permite el acceso a la información geofísica en tiempo real. Asimismo, el IGP ha diseñado un cuadríptico con información acerca del volcán Coropuna y que resume el monitoreo volcánico que realiza, incluyendo un mapa con las estaciones geofísicas instaladas con los tres escenarios de lahares, y una breve explicación de los peligros volcánicos al que está expuesta la población aledaña, los cuales han sido entregados en talleres de divulgación científica y en visitas de autoridades y población al CENVUL.

INDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

2. VOLCÁN COROPUNA

2.1. HISTORIA ERUPTIVA

2.2. SISTEMA DE MONITOREO VOLCÁNICO

2.2.1. Monitoreo Sismovolcánico

2.2.2. Monitoreo de la deformación superficial

2.2.3. Monitoreo Geoquímico de fuentes termales

2.2.4 Monitoreo a través de sistemas satelitales

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

2.4. ACTIVIDADES DE DIFUSIÓN

2.5. SEMÁFORO DE ALERTA VOLCÁNICA

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) inició el monitoreo geofísico e investigación de los volcanes activos del sur de Perú en los años 1990. Posteriormente, en el año 2018, mediante el proyecto de inversión PIP "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta ante el Riesgo Volcánico y del Observatorio Vulcanológico en la Macro Región Sur del Perú", financiado por el Estado peruano, implementa un sistema de monitoreo permanente de 12 volcanes activos del sur peruano, entre ellos del volcán Coropuna. A la vez, se construye la nueva sede del Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), ubicado en la ciudad de Arequipa, distrito de Sachaca, el mismo que alberga al Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL), servicio oficial responsable del monitoreo permanente de 12 volcanes activos y potencialmente activos (Vargas et al., 2023).

En el marco de sus actividades y funciones, el IGP, a través del CENVUL, realiza el monitoreo de la actividad de los volcanes activos empleando equipos instalados de manera permanente y temporal (Figura 1), como sismómetros, estaciones GNSS, inclinómetros, videocámaras, espectrómetros de gases DOAS, entre otros. Este monitoreo multidisciplinario es complementado con el empleo de sistemas satelitales (SENTINEL 1 y 2, MIROVA, OMI, TROPOMI, etc.) que permiten hacer un seguimiento continuo de la actividad volcánica. Los datos del monitoreo volcánico son procesados y analizados, cuyos resultados son plasmados en boletines y alertas vulcanológicas, que son difundidas en la página web del CENVUL (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>), el aplicativo móvil "Volcanes Perú" y a los grupos de WhatsApp de los Centro de Operaciones de Emergencia de cada región, provincia e INDECI. Asimismo, el IGP realiza estudios e investigaciones sobre los volcanes activos que son publicados como informes técnicos, los cuales pueden ser descargados libremente del Repositorio Geofísico Nacional (REGEN, <https://repositorio.igp.gob.pe/>). Como parte de la gestión del conocimiento, el IGP realiza talleres de inducción y capacitación a las

autoridades y población, a fin de que conozcan la actividad de los volcanes de sus regiones, tipos de peligros volcánicos a los cuales están expuestos los poblados e interpreten correctamente los productos de monitoreo generados por el CENVUL. En caso de crisis volcánicas (proceso pre-eruptivo o eruptivo), el IGP asesora permanentemente a las autoridades nacionales, regionales y locales de GRD para la acertada y correcta toma de decisiones en la atención de la emergencia (Del Carpio et al., 2023).

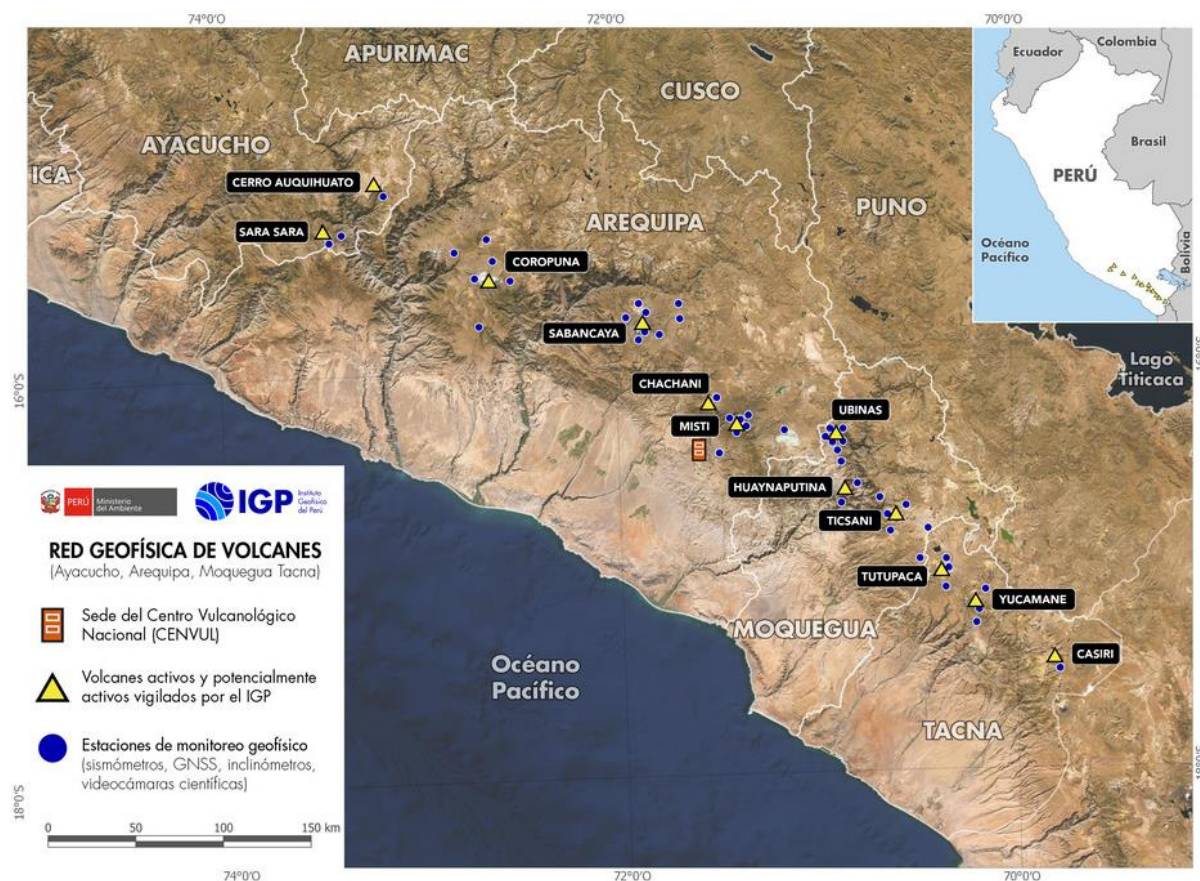


Figura 1. Red geofísica de volcanes (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/red-volcanica>).

El presente informe tiene como objetivo mostrar la información generada por el IGP sobre el estudio, investigación y monitoreo del volcán Coropuna, en atención al oficio n.º 00213-2023-2024-CCIT-CR solicitada por la comisión de Ciencia, Innovación y Tecnología del Congreso de la República. Esta información contribuirá en las actividades dentro del marco de la gestión del riesgo de desastres.

