



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



IGP

Instituto
Geofísico
del Perú

EVALUACIÓN GEOFÍSICA DEL PROCESO DE EMISIÓN DE LODO EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE SONGOÑA

(Distrito de San Pablo, Provincia de Canchis, Región Cusco)

Informe Técnico n.º 021-2025/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima-Perú
Agosto, 2025

CRÉDITOS

Juan Carlos Castro Vargas
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional del IGP

Juan Carlos Gómez
Director de la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP

Evaluación geofísica del proceso de emisión de lodo en la comunidad campesina de Songoña:
(Distrito de San Pablo, Provincia de Canchis, Región Cusco)
Informe técnico

Katherine Vargas
David Valdivia
Marco Rivera
Hernando Tavera
Autores

Hernando Tavera
Jorge Concha
Edición de contenido

Jorge Concha
Diseño y diagramación

Este informe ha sido elaborado por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate, Lima
Teléfono: +5113172300

Accede libremente al Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) para descargar este informe:
<https://repositorio.igp.gob.pe/>



REGEN

Lima, agosto de 2025

Programa Presupuestal 068
REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS
POR DESASTRES

ESTUDIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES

Actividad
Generación de información y monitoreo de peligro volcánico

EVALUACIÓN GEOFÍSICA DEL PROCESO DE EMISIÓN DE LODO EN LA COMUNIDAD CAMPESINA DE SONGOÑA

(Distrito de San Pablo, Provincia de Canchis, Región Cusco)



Lima, Perú
Agosto de 2025

RESUMEN

La estructura, denominada el “volcán más pequeño del mundo”, ubicada en el distrito de San Pablo, región Cusco, corresponde a un cono de lodo generado por la surgencia de sedimentos arcillosos y agua debido a la presión de gases subterráneos que arrastran dichos materiales a la superficie; por lo tanto, no se trata de un volcán. El cono de lodo tiene dimensiones reducidas, con 1.52 m de largo, 1.4 m de ancho y 0.44 m de alto, y cubre un área aproximada de 17.94 m².

De acuerdo con el análisis de deformación del suelo y temperatura mediante datos satelitales (DInSAR y FIRMS), no se identificaron materiales volcánicos ni anomalías térmicas ni deformaciones en el terreno. El análisis de los parámetros físicos y químicos del agua *in situ* revelaron temperaturas frías (–1 °C a 13 °C), pH neutro a ligeramente alcalino (7 a 8) y valores elevados de sólidos disueltos (2000 ppm) y conductividad eléctrica (3999 µS/cm), que alcanzan el límite máximo del equipo utilizado. Estos parámetros son consistentes con aguas mineralizadas provenientes de capas profundas. Por otro lado, las muestras de lodo indican altos niveles de hierro, sodio y magnesio, sin presencia significativa de metales pesados tóxicos. Asimismo, el análisis de una muestra de agua cercana, arrojó un contenido de mercurio en una concentración de 0.0046 mg/L, que excede el límite permisible para consumo humano.

CONTENIDO

5	Resumen
8	Introducción
8	Ubicación del área de estudio
9	Reportes preliminares
10	Contexto geológico y geodinámico
11	Escenarios similares
12	Metodología
12	Trabajo previo de gabinete
12	Levantamiento de datos de campo
15	Trabajo posterior de gabinete
16	Resultados
16	Interferometría diferencial de apertura sintética (DInSAR)
16	Imágenes térmicas FIRMS (NASA)
18	Parámetros físico-químicos <i>in situ</i>
18	Modelado fotogramétrico con dron
19	Análisis físico-químico de muestras de lodo y agua
21	Interpretación y discusión
21	Resultados analíticos
21	Procesos no asociados a la actividad volcánica
22	Trabajos de difusión y sensibilización
24	Conclusiones
25	Recomendaciones
26	Referencias
27	Anexos

Foto IGP



Medición de temperatura y captura de imágenes térmicas del "volcán de lodo".

1. Introducción

A inicios del mes de julio de 2025, se toma conocimiento de que, en el distrito de San Pablo (región Cusco), se viene formando una estructura conocida como “el volcán más pequeño del mundo”, suceso que generó gran interés y, a la vez, preocupación por parte de la población local debido a una “eventual” erupción volcánica. Este supuesto volcán se formó por la emisión de lodo y agua desde un agujero formado en medio de un terreno rocoso que, con el transcurrir del tiempo, se fue acumulando y dio forma a un cono de lodo.

Para comprender este proceso, el Ministerio del Ambiente (MINAM), a través del Instituto Geofísico del Perú (IGP), como organismo responsable del estudio de fenómenos geofísicos en el país, realizó una inspección técnica-científica, durante los días 10 y 11 de julio de 2025, en la comunidad campesina de Songoña, distrito de San Pablo, en coordinación con autoridades de dicho distrito y

líderes de la comunidad.

El presente informe expone la evaluación técnica realizada sobre el fenómeno, con el fin de determinar su origen y evaluar si corresponde a una manifestación volcánica, hidrotermal, antrópica u otra, y orientar a las autoridades y población sobre su naturaleza y posibles acciones de monitoreo.

1.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la comunidad campesina de Songoña, distrito de San Pablo, provincia de Canchis, región Cusco (Figura 1).

El acceso a la zona por medio de vehículo se realiza desde la carretera longitudinal de la sierra sur, que conecta con el distrito de San Pablo. A la altura de la Institución Educativa Libertador Simón Bolívar, se toma un desvío en dirección noreste,

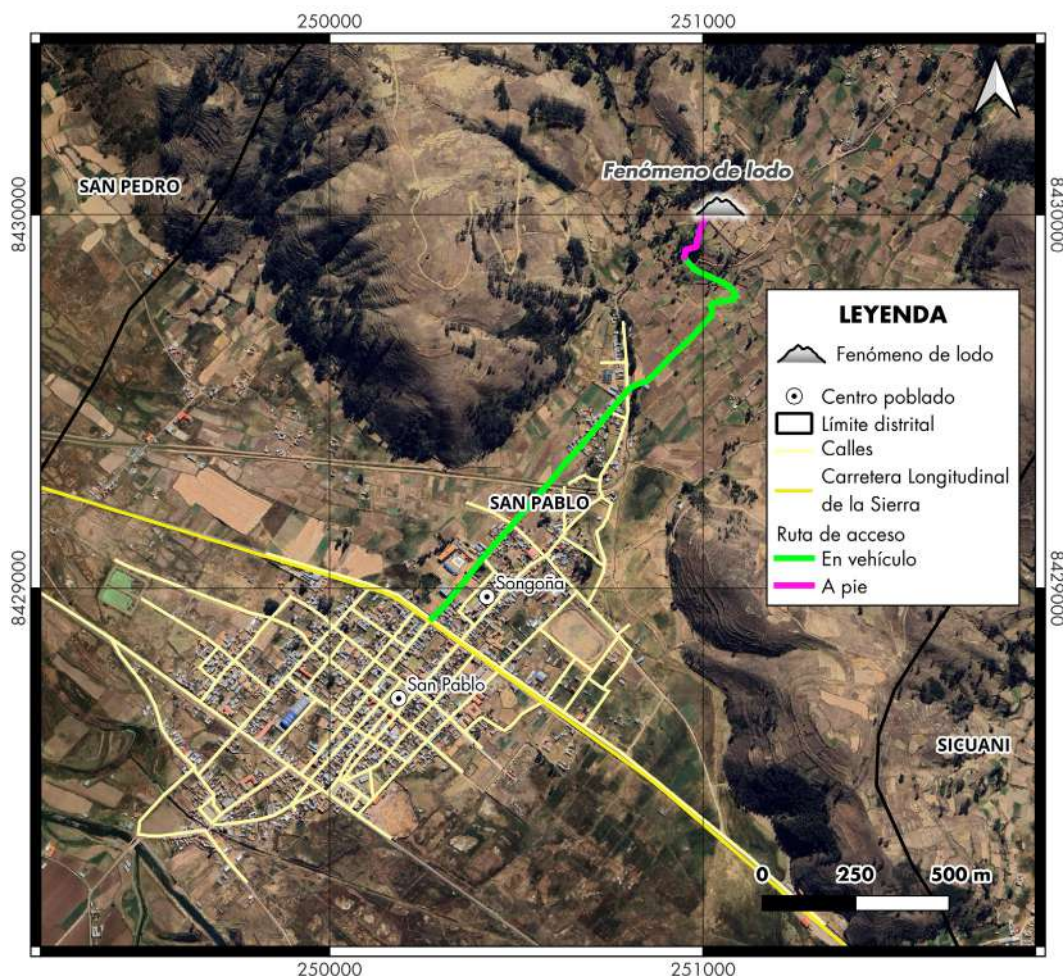


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

hasta una distancia aproximada de 1.4 km (línea verde en Figura 1). Posteriormente, se continúa a pie por aproximadamente 200 m, también en dirección noreste (línea rosada en Figura 1), hasta llegar al punto de interés (ícono de fenómeno de lodo en Figura 1).

1.2 Reportes preliminares

Según testimonios de los pobladores de la comunidad campesina de Songoña, el proceso se habría iniciado como la emanación de lodo

desde un agujero en el suelo. Esta actividad casi continua dio origen a un pequeño cono de sedimentos que, en el primer semestre de 2025 no superaba los 20 cm (Figura 2).

Durante los meses de junio y julio de 2025, la estructura incrementó notablemente de tamaño, prácticamente duplicando su altura, debido al aporte continuo de material lodoso. Este crecimiento acelerado generó mayor atención entre los habitantes, quienes comenzaron a difundir imágenes y videos a través de redes sociales que captaron rápidamente el interés de medios de comunicación locales y nacionales.



Figura 2. Fotografías del cono de lodo de Songoña en el primer semestre de 2025 (cortesía: Sr. Néstor, poblador de Songoña).

1.3 Contexto geológico y geodinámico

Los estudios geológicos previos realizados en la zona de estudio muestran que la unidad rocosa más antigua corresponde al Grupo Ambo (Cm-a2), de edad Paleozoica (Devónico–Carbonífero), compuesta por conglomerados, areniscas cuarzosas, limolitas y lutitas (Audebaud, 1973). Esta unidad está acompañada por la Formación Ananea (SD-a3), también de edad Paleozoica, constituida por lutitas, areniscas cuarzosas, limolitas y areniscas cuarzosas (Sánchez & Zapata, 2003). En tercer lugar, se distinguen depósitos glaciario-fluviales (Q-glfi) del Cuaternario reciente, conformados por gravas, arenas y limos.

Igualmente, se identifican depósitos aluviales recientes (Qh-al), compuestos por bloques, gravas, arenas y limos, que rellenan las quebradas de la zona (Sánchez y Zapata, 2003). Es precisamente sobre esta última unidad más reciente donde se emplaza el cono de lodo (Figura 3).

Desde el punto de vista estructural, en la zona se identifican lineamientos y fallas con movimiento indefinido de dirección NO-SE, lo que indica una región estructuralmente activa (Figura 3). Además, aproximadamente a 2 km al noreste del cono de lodo, se observa una agrupación de fallas normales, también en dirección NO-SE, que sugiere un régimen de esfuerzos extensionales o una relajación cortical local, lo cual podría favorecer el ascenso de fluidos o la inestabilidad del terreno.