2. VOLCÁN COROPUNA

El volcán nevado Coropuna (-15.5501; -72.6375; 6377 m s. n. m.) es el volcán activo más voluminoso y el más elevado del Perú. Se encuentra situado a 150 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, en la jurisdicción de las provincias de Castilla y Condesuyos, región Arequipa (ver cuadríptico informativo en <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5157>).

2.1. Historia eruptiva

El Coropuna, en un tipo de volcán denominado “complejo volcánico”, el cual está constituido por al menos cinco edificios o estratovolcanes y domos de lava superpuestos uno respecto a otros, los cuales se distribuyen en dirección este-oeste, denominados Yanaranra (6305 m s.n.m.), Coropuna (6161 m s.n.m.), Paiche (6330 m s.n.m.), Casulla (6377 m s.n.m.) y Escalera (6171 m s.n.m.). El complejo tiene aproximadamente 25 km de largo y 17 km de ancho (para mayor detalle referirse al siguiente informe <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5427>).

La actividad eruptiva pasada del volcán Coropuna comprende el emplazamiento de variados flujos de lava, domos y domo-coladas que conforman los cinco edificios volcánicos o estratovolcanes que se habrían formado durante el Pleistoceno y Holoceno, es decir los últimos 600 000 años. Hace aproximadamente mil quinientos años A.P. (entre 2100 y 700 años) el volcán Coropuna ha presentado su última erupción, caracterizada por la emisión de flujos de lavas (Bromley et al., 2019) que tienen más de 2 km de longitud, visibles en los sectores noreste y sureste del volcán. Este complejo se encuentra emplazado sobre al menos cuatro secuencias de flujos piroclásticos o ignimbritas de edad Mio-Pleistoceno que se extienden ampliamente en el sector Sur, Suroeste y Sureste del complejo (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/797>). En dicho complejo

volcánico se distinguen fallas y fracturas que tienen direcciones NNE-SSO, NE-SO y NO-SE (Bromley et al., 2019; Ubeda, 2011; Valdivia, 2019).

En sus inmediaciones existen 166 centros poblados, distribuidos en 12 distritos, donde habitan más de 5673 personas (Del Carpio et al., 2022).

2.2. Sistema de monitoreo volcánico

La red de vigilancia del volcán Coropuna que opera de manera permanente está compuesta de un total de 5 estaciones vulcanológicas que integran 8 instrumentos: 5 sismómetros de banda ancha, 2 inclinómetros y 1 cámara de vigilancia, los cuales están instalados sobre las laderas del volcán, y áreas aledañas. La instrumentación operativa consigna los equipos de monitoreo de carácter permanente y con capacidad de transmisión de datos en tiempo real (Figura 2), (para mayor detalle referirse al siguiente documento <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>). Sobre la figura se describe el empleo de la diversidad de instrumentos.

2.2.1 Monitoreo Sismovolcánico

El análisis de la sismicidad del volcán Coropuna, obtenida a partir de la Red Sísmica Nacional del IGP, durante los años 2001 y 2002 permitió identificar 9 sismos con magnitudes entre M4.2 a M5.2, localizados en dos zonas: 1) a 24 km al oeste, y 2) 30 km al noreste del volcán Coropuna, cuya fuente se asocia al sistema estructural local de la zona, probablemente asociados a las fallas Chuquibamba y a la zona de fallamiento Pumaranra, al noreste del volcán. Posteriormente, durante el periodo 2008-2010 se han registrado aproximadamente 1000 sismos volcánicos con magnitudes menores a M2.8. La mayor parte de los eventos fueron clasificados como sismos de tipo Volcano–Tectónico (VT) asociados a un proceso de fracturamiento de rocas, cuya fuente estuvo localizado a

menos de 6 km del complejo volcánico nevado Coropuna (Torres et al., 2020, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4786>).

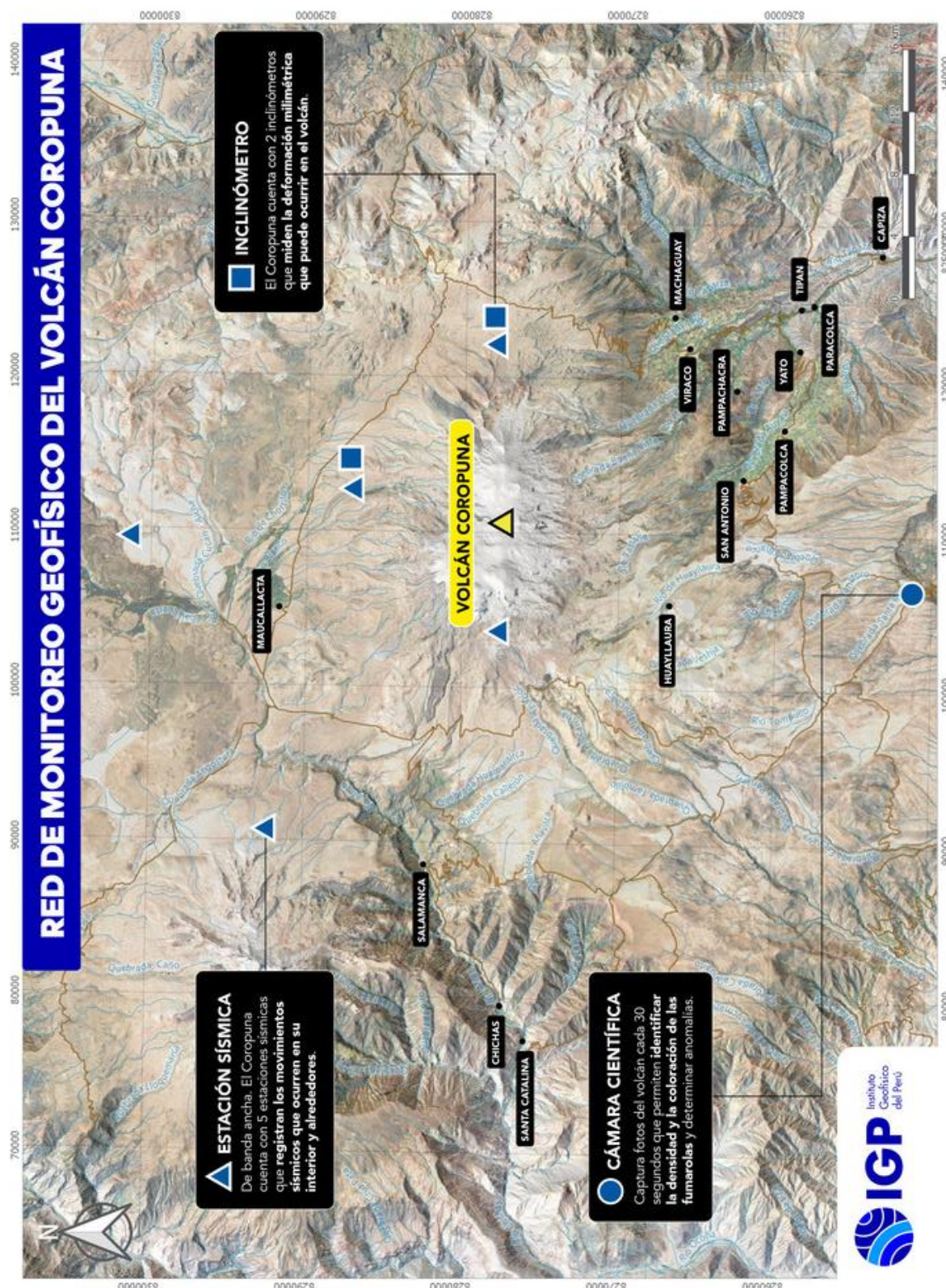


Figura 2. Red de monitoreo geofísico del volcán Coropuna (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/volcanes-monitoreados>).

Mediante la implementación del proyecto de inversión PIP n.º 271840 "Mejoramiento y Ampliación del Sistema de Alerta ante el Riesgo Volcánico y del Observatorio Vulcanológico en la Macro Región Sur del Perú" ocurrida en el año 2018, se realizó la instalación de 5 estaciones sísmicas en los alrededores del volcán Coropuna, los cuales cuentan con transmisión de datos en tiempo real, facilitando así la clasificación y localización de eventos sísmo ligados a la actividad volcánica. Los resultados muestran que durante el periodo mayo de 2018 a abril de 2020 se detectaron aproximadamente 8066 sismos con magnitudes menores a M3.8. Los sismos fueron clasificados en 4 grupos: Volcano Tectónico (VT), Largo Periodo (LP), Tremor (TRE) y eventos relacionados a la dinámica del glaciar (DG). El 85 % de los sismos registrados en el Coropuna son de tipo Volcano Tectónico, asociados al fracturamiento de rocas que ocurre en el interior del volcán, y menos del 9 % corresponden a sismos de tipo Largo Periodo y Tremor, relacionados al movimiento de fluidos (vapor de agua y gases magmáticos). Asimismo, el 6 % de los eventos corresponden a sismos de tipo DG, vinculados a la dinámica del glaciar (deshielo del casquete y dinámica del casquete), esquematizado en la Figura 3 (para más detalles ver tesis <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5116>).

La actividad sísmica detectada entre 2018 a 2020 fue muy leve, motivo por el cual se argumentó que no hay indicios o evidencias sobre un eventual ascenso de material magmático (roca fundida) hacia la superficie, que vaya a generar una reactivación o erupción volcánica. Los estudios realizados por el IGP, muestran que la fuente de ocurrencia de sismos de tipo Volcano Tectónicos (VT) estaría localizado bajo el volcán Coropuna, y estos serían ocasionados por la presencia de un cuerpo remanente de magma, el cual estaría generando una presión de poros y debilitamiento del entorno rocoso y, como consecuencia, el fracturamiento de rocas y la activación de fallas locales. En relación a los sismos de tipo Largo Periodo (LP), estos estarían asociados al paso de fluidos (gases magmáticos, vapor

de agua, etc.), cuya fuente de origen se localiza de bajo del edificio volcánico (ver figura 3).

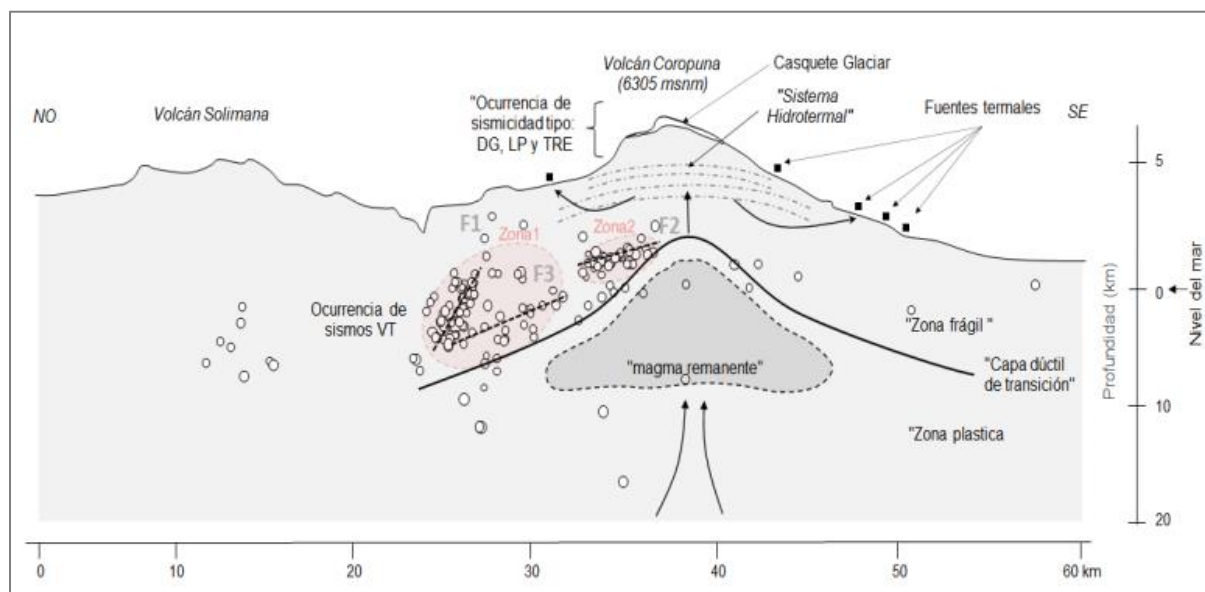


Figura 3, Modelo esquemático sección transversal NO a SE muestra el desarrollo de la actividad sísmica en la zona del complejo volcánica Coropuna. En círculo blanco se representan los sismos y cuadrados fuentes termales (Torres, 2021, <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5116>).

Finalmente, durante el periodo mayo de 2020 a noviembre de 2023, en el volcán Coropuna se detectaron sismos de tipo Volcano – Tectónicos (VT) y Largo Periodo (LP). Respecto a los sismos de tipo VT, durante el periodo de análisis estos no mostraron cambios significativos. En total, se registraron 15394 sismos, lo que representa un promedio, 14 sismos por día. Sin embargo, durante el periodo de agosto de 2020 a febrero de 2021 en el volcán Coropuna se detectó un ligero incremento de sismos de hasta 33 eventos por días, para luego descender a su nivel base. En algunos meses, ocurrió picos máximos de sismicidad de hasta 80 eventos por día registrados en febrero y julio de 2021 y diciembre de 2022, respectivamente (Figura 4). Con relación a los eventos de tipo Largo Periodo, no muestra cambios significativos. En total se registraron 796 sismos de tipo Largo Periodo, representando en promedio 1 sismo por día. En ocasiones, se han registrado picos de hasta 9 sismos por día; por

ejemplo, en enero de 2021, marzo y agosto de 2022 y febrero de 2023, respectivamente (Figura 4).