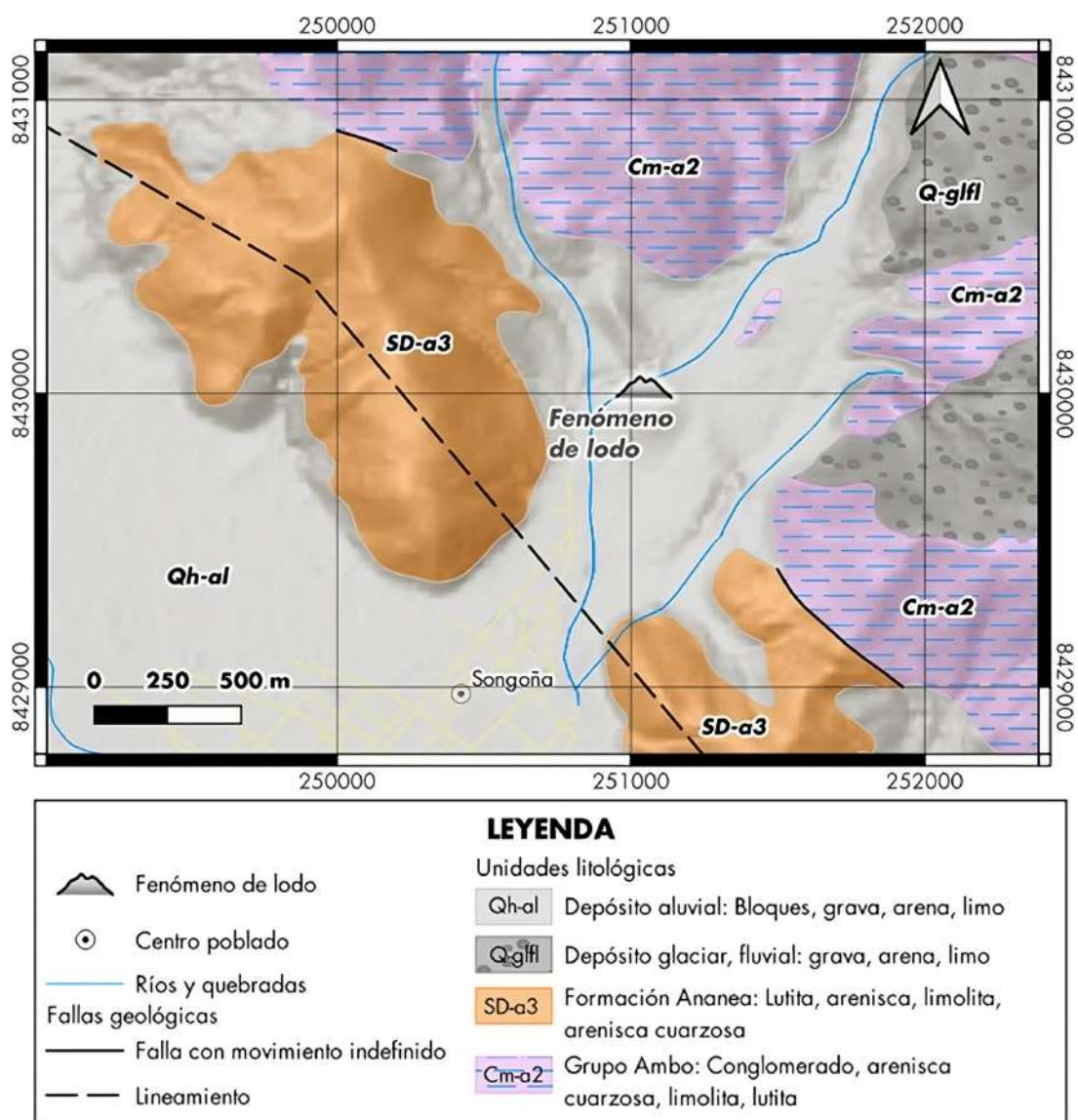


Figura 3. Mapa geológico y geodinámico de la zona de estudio (tomado del cuadrángulo geológico de Sicuani, 29T- Geocatmin).

1.4 Escenarios similares

Los “volcanes” o conos de lodo son procesos naturales que se han presentado en diversas partes del mundo, usualmente en regiones tectónicamente activas o asociadas a cuencas sedimentarias donde existe una alta presión de fluidos en el subsuelo. Entre los casos más conocidos se encuentra el “volcán de lodo de Lusi” en Sidoarjo (Indonesia), que comenzó a emanar lodo en 2006 y se ha mantenido activo desde entonces, afectando a la población local mediante extensas inundaciones de lodo caliente y la emisión continua de gases como vapor de agua, CO₂ y metano. Su comportamiento se ha visto intensificado por la cercanía a un complejo volcánico, lo que genera un alto gradiente térmico en el subsuelo (Mazzini et al., 2007). Otro ejemplo es el “Campo de volcanes de lodo de Gobustan”, en Azerbaiyán, donde existen más de 400 conos de lodo que recurrentemente eyectan lodo, aguas salinas y gases hidrocarburos como metano. Estos fluidos provienen de zonas profundas y su actividad está relacionada con un sistema de alimentación subterráneo complejo (Planke et al.,

2003). A diferencia de este caso, en San Pablo no se han identificado gases hidrocarburos ni temperaturas elevadas, lo que sugiere una dinámica más superficial y menos energética (Figura 4).

En América del Sur destacan los volcanes de lodo del cinturón del Sinú en el Caribe colombiano, formados por el ascenso de sedimentos arcillosos y gases, debido a la acumulación de presión en zonas con pliegues y fallas activas. Este fenómeno ocurre en un contexto de compresión tectónica y acumulación rápida de sedimentos. Se han identificado más de 60 estructuras, algunas con eyecciones violentas asociadas a la presencia de metano. El material expulsado está compuesto principalmente por arcillas como caolinita y esmectita, cuya proporción determina si el sistema tiende a despresurizarse o mantenerse sellado y con presión (Carvajal & Mendivelso, 2017). Aunque estos “volcanes de lodo colombianos” se desarrollan en un ambiente costero-marino, diferente al entorno andino de San Pablo, comparten características como su origen no magmático, el papel de los sedimentos arcillosos profundos y la influencia de estructuras tectónicas activas (Figura 4).



Figura 4. Escenarios de volcanes de arena en Indonesia, Azerbaiyán, Colombia y Perú.

2. Metodología

El presente estudio se desarrolló en tres fases: trabajo previo de gabinete, levantamiento de datos en campo y análisis posterior de gabinete, detallados a continuación:

2.1 Trabajo previo de gabinete

Antes de la salida a campo, se realizó la recopilación bibliográfica de antecedentes geológicos y geodinámicos de la zona de estudio, con el objetivo de comprender el contexto estructural y tectónico en el que ocurría la emisión de lodo. Como parte de esta fase, también se llevó a cabo la identificación de anomalías de deformación superficial en la zona de San Pablo, mediante la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (DInSAR). Esta técnica permite detectar desplazamientos milimétricos del terreno comparando imágenes de radar adquiridas por satélites en distintas fechas. Para este análisis, se descargaron imágenes Sentinel-1 desde la plataforma del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), específicamente tres imágenes en órbita descendente: una correspondiente al satélite Sentinel-1A, del 5 de julio de 2024, y dos del satélite Sentinel-1C, del 24 de junio y 6 de julio de 2025. Estas imágenes fueron seleccionadas por su cobertura y proximidad temporal al periodo de mayor reporte de actividad del fenómeno de lodo.

Adicionalmente, se evaluaron posibles presencias de anomalías térmicas mediante la plataforma FIRMS (Fire Information for Resource Management System) de la NASA, la cual proporciona datos casi en tiempo real sobre focos de calor en la superficie terrestre de un área dada, en especial en la zona de San Pablo (Cusco). Se consultaron registros correspondientes al periodo comprendido entre julio de 2024 y julio de 2025, con el objetivo de identificar indicios térmicos persistentes asociados al fenómeno.

2.2 Levantamiento de datos de campo

Los días 10 y 11 de julio de 2025, se ejecutó la toma de datos en campo, proceso que se detalla a continuación:

- **Medición de parámetros físico-químicos *in situ***

Se evaluaron parámetros como la temperatura del suelo y lodo, con una cámara térmica FLIR y un termómetro digital, así como el pH, la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos (TDS), empleando un multiparámetro portátil. La medición térmica con cámara FLIR se realizó antes del amanecer, alrededor de las 6:00 a. m., para evitar la interferencia de la radiación solar en los valores medidos (Figura 5). Se adquirieron fotografías durante al menos 30 minutos, tanto del cono principal como su entorno inmediato.



Figura 5. Adquisición de imágenes térmicas de la zona de estudio con cámara FLIR.



Figura 6. Medición de temperatura con termómetro Hanna (izquierda) y con equipo multiparámetro (derecha).

El termómetro Hanna y el equipo multiparámetro (Figura 6) se sumergieron en las zonas de emanación por aproximadamente un minuto, hasta lograr la estabilización de las lecturas. Se realizaron dos lecturas con ambos equipos: la primera a las 8:20 a. m. y la segunda a las 11:10 a. m.

Por la tarde, se realizó la medición de parámetros físico-químicos en tres fuentes de agua ubicadas dentro de un radio de 2 km. La primera fuente fue evaluada a las 3:00 p. m., en el punto de coordenadas UTM 250160 E y 8429364 N. La segunda fuente, medida a las 3:40 p. m., se encuentra en las coordenadas 250750 E y 8428520 N. Finalmente, la tercera fuente fue medida a las 4:00 p. m. en el punto de coordenadas 251232 E y 8428187 N. Todas las coordenadas están referidas al sistema UTM, Zona 19S.

• Recolección de muestras de lodo y agua

Se recolectó una muestra de lodo directamente del centro de la estructura cónica, en el punto de emanación principal, cuyas coordenadas son 251052 E, 8430024 N, Zona 19S (Figura 7).



Figura 7. Recolección de muestra de lodo.

Asimismo, se tomó una muestra de la fuente de agua más representativa, conocida como Cusjutunku, que solía ser utilizada para beberla con fines purgativos. Esta fuente se encuentra ubicada a 1.8 km del cono de lodo, en la coordenada 251232 E, 8428187 N, Zona 19S (Figura 8).

Ambas muestras fueron recolectadas en frascos de polietileno de uso común en laboratorio, los cuales permiten conservar adecuadamente las propiedades físico-químicas. Posteriormente, las muestras fueron etiquetadas y resguardadas para su posterior análisis y envío a laboratorios especializados, garantizando su trazabilidad e integridad.



Figura 8. Recolección de muestra de agua en fuente Cusjutunku.

- **Sobrevuelo con dron y establecimiento de punto de control geodésico**

Para generar un modelo digital de elevación de alta resolución, se ejecutó un levantamiento aerofotogramétrico mediante un dron multirrotor (Figura 9). Previamente al vuelo, se instaló y midió un punto de control geodésico (VL-01) en las inmediaciones del cono de lodo, utilizando un equipo GNSS Trimble R10, en modo RTK (Cinemático en Tiempo Real). Esto permitió

obtener coordenadas precisas para corregir y georreferenciar las imágenes obtenidas por el dron (Tabla 1), a fin de reducir errores y obtener una proyección precisa de la nube de puntos.

Tabla 1. Punto de control geodésico VL-01.

Código	VL-01
Coordenadas UTM este	251054.031
Coordenadas UTM norte	8430029.345
Elevación m s. n. m.	3571



Figura 9. Fotografía aérea adquirida con el dron multirrotor.

2.3 Trabajo posterior de gabinete

Esta fase incluyó el procesamiento fotogramétrico de las imágenes de dron con ayuda del *software* Agisoft Metashape, que permite generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) y la reconstrucción tridimensional del terreno a partir del alineamiento de imágenes multivista. El procesamiento incorporó la información del punto de control geodésico para mejorar la precisión espacial del modelo.

Además, se procedió con la redacción del presente informe técnico, y el envío de muestras de lodo y agua recolectadas en campo a un laboratorio especializado, con el fin de realizar análisis físico-químicos detallados. Finalmente, todos los parámetros recolectados fueron integrados para una interpretación conjunta del fenómeno observado.

3. Resultados

Los resultados provienen de los análisis interferométrico satelital y térmico, la medición de parámetros físico-químicos *in situ*, el modelado fotogramétrico del área afectada, así como el análisis de resultados de laboratorio de las muestras recolectadas.

3.1 Interferometría diferencial de apertura sintética (DInSAR)

En el interferograma generado con imágenes del satélite Sentinel-1, correspondientes al 5 de julio de 2024 y al 6 de julio de 2025 (Figura 10), se observan algunos píxeles con variación de color que podrían estar relacionados con cambios en la cobertura vegetal existente en áreas aledañas. Asimismo, a pesar de que el cono de lodo constituye un cambio morfológico bastante local, este no considera la deformación del terreno en términos geodinámicos, como levantamientos o hundimientos del suelo asociados a actividad tectónica o volcánica.

Los resultados a partir del análisis interferométrico

no evidencian deformación significativa del terreno a gran escala en el área evaluada. De manera similar, el interferograma generado con imágenes de fechas más cercanas, 24 de junio y 6 de julio de 2025 (Figura 11), confirma la ausencia de deformación superficial en el terreno.

3.2 Imágenes térmicas FIRMS (NASA)

El sistema FIRMS de la NASA emplea sensores satelitales como MODIS y VIIRS para detectar anomalías térmicas en la superficie terrestre. Estas anomalías corresponden a cualquier fuente de calor intensa, como incendios forestales, quemas agrícolas o actividad volcánica, ya que los sensores registran aumentos anómalos de temperatura sin identificar su origen específico. El análisis de datos FIRMS en el área de estudio, correspondiente al periodo de julio de 2024 a julio de 2025, no revela anomalías térmicas asociadas al fenómeno de emisión de lodo u otros que pudieran ocurrir en la zona. Sin embargo, se registraron focos térmicos en septiembre de 2024, a más de 2.5 km del sitio del fenómeno, hacia el noreste y suroeste, relacionados con la quema de vegetación (ver recuadros rojos en la Figura 12).