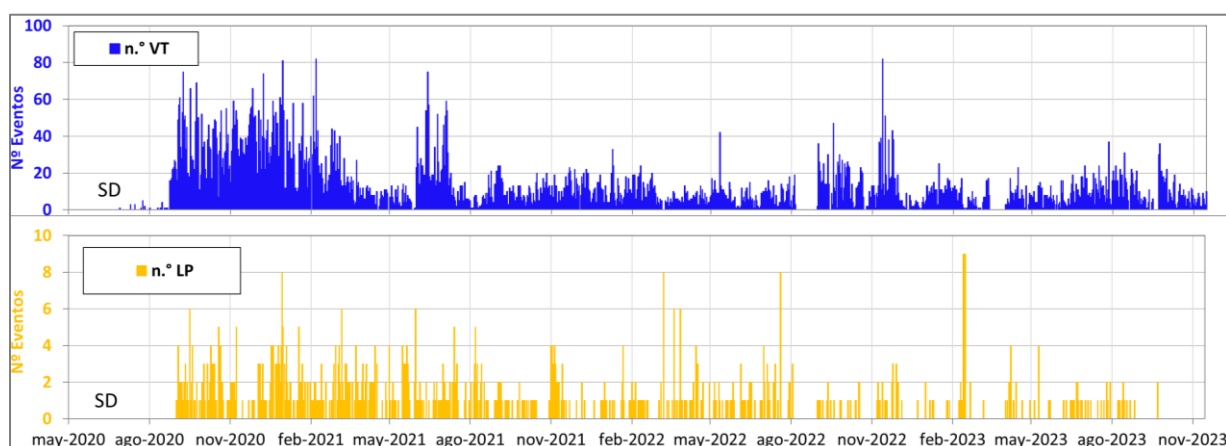


Figura 4, Registro de sismos de tipo Volcano-Tectónico (VT, barras de color azul) y sismos de tipo Largo Periodo (LP, barras de color amarillo) detectadas en el volcán Coropuna en el periodo mayo de 2020 a noviembre de 2023.

2.2.2 Monitoreo de la deformación superficial

Una de las disciplinas de la geofísica, es la geodesia la cual permite cuantificar la deformación volcánica ligada al ascenso de magma a la superficie o una eventual erupción volcánica. Para el monitoreo de la deformación del volcán Coropuna, el IGP analiza los datos recepcionados en tiempo real de dos inclinómetros, los cuales, desde su instalación a fines del año 2019 hasta la fecha, no han registrado deformación alguna del macizo volcánico. En cuanto al monitoreo temporal de la deformación, se aplican las técnicas de Interferometría Diferencial de Apertura Sintética - DInSAR (análisis mensual mediante procesamiento de imágenes satelitales), Medida Electrónica de Distancias (EDM, empleando una estación total, Figura 5) y GNSS (análisis anual, con 8 puntos de control temporales en los alrededores del volcán Coropuna). Los resultados de las mediciones GNSS, muestran desplazamientos mínimos que se asocian a la sismicidad de tipo volcano-tectónico (VT) ligada a la actividad de sistemas de fallas tectónicas locales (Vargas et al., 2020, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4782>). Los resultados obtenidos con el empleo de esta disciplina están acordes con los resultados

obtenidos con la sismología, que muestra que no existe ascenso de magma o roca fundida a la superficie en el volcán Coropuna, por lo cual no existe posibilidades de reactivación volcánica en el corto o mediano plazo (semana o meses).

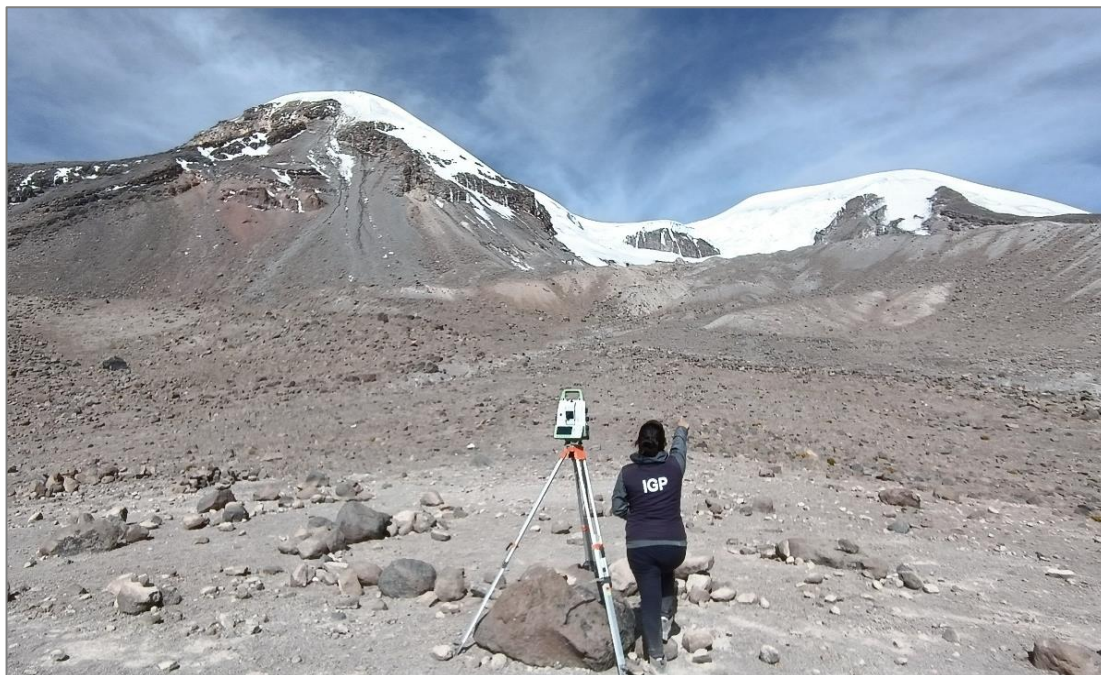


Figura 5. Instalación de un equipo de estación total en el flanco oeste del volcán Coropuna, con el cual se realiza medidas periódicas para estimar el grado de deformación que pueda ocurrir en el volcán.

2.2.3 Monitoreo Geoquímico de fuentes termales

El monitoreo geoquímico también desempeña un papel fundamental en la evaluación y comprensión de la actividad volcánica, pues en un proceso de reactivación o erupción volcánica se registra un incremento de la temperatura de las aguas termales o un incremento en el volumen de las emisiones de gases que emana un volcán, entre ellos el dióxido de azufre (SO_2) o el dióxido de carbono (CO_2). En este contexto, se han implementado diversas tecnologías avanzadas, entre las que se destacan los Espectrómetros de Absorción Óptica Diferencial (DOAS) y las Cámaras Térmicas de Imágenes de Infrarrojos (FLIR), el primero para analizar el flujo del gas SO_2 y el segundo para realizar medidas de la temperatura superficial del volcán

Además, el monitoreo geoquímico se extiende a la medición de parámetros físico-químicos de fuentes termales cercanas al volcán. Estas mediciones proporcionan una comprensión más completa de la actividad geotérmica en una región, permitiendo la detección de posibles alteraciones en la composición y temperatura de los fluidos termales, factores que pueden estar relacionados con la actividad volcánica.

En el Coropuna se realiza en monitoreo de siete fuentes termales ubicadas en áreas aledañas, descritas a continuación:

1. Fuente CR01 – 752419 E, 8266966 N
2. Fuente CR02 – 765512 E, 8268671 N
3. Fuente CR03 – 763846 E, 8269994 N
4. Fuente CR04 – 769182 E, 8265629 N
5. Fuente CR05 – 757052 E, 8273440 N
6. Fuente CR06 – 756678 E, 8291186 N
7. Fuente CR07 – 752528 E, 8267007 N

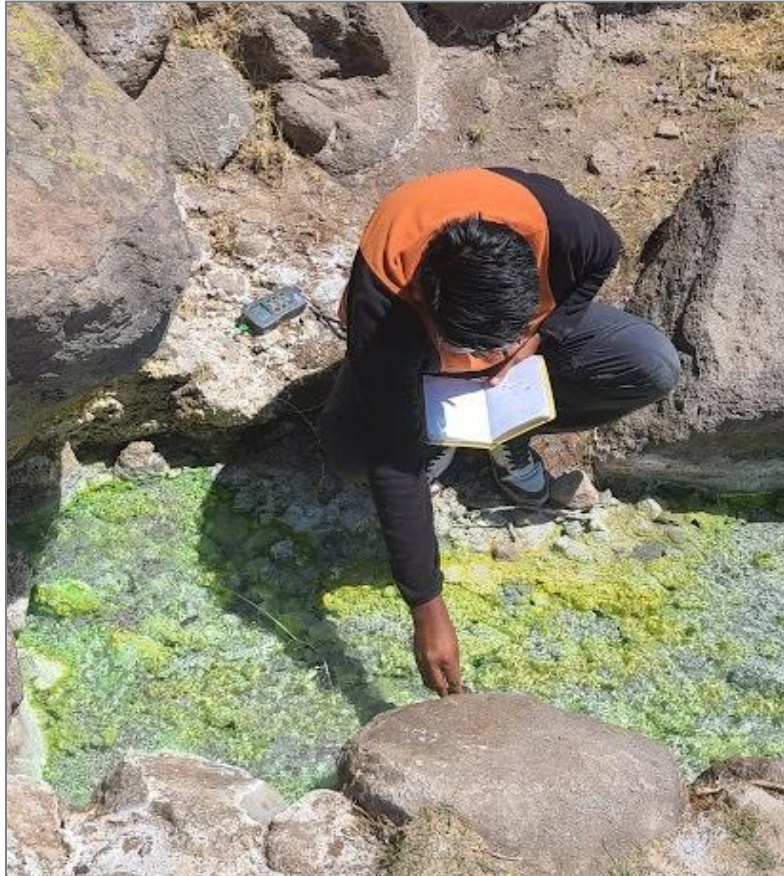


Figura 6: Toma de datos de la fuente termal CR01.

2.2.4 Monitoreo mediante sistemas satelitales

Entre el monitoreo satelital, se analiza los datos obtenidos con el sistema MIROVA, el cual permite la identificación de anomalías térmicas en la superficie del cráter a partir del análisis de imágenes captadas por satélite. Instrumentos como OMI (satélite AURA de la NASA) y TROPOMI (Satélite Sentinel-5) detectan los valores de dióxido de azufre (SO₂) o gases magmáticos emitidos por el volcán. En el caso del volcán Coropuna, no se ha detectado anomalías térmicas o concentraciones anómalas de gases magmáticos.

Asimismo, el análisis de imágenes satelitales Sentinel 1 y 2 realizado en el CENVUL, permite evaluar cambios morfológicos del Coropuna, que en los últimos años no ha presentado variaciones superficiales significativas, adicionales al deshielo del glaciar.

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

Como se ha mencionado anteriormente, el Coropuna, es un volcán activo, el cual puede erupcionar en el futuro. La ocurrencia de una futura erupción volcánica podría fusionar parcialmente el casquete glaciar que alberga en su cima, calculado en 44 km² (Kochtitzky et al., 2018), y posteriormente generar flujos de lodo o lahares que afectarían poblados, terrenos de cultivo e importantes obras de infraestructura que existen en los valles de Majes y Ocoña, en la región Arequipa. En ese contexto, aproximadamente 6 mil personas de las provincias de Condesuyos y Castilla, ubicadas dentro de un radio de 30 km, podrían verse afectados por el descenso de flujos de barro. Además, la principal fuente de agua del valle de Majes proviene de este volcán nevado, la cual se vería contaminada por una eventual erupción volcánica. Asimismo, estudios geológicos reportan evidencias de colapsos en el pasado que pueden volver a presentarse en el futuro (García et al., 1997). (para mayor información revisar el informe <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

El 22 de diciembre de 2016, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) reportó la ocurrencia de un lahar de volumen importante en el sector sur del volcán Coropuna, la cual ocasionó daños en bocatomas y canales de agua de las localidades de Tipán, Pampacolca y Viraco, además de pérdida de zonas de pastoreo por afectación del bofedal “Los Nevados”. Asimismo, el río Majes habría incrementado su caudal hasta en 18 m³/s (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>). Eventos de este tipo podrían ocurrir en el futuro, ocasionados por la precipitación pluvial o por el deshielo de parte del glaciar producto de la reactivación del volcán Coropuna.

Del Carpio et al. (2022), estiman que aproximadamente 1473 personas estarían expuestas ante la ocurrencia de descenso de lahares. En un radio de 30 km del volcán Coropuna se encuentran redes viales, una represa, 4 centros de salud y 61 instituciones educativas (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>).

El IGP con base en el modelamiento numérico de flujos o lahares, utilizando el programa LAHARZ, ha delimitado tres zonas de peligro por descenso de lahares (Figura 7) (ver informe en el siguiente enlace <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>). Las tres zonas de peligro son las siguientes:

- **Zona de alto peligro** (áreas en color rojo en Figura 7): Considera la generación de lahares con volúmenes próximos a los 2 Mm³ con origen en la desglaciación del Coropuna o por precipitaciones pluviales intensas con un alcance aproximado de 22 km que discurriría por las quebradas que descienden por la zona de Tipan y Jollpa. En su recorrido, los poblados de Palljaruta, Rituy, Yato, Cotcota y Paracolca podrían ser afectados. Asimismo, algunos tramos de las carreteras afirmadas Capiza-Pampacolca, Capiza-Viraco, Chuquibamba-Salamanca, Chuquibamba- Cotahuasi y la carretera Pampacolca-Maucallacta-Andahua. Igualmente, están en esta

zona varios canales de regadío ubicados a lo largo del valle de Pampacolca y Tipan.

- **Zona de moderado peligro** (áreas de color naranja en Figura 7): En este escenario se considera la generación lahares con volúmenes moderados del orden de 10 Mm^3 y que afectarían parte de los poblados de Sullunja, Sora Kcasa, Iray, Salamanca, Tipan, Maucallacta-Yachanguillo, Santa Catalina, Andamayo, Ongoro y Quicay. Además, de algunos tramos de las carreteras Andamayo-Tipan, Acoy-Iray-Chuquibamba y Chuquibamba-Andaray-Yanaquihua.
- **Zona de bajo peligro** (áreas de color amarillo en Figura 7): Para este caso, se considera la generación de lahares de gran volumen de 20 Mm^3 y de presentarse, alcanzarían distancias mayores o iguales a 50 km desde el volcán pudiendo represar el río Majes y generar lahares secundarios que afectarían los valles de Majes (Aplao, Corire) y Ocoña, así como las instalaciones de la minera Yanaquihua. También podrían afectar los poblados de Chichas, Arhuin, Viraco, San Antonio, Huami y Acoy. En general, la posibilidad de ocurrencia de estos lahares es muy baja, ya que se producirían por el derrumbe de una parte del casquete glaciar o por la erupción del volcán Coropuna.

2.4. Actividades de difusión

2.1.4.1. Acceso libre a la información

Los datos del monitoreo volcánico son procesados y analizados, cuyos resultados son plasmados en boletines y alertas vulcanológicas, que son difundidas en la página web del CENVUL (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional>), el aplicativo móvil "Volcanes Perú" y a los grupos de WhatsApp de los Centro de Operaciones de Emergencia de cada región, provincia e INDECI.