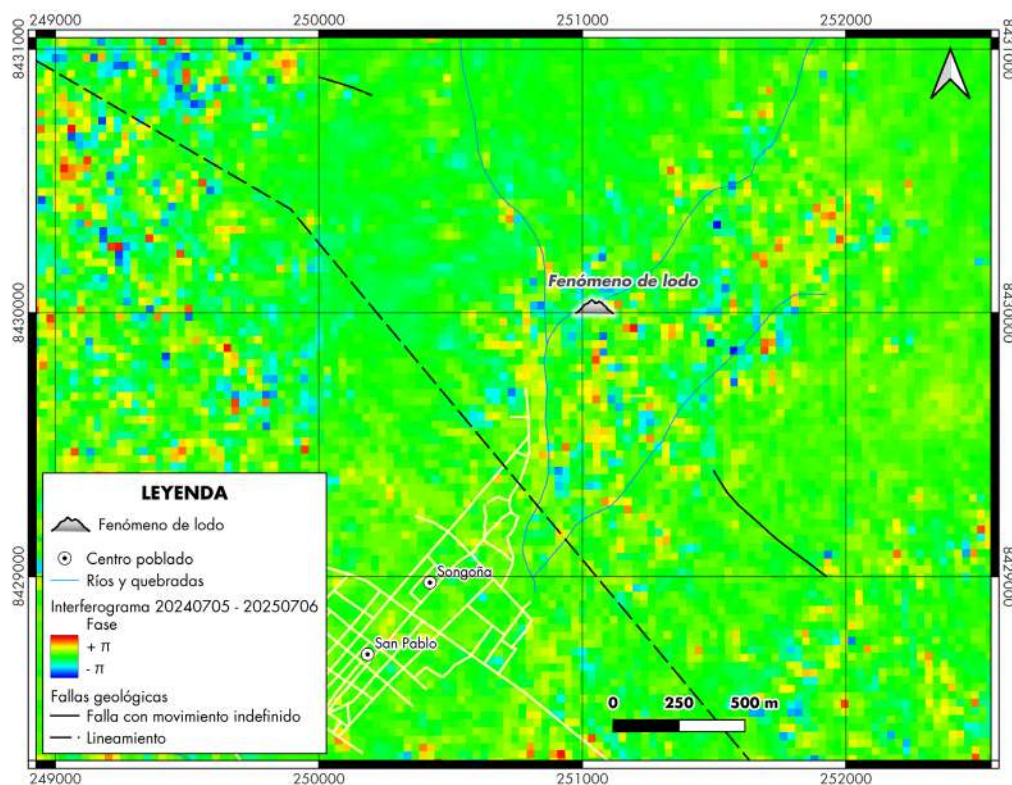


Figura 10. Interferograma obtenido con imágenes de satélite del 5 de julio de 2024 y el 6 de julio de 2025 que muestra que no hay deformación del suelo.

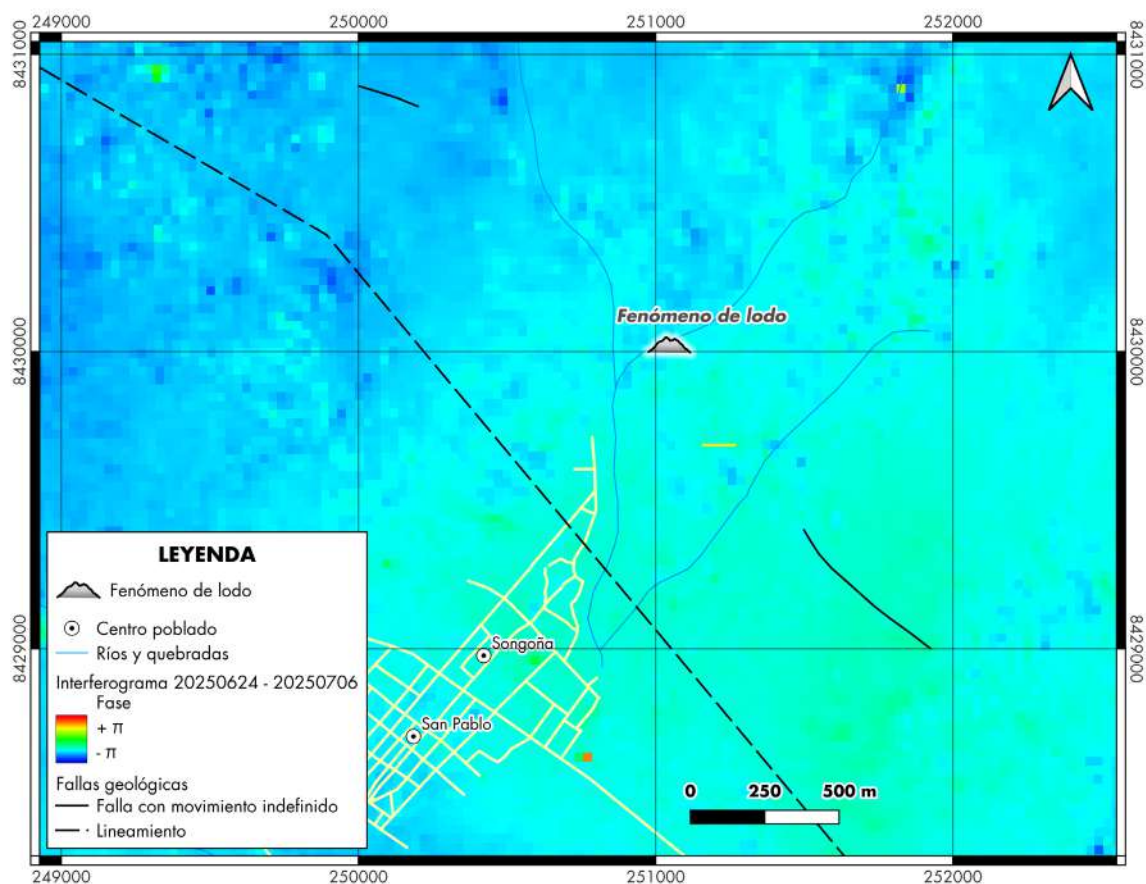


Figura 11. Interferograma obtenido con imágenes de satélite del 24 de junio y el 6 de julio de 2025 que muestra que no hay deformación del suelo.