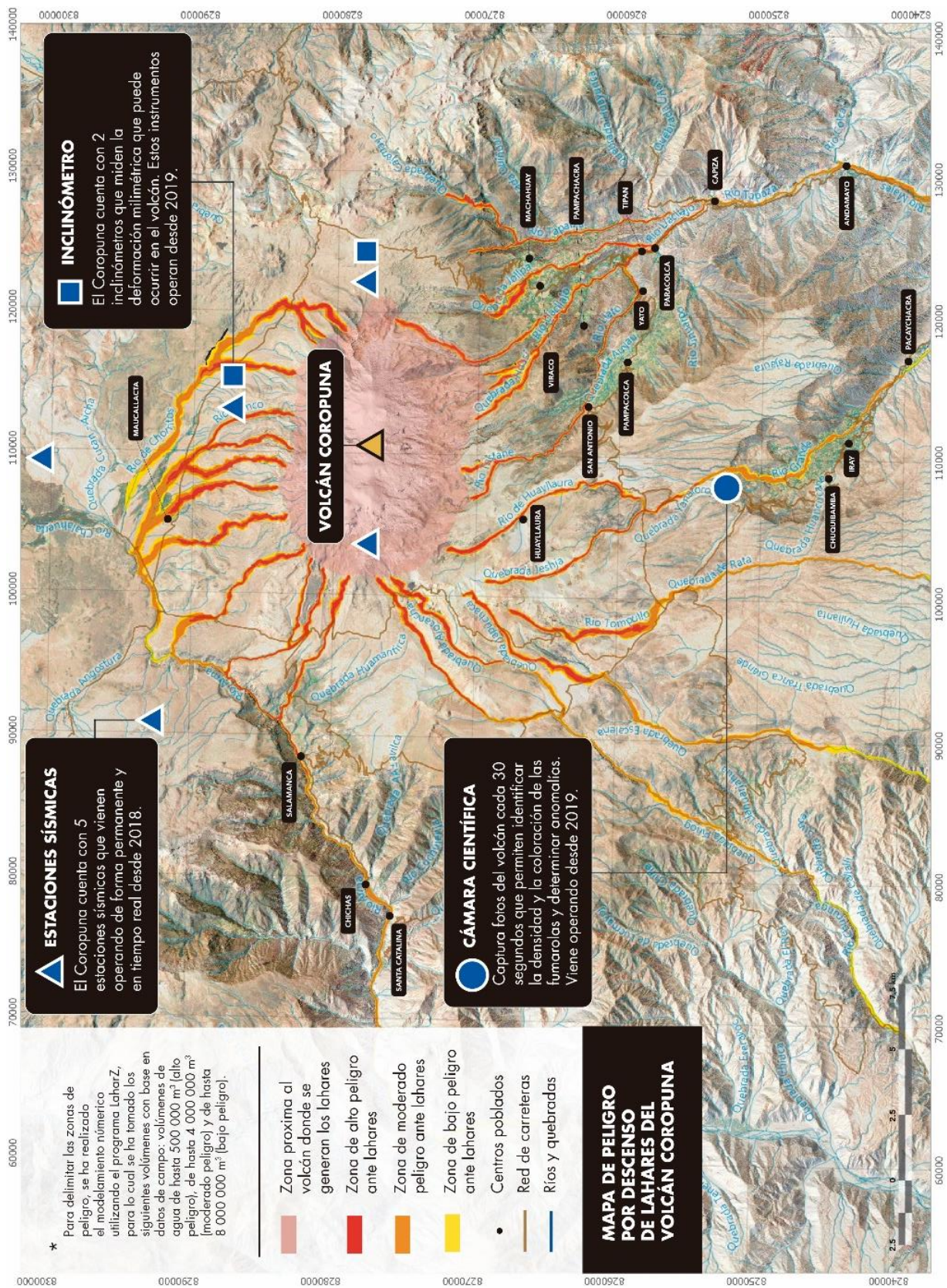


Figura 7. Mapa de escenario de peligro por descenso de lahares en el volcán Coropuna (<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5157>).

El IGP, diariamente genera reportes sobre el estado de actividad dinámica de todos los volcanes monitoreados, entre ellos del volcán Coropuna, dichos reportes son enviados desde la cuenta cenvul@igp.gob.pe al COEN, secretarios técnicos de Defensa Civil de los gobiernos regionales y locales. Información que se encuentra disponible en la página web del CENVUL (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-reportes>). A lo largo del año 2023 se han generado y enviado 323 reportes (al 19 de noviembre de 2023).

Asimismo, el IGP de manera mensual genera boletines vulcanológicos, los cuales detallan sobre el comportamiento dinámico del volcán Coropuna (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/productos-boletines>). Información que es enviada desde la cuenta cenvul@igp.gob.pe al COEN, secretarios técnicos de Defensa Civil de los gobiernos regionales y locales del sur peruano.

Por otro lado, el IGP ha elaborado una plataforma web para uso exclusivo del Centro de Operaciones de Emergencia Regional de Arequipa (Del Carpio et al., 2023), que les permite monitorear en tiempo real los principales volcanes del departamento de Arequipa (Misti, Chachani, Sabancaya y Coropuna). Al respecto, el IGP proporciono los accesos desde marzo de 2022, válidos únicamente para el COER y su módulo de monitoreo (Figura 8).

2.4.2. Socializando la información

Desde el inicio de los trabajos de monitoreo volcánico, en el volcán Coropuna, el IGP ha efectuado actividades educativas y talleres de capacitación dirigidos a las poblaciones asentadas en su zona de influencia, así como a las autoridades políticas de turno.

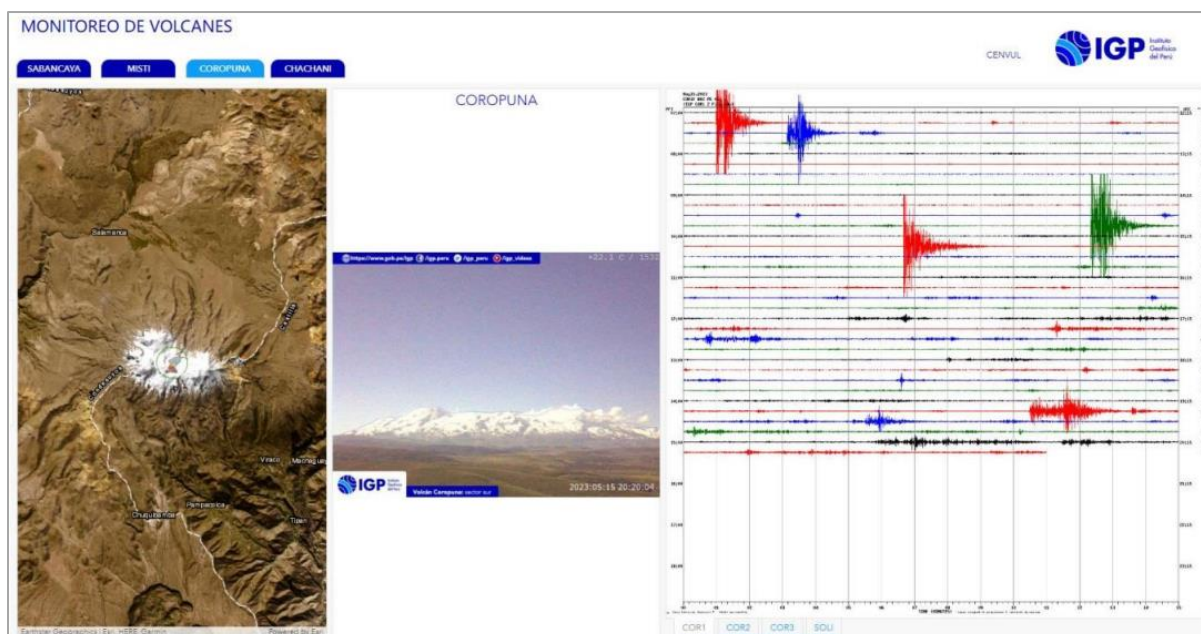


Figura 8. Dashboard de monitoreo de volcanes de Arequipa
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5427>