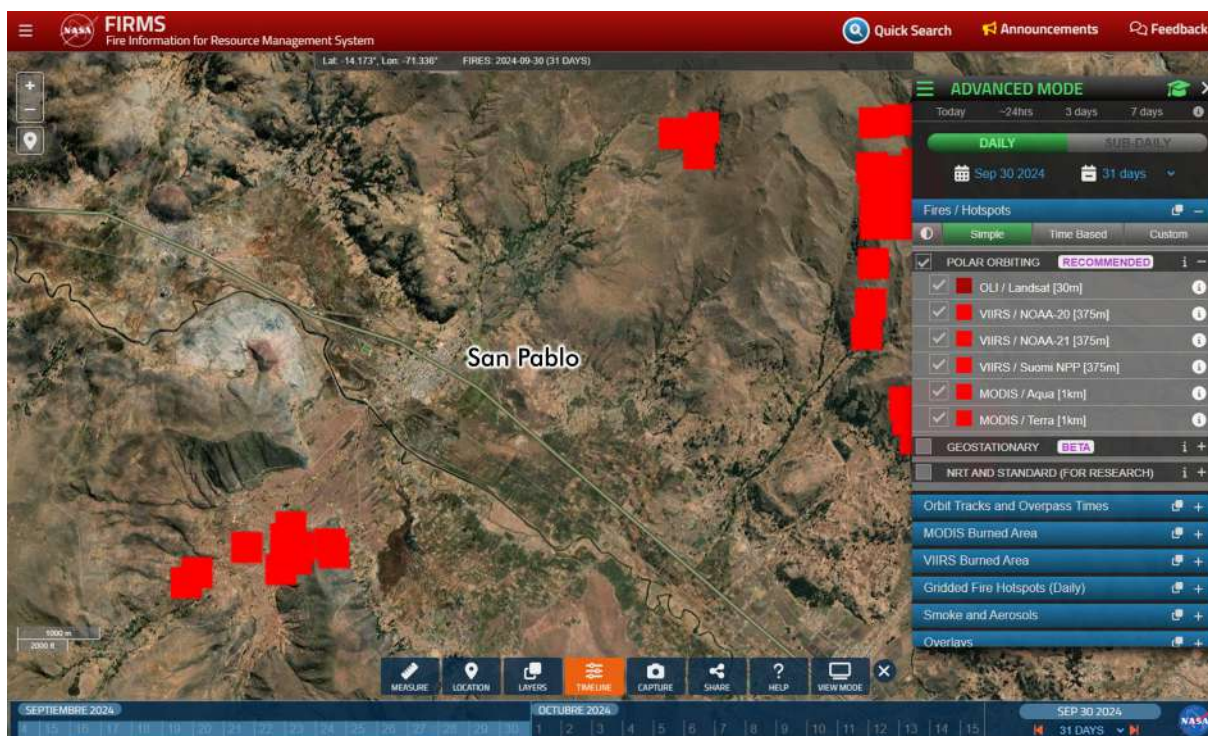


Figura 12. Anomalías térmicas detectadas por Nasa FIRMS en septiembre de 2024.

3.3 Parámetros físico-químicos *in situ*

- En el cono de lodo

El día 10 de julio, a las 6:00 a. m., la cámara térmica FLIR registró una temperatura superficial entre -1°C y 0°C . Posteriormente, entre las 8:20 a. m. y 8:45 a. m., las temperaturas oscilaron entre 3°C y 6°C . En ese mismo intervalo, se registraron valores de pH entre 7 y 7.5 sólidos totales disueltos (TDS) de 2000 ppm y conductividad eléctrica de $3999\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Es importante señalar que tanto los valores de TDS como de conductividad alcanzaron el límite máximo de medición del equipo multiparámetro.

Durante una última medición, efectuada el día 10 de julio entre las 11:10 a. m. y 11:25 a. m., la temperatura del lodo se incrementó hasta valores entre 10°C y 13°C , y el pH varió entre 7 y 8. Los niveles de TDS y conductividad se mantuvieron en los valores máximos detectables por el equipo (2000 ppm y $3999\ \mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente). Las temperaturas registradas en cada medición fueron consistentes con las condiciones ambientales del momento.

- En fuentes de agua

La primera fuente de agua evaluada fue el punto conocido como Calvario, ubicado a 1.1 km del cono de lodo, considerado por los pobladores como agua medicinal. En este sitio, se registró una temperatura entre 12.5°C y 13°C , pH entre 6 y 8, TDS de 706 ppm y conductividad de $1380\ \mu\text{S}/\text{cm}$.

En la segunda fuente de agua, ubicada a 1.5 km del cono de lodo, los parámetros obtenidos fueron una temperatura entre 14°C y 16°C , pH de 5.78, TDS de 638 ppm y conductividad de $1280\ \mu\text{S}/\text{cm}$.

La tercera fuente, ubicada a 1.8 km del cono de lodo, en la zona conocida como Cusjutunku, presentó características físico-químicas fuera del rango observado en las anteriores, motivo por el cual se recolectó una muestra para su análisis en laboratorio. Se midió una temperatura entre 18°C y 19°C , pH entre 5.77 y 6.35. Por otro lado, se registró TDS de 2000 ppm y conductividad de $3999\ \mu\text{S}/\text{cm}$, valores que superan el límite máximo de medición del equipo utilizado.

3.4 Modelado fotogramétrico con dron

Con base en las aerofotografías tomadas en campo, se realizó la construcción de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de 1.12 cm/píxel de resolución, con cotas máximas de elevación de 3548 a 3579 m s.n.m. proyectadas en el sistema de coordenadas WGS 84/UTM Zona 19S (EPSG:32719). Con base en este producto se realizaron los cálculos de medida de distancias y altura (Figura 13).

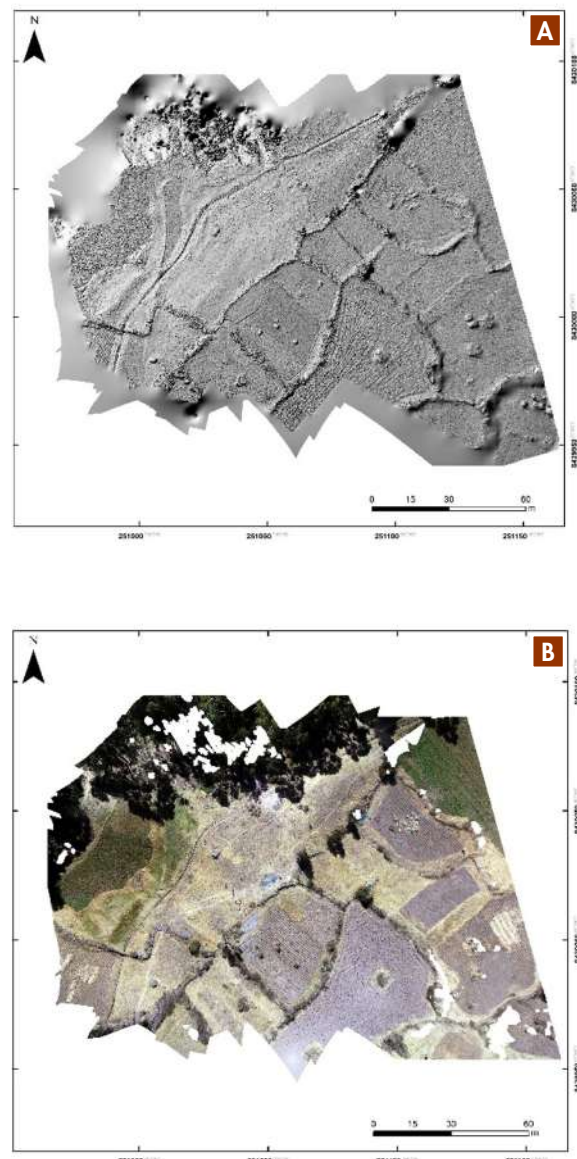


Figura 13. Generación del Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona, de 1.12 cm/píxel de resolución (A) y la imagen ortomosaico de 1.2 cm/ píxel de resolución (B).

El cono de lodo presenta una forma cónica irregular y una superficie ligeramente cóncava centrada. La cota máxima del cono de lodo fue de 3573 m s. n. m. y la mínima es de 3572.66 m s. n. m. El modelo digital de elevación muestra que el cono de lodo tiene 1.4 m de ancho, 1.52 m de largo y 0.44 m de altura. Además, el lodo emitido tiene un alcance máximo de 5.40 m, emplazado en dirección suroeste del cono. El área total cubierta por lodo es de 17.94 m² (Figura 14).

3.5 Análisis físico-químico de muestras de lodo y agua

Con el objetivo de caracterizar la composición química del lodo y agua recolectados en el distrito de San Pablo, las muestras fueron enviadas al Laboratorio Analíticos del Sur (Arequipa). Este laboratorio cuenta con acreditación vigente otorgada por la Dirección de Acreditación del INACAL, bajo el registro n.º LE-050, lo que garantiza la confiabilidad, exactitud y trazabilidad de los ensayos realizados, de acuerdo con estándares técnicos oficialmente reconocidos.

El análisis químico del lodo se realizó mediante digestión ácida según el método EPA 3050B y análisis instrumental por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), de acuerdo con el método EPA 6010D. Los resultados (Tabla 2, Anexo 1) revelan una composición rica en elementos minerales que reflejan un origen profundo en el subsuelo, aunque no magmático. Se detectó una concentración muy elevada de hierro (>25 000 mg/kg) que sugiere la presencia de minerales ferruginosos, comunes en sedimentos movilizados desde el subsuelo por procesos tectónicos o de presión interna. También se identifican altos niveles de sodio (22 500 mg/kg) y magnesio (7200 mg/kg), posiblemente asociados a soluciones salinas ascendentes o minerales solubles movilizados desde el subsuelo. En la Tabla 2 se muestran las concentraciones de otros elementos químicos presentes en la muestra de lodo.

El aluminio (4405 mg/kg) y el potasio (2120 mg/kg) tienen concentraciones relevantes, lo que puede estar relacionado con la presencia o contenido de arcilla de manera significativa. Otros elementos presentes en cantidades moderadas incluyen el fósforo (388 mg/kg), el manganeso (407 mg/kg), el boro (157 mg/kg) y el zinc (69.4 mg/kg), que

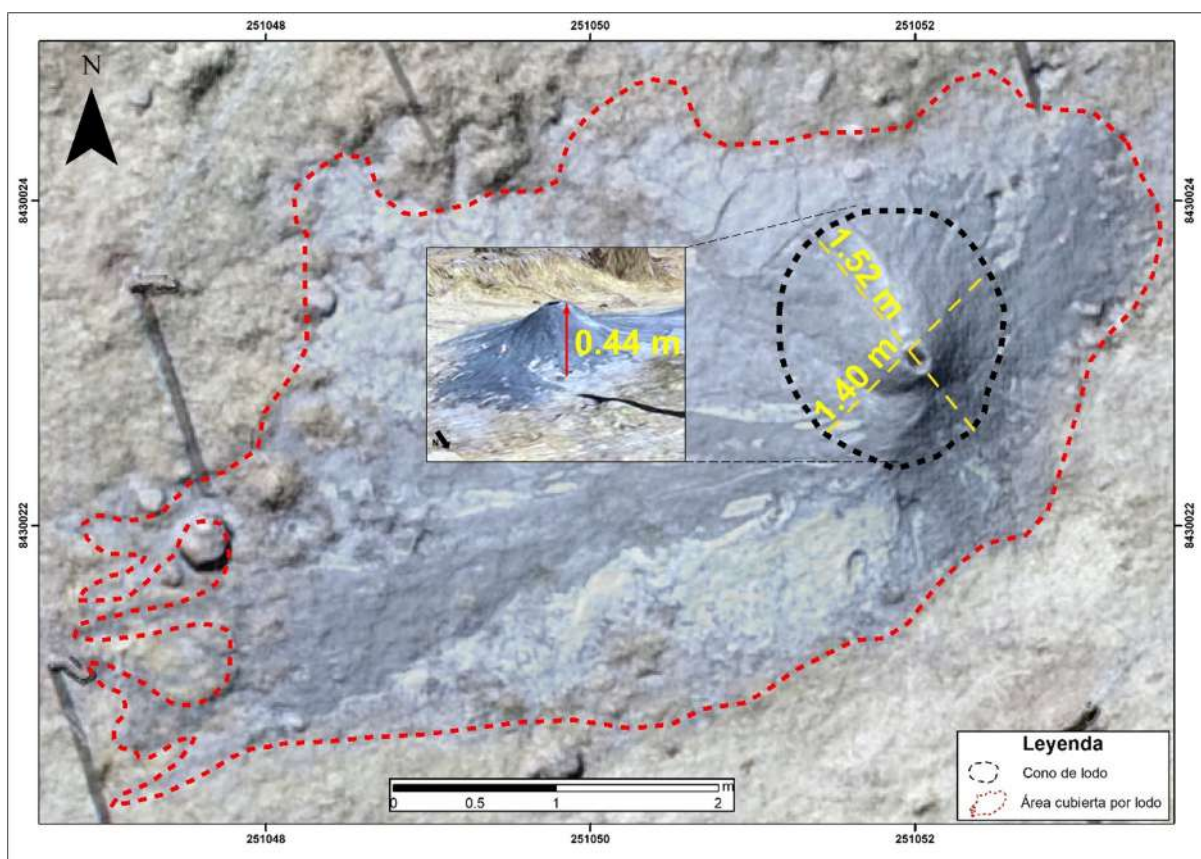


Figura 14. Vista del volcán de lodo obtenida a partir del DEM de alta resolución, con sus respectivas medidas.