Al respecto, se puede citar el taller educativo efectuado el 11 de abril de 2019 en la Municipalidad Provincial de Condesuyos (Figura 9, en la que el personal de esta comuna conoció que el IGP vigila, por encargo del Estado peruano, el Coropuna, un volcán activo ubicado a 32 km de esta localidad. Durante ese mismo mes, el IGP visitó la comunidad campesina de Maucallacta, a 14 km del volcán Coropuna. De manera puntual, se realizó un taller educativo con los profesores y estudiantes de la I. E. 40469 Maucallacta (Figura 10), quienes recibieron una explicación detallada de los peligros volcánicos que puede presentar el volcán Coropuna en caso de una erupción, y cómo el IGP vigila su actividad en tiempo real.

Recientemente, en marzo de 2023, se recibió la visita del alcalde de la provincia arequipeña de Castilla, en cuya jurisdicción se ubica el volcán Coropuna. El Sr. Renzo Pastor visitó las instalaciones del Observatorio Vulcanológico del Sur del IGP en el marco de reuniones de coordinación

para la renovación de categoría de Geoparque Mundial de la UNESCO de Colca y Volcanes de Andagua.



Figura 9. Taller educativo en la Municipalidad Provincial de Condesuyos.



Figura 10. Taller educativo con los profesores y estudiantes de la I. E. 40469 de la localidad de Maucallacta.

Durante su visita, la mencionada autoridad conoció la situación actual del volcán Coropuna y los peligros que podría presentar en caso ocurriera una erupción volcánica. En esta oportunidad se ha sentado el compromiso para realizar actividades de capacitación conjunta con las autoridades y población de los distritos cercanos al Coropuna, tales como Viraco y Machaguay, con el fin de sensibilizarlos respecto a lo que significa convivir con un volcán activo (Figura 11).



Figura 11. Actividades de divulgación de información efectuadas en el área de influencia del volcán Coropuna durante los años 2019-2023.

Otro de los aspectos en los que el IGP pone énfasis es el desarrollo de productos informativos que, mediante el empleo de un lenguaje sencillo y claro, comuniquen el estado de los volcanes y cómo la ciencia contribuye en la vigilancia de la actividad volcánica. En el caso del volcán Coropuna, se ha elaborado un cuadríptico informativo (Figura 12), cuya versión web está disponible en el siguiente enlace: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5157>.



Figura 12. Cuadríplico informativo del volcán Coropuna.

2.5. Semáforo de alerta volcánica

El semáforo volcánico es un sistema de información que muestra los diferentes niveles de actividad (pre-eruptiva y eruptiva) que presenta un volcán con base en los parámetros de monitoreo volcánico: sísmicos, deformación, térmico, geoquímico y visual. El semáforo de alerta volcánico considera cuatro (04) colores relacionados con niveles de actividad volcánica (Tabla 1). Dicha información ha sido proporcionada a INDECI y la PCM para su incorporación en el documento del Sistema de Alerta Temprana en caso de erupciones volcánicas, actualmente en proceso de elaboración (Del Carpio et al., 2023).

Los umbrales son valores numéricos que se obtienen con base en registros instrumentales procedentes de las disciplinas de monitoreo volcánico: sísmicos, deformación, térmicos, geoquímicos y visuales obtenidas desde el año 2018 (Tabla 1), consignados en el semáforo de alerta volcánica para la emisión de avisos.

Tabla 1. Umbrales de los parámetros geofísicos, geoquímicos, visuales y satelitales para la emisión de avisos.

Nivel de Actividad	Manifestaciones físicas y químicas de acuerdo al método y técnica de monitoreo				Acciones
	Nivel de sismicidad volcánica	Nivel de deformación	Actividad visual	Anomalías geoquímicas y/o térmicas	
Periodo de Inactividad	<ul style="list-style-type: none"> La sismicidad se encuentra en su nivel base y/o presenta leve variación en el número y energía de los sismos. Algunos volcanes presentan usualmente decenas de sismos Volcano Tectónicos (VT) diarios, menos frecuente es la ocurrencia de sismos Largo Periodo (LP) y algunos presentan señales sísmicas de tipo Híbrido. El número de sismos diarios, de altas frecuencias (VT) y/o bajas frecuencias (LPs y Tornillos), se incrementa en un 25% en un periodo que puede variar entre horas, días o semanas. En algunas ocasiones se presentan enjambres sísmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> No hay cambios en la deformación superficial del volcán, tanto en la componente vertical y/o horizontal (nivel base). 	<ul style="list-style-type: none"> Ausencia o escasa actividad fumarólica (principalmente vapor de agua). A veces la actividad fumarólica es esporádica y puede sobrepasar los 500 m de altura sobre la cima. 	<ul style="list-style-type: none"> Los valores de temperatura superficial del cráter, así como, la temperatura y composición de las fuentes termales próximas a los volcanes están dentro de los parámetros normales. 	<ul style="list-style-type: none"> Mantener el monitoreo constante. Emisión boletín vulcanológico de manera mensual informando sobre el nivel de actividad volcánica.
	<ul style="list-style-type: none"> Detección de sismos tremor, asociados al ascenso de magma y a la perturbación del sistema hidrotérmal. Incremento de la sismicidad con respecto al nivel anterior. Generalmente, las señales sísmicas de tipo Híbrido y LPs, ambas asociadas a la circulación de fluidos volcánicos, se incrementan en más del 25%. Se registran explosiones por día. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de velocidad de deformación de las componentes vertical y/o horizontal respecto al nivel anterior. Registro de anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma. Detección de emplazamiento de domos mediante imágenes radar. 	<ul style="list-style-type: none"> Emisiones fumarólicas constantes con alturas superiores a los 500 m sobre el cráter. Se observa pequeños pulsos de ceniza y/o aparición de nuevos puntos de emisión observados en el cráter y/o en las laderas del volcán. Se detectan anomalías térmicas. Se registra constantemente emisión de térfas (ceniza, lapilli, escoria, etc.) con alturas inferiores a 6 km sobre la cima del volcán que tendrían alcance local y regional. Detección de anomalías térmicas menores a 100 megavarios (MW). Se observa el emplazamiento de domos de lava. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento del 5% al 20% de la temperatura de fumarolas en el cráter y/o fuentes termales próximas al volcán. Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan continuamente los 10 DU. 	<ul style="list-style-type: none"> Emisión boletín vulcanológico de manera semanal. Mantener el monitoreo constante.
Periodo de actividad	<ul style="list-style-type: none"> Detección de sismos tremor, asociados al ascenso de magma y a la perturbación del sistema hidrotérmal. Incremento de la sismicidad con respecto al nivel anterior. Generalmente, las señales sísmicas de tipo Híbrido y LPs, ambas asociadas a la circulación de fluidos volcánicos, se incrementan en más del 25%. Se registran explosiones por día. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento crítico de velocidad de las componentes vertical y/o horizontal. Registro de importantes anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma. Detección de emplazamiento de domos de lava con riesgo de colapso y generación de flujos piroclásticos y/o avalanchas. 	<ul style="list-style-type: none"> Se registra emisión de térfas con alturas superiores a 5 km que tendrían alcance regional, nacional y/o continental. Se observa el descenso de flujos piroclásticos y/o flujos de lava. Generación de lahares asociados al emplazamiento de flujos piroclásticos y/o fusión de hielo y nieve. Presencia de anomalías térmicas, muchas veces mayores a 100 MW. Se observa el colapso de domos. 	<ul style="list-style-type: none"> Emanaciones constantes de vapor de agua y gases (SO₂, CO₂, etc.). Incremento sostenido de la temperatura de la superficie del cráter y/o fuentes termales, con respecto al nivel anterior. Aparición de nuevas fuentes termales, campos fumarólicos y/o geiser próximo al volcán. Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan continuamente los 15 DU 	<ul style="list-style-type: none"> Emisión un boletín de manera semanal informando sobre el incremento de la actividad. Mantener el monitoreo constante, y el seguimiento de la actividad volcánica debe ser riguroso.
	<ul style="list-style-type: none"> Se incrementa en más del 50% el número y la energía de las señales sísmicas (Explosiones, LP, VT, Tremor, etc.), considerados como de nivel crítico. Se registran señales asociadas a nuevos aportes de magma y/o incremento de señales de tipo Híbrido. Explosiones más frecuentes y energéticas 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento crítico de velocidad de las componentes vertical y/o horizontal. Registro de importantes anomalías de deformación que evidencian el ascenso de magma. Detección de emplazamiento de domos de lava con riesgo de colapso y generación de flujos piroclásticos y/o avalanchas. 	<ul style="list-style-type: none"> Se registra emisión de térfas con alturas superiores a 5 km que tendrían alcance regional, nacional y/o continental. Se observa el descenso de flujos piroclásticos y/o flujos de lava. Generación de lahares asociados al emplazamiento de flujos piroclásticos y/o fusión de hielo y nieve. Presencia de anomalías térmicas, muchas veces mayores a 100 MW. Se observa el colapso de domos. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de la tasa de emisión de gases volcánicos, principalmente, SO₂ y CO₂, con respecto al nivel anterior. Cambio de composición de las fuentes termales y/o incremento del pH del agua. Aparición de nuevas fuentes fumarólicas en amplias áreas. Los niveles de densidad de SO₂ sobrepasan los 20 DU 	<ul style="list-style-type: none"> Reunión permanente del grupo de especialistas. Emisión reporte vulcanológico diario informando sobre la actividad. Evaluar permanentemente el estado de las variables de monitoreo. Emisión de pronósticos sobre la actividad con una ventana máxima de 7 a 15 días.

CONCLUSIONES

- Desde año 2018 el Instituto Geofísico del Perú monitorea de manera permanente el volcán Coropuna, con equipos que proporcionan información sísmica, de deformación, geoquímica, y parámetros fisicoquímicos mediante estaciones permanentes y temporales. La data recolectada es procesada y analizada por el CENVUL, donde se generan reportes diarios, boletines vulcanológicos mensuales e informes técnicos, los cuales son enviados al COEN y jefes de Defensa Civil de los gobiernos regionales y locales. Además, son publicados en la página web del CENVUL, para su libre descarga.
- Se han realizado estudios de evaluación de peligro por descenso de lahares del volcán Coropuna, en la cual se muestra un mapa por descenso de lahares (flujos de lodo) considerando tres zonas de peligro: bajo, moderado y alto, con base a tres tipos de volumen de agua. Asimismo, el IGP ha publicado dos informes técnicos y ha asesorado una tesis de maestría, sobre la actividad sísmica del volcán Coropuna registrada entre los años 2001 y 2020, así como la deformación del cono volcánico cuantificada mediante campañas temporales.
- Como parte de las actividades de difusión sobre estado del volcán Coropuna, el IGP ha elaborado un dashboard personalizado para uso del COER- Arequipa, que permite acceso a la información geofísica en tiempo real. Asimismo, el IGP ha diseñado un cuadríptico con información acerca del volcán Coropuna y que resume el monitoreo volcánico que realiza, incluyendo un mapa con las estaciones geofísicas instaladas con los tres escenarios de lahares, y una breve explicación de los peligros volcánicos al que está expuesto la población aledaña, los cuales han sido entregados en talleres de divulgación científica y en visitas de autoridades y población al CENVUL.

BIBLIOGRAFÍA

- Bromley, G., Thouret, J., Schimmelpfennig, I., Mariño, J., Valdivia, D., Rademaker, K., & ASTER-Team. (2019). In situ cosmogenic ^3He and ^{36}Cl and radiocarbon dating of volcanic deposits refine the Pleistocene and Holocene eruption chronology of SW Peru. *Bulletin of Volcanology*, 64.
- Del Carpio, J., Rivera, M., Centeno, R., Torres, J., Lazarte, I., Vargas, K., Concha, J. (2023). Estado del conocimiento sobre la actividad de los volcanes activos de Arequipa. Informe Técnico N°010-2023/IGP, <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5427>
- Del Carpio, J., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., & Puma, N. (2022). Evaluación del Peligro Volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres. Informe Técnico N°029-2022/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima. <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5276>.
- García, F., Chorowicz, J., & Legros, F. (1997). ¿a caldera Chachani, gran centro explosivo Plioceno-Holoceno del Sur del Perú? Identificación y evolución en imágenes landsat y radar ERS. *Congreso Peruano de Geología*, 449-454.
- Rivera, M., Del Carpio, J., Tavera, H., Cruz, J., Vargas, K., Torres, J., & Concha, J. (2021). Análisis y evaluación de escenarios críticos por descenso de lahares en volcanes peruanos. Instituto Geofísico del Perú, Lima. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4927>
- Torres, J. L. (2021). Análisis de la actividad sismovolcánica en el complejo volcánico nevado Coropuna y alrededores durante el periodo mayo 2018 - abril 2020. (Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias de la Tierra, con mención en Exploración Geológica). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5116>
- Torres, J., Del Carpio, J., Rivera, M. (2020). Evaluación y análisis de la actividad sísmica en el complejo volcánico nevado Coropuna (periodos 2001-2002, 2008-2010 y 2018-2019). Instituto Geofísico del Perú, <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4786>).

- Ubeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico nevado Coropuna, (cordillera occidental de los andes centrales). Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Valdivia, D. (2019). Evaluación de peligros volcánicos por flujos de lahares del complejo volcánico nevado Coropuna. Tesis pregrado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Vargas, K., Cruz, J., Villegas, J. (2020). Monitoreo de la deformación volcánica con GNSS en los volcanes activos del Perú. Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima.
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4782>.
- Vargas, K., Rivera, M., Mamani, J., Soto, E., Concha, J., Valdivia, D., Del Carpio, J. (2023). Estado del conocimiento sobre la actividad de los volcanes activos de la región Tacna. Informe Técnico N°022-2023/IGP, Instituto Geofísico del Perú, Ciencias de la Tierra Sólida, Lima.
<https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5457>.