Tabla 2. Concentración de elementos químicos en muestra de lodo.

Elemento	Concentración (mg/kg)
Ag (Plata)	<2.0
Al (Aluminio)	4405
As (Arsénico)	<2.0
B (Boro)	157
Ba (Bario)	22.8
Be (Berilio)	<1.0
Ca (Calcio)	1751
Cd (Cadmio)	<1.0
Co (Cobalto)	<1.0
Cr (Cromo)	<0.90
Cu (Cobre)	<1.0
Fe (Hierro)	>25000.0
Hg (Mercurio)	<1.0
K (Potasio)	2120
Li (Litio)	15.9
Mg (Magnesio)	7200
Mn (Manganeso)	407
Mo (Molibdeno)	<1.0
Na (Sodio)	22500
Ni (Níquel)	<1.0
P (Fósforo)	388
Pb (Plomo)	<2.0
Sb (Antimonio)	<2.0
Se (Selenio)	<3.0
Sn (Estaño)	<2.0
Sr (Estroncio)	15.7
Ti (Titanio)	<1.0
Tl (Talio)	<2.0
V (Vanadio)	14.8
Zn (Zinc)	69.4

podrían influir en la calidad del suelo o agua en caso de su uso material. En contraste, la mayoría de los metales potencialmente tóxicos (como arsénico, plomo, cadmio, mercurio, cromo, cobre, níquel y vanadio) se encuentran por debajo de los límites de detección analítica o en concentraciones muy bajas, lo que sugiere una baja peligrosidad química del lodo analizado para la población. En conjunto, los resultados son consistentes con un lodo de sedimentos de origen profundo, movilizado por sobrepresión subterránea, sin evidencias claras de contaminación antrópica.

Por otro lado, el análisis de la muestra de agua se realizó mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), de acuerdo con el método EPA 200.7 (revisión

4.4), el cual está acreditado para la detección de metales traza en agua y aguas residuales. Este método garantiza resultados confiables dentro de rangos definidos de cuantificación: 0.005–25 mg/L para As y 0.0009–10 mg/L para Hg. Los resultados obtenidos (Anexo 2) indican que algunos elementos tóxicos están presentes, como se detalla a continuación:

- **Arsénico (As)**

Se encuentra por debajo del límite de cuantificación (<0.005 mg/L), lo cual sugiere una concentración no detectable en términos analíticos o en niveles tan bajos que no representan riesgo aparente.

- **Mercurio (Hg)**

Presenta una concentración de 0.0046 mg/L, valor que supera el límite máximo permisible para el consumo humano, según el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano del MINSA (Decreto Supremo n.º 031-2010-SA), que establece un valor máximo admisible de 0.001 mg/L para mercurio.

4. Interpretación y discusión

4.1 Resultados analíticos

Los resultados con el mapeo de campo, la fotogrametría con dron, los análisis de interferometría satelital (DInSAR) y el análisis de parámetros físico-químicos de lodo y agua emitidos por el cono de lodo, no guardan relación alguna con la actividad volcánica, ni tipos de productos que emiten los volcanes activos.

El modelado fotogramétrico con dron permitió establecer que el cono de lodo tiene un tamaño reducido: 1.52 m de largo, 1.4 m de ancho y 0.44 m de alto, y cubre un área total de lodo de aproximadamente 17.94 m², lo cual confirma la escala limitada del cuerpo en estudio.

No se identificaron deformaciones superficiales, ni anomalías térmicas en el suelo, según los sensores satelitales MODIS y VIIRS del sistema FIRMS (NASA), lo cual descarta la existencia de calor interno relevante como el que caracterizaría un sistema volcánico activo.

Las mediciones *in situ* indican que el lodo emergente presenta temperaturas relativamente frías, de entre -1 °C y 13 °C durante el día en concordancia con la temperatura ambiente, lo que descarta cualquier fuente de calor profundo como la asociada a actividad volcánica. El pH se encuentra en un rango neutro a ligeramente alcalino (entre 7 y 8), lo que indica que el fluido no es corrosivo ni ácido. Los estudios físico-químicos realizados en el lugar revelan características coherentes con un origen no magmático.

Destaca especialmente la alta carga iónica del lodo, con niveles de sólidos disueltos totales (TDS) de aproximadamente 2000 ppm y una conductividad eléctrica que alcanza los 3999 µS/cm, valores que corresponden al límite máximo de detección del equipo multiparámetro utilizado. Esto sugiere una alta concentración de sales minerales, posiblemente asociadas al arrastre de materiales arcillosos y aguas mineralizadas desde capas profundas del subsuelo. Este mismo comportamiento se observó en una fuente de agua cercana conocida como "Cusjutunku", cuyas características físico-químicas similares motivaron la recolección de una muestra adicional para su análisis en laboratorio. La coincidencia

entre ambos puntos sugiere una posible conexión hidrogeológica entre el cono de lodo y las aguas subterráneas locales.

El análisis físico-químico de las muestras de lodo revela una composición mineral rica en hierro (>25 000 mg/kg), sodio (22 500 mg/kg) y magnesio (7200 mg/kg), así como cantidades apreciables de aluminio, potasio, fósforo, manganeso, boro y zinc. Estos valores son consistentes con sedimentos arcillosos movilizados y arrastrados desde el subsuelo por acción de gases, sin indicios de actividad volcánica o magmática. Además, la concentración de metales potencialmente tóxicos como arsénico, plomo, mercurio y cadmio se encuentra por debajo de los límites de detección, lo cual sugiere que el material no representa un riesgo químico inmediato para el ambiente o la salud humana en términos generales. Sin embargo, la muestra de agua analizada, proveniente a una distancia de 1.8 km del cono de lodo, presentó una concentración de mercurio de 0.0046 mg/L que supera el límite permitido para consumo humano según el Reglamento Nacional de Calidad del Agua. En contraste, el arsénico estuvo por debajo del umbral de detección, lo que implica que no hay riesgo aparente relacionado con este elemento.

4.2 Procesos no asociados a la actividad volcánica

Los resultados del estudio muestran que el lodo y agua emitidos a través del cono de lodo reportado en el distrito de San Pablo (Cusco), localmente conocido como el "volcán más pequeño del mundo", no corresponde a un volcán, ya que en la zona no se ha reconocido la presencia de material volcánico. Se trata, más bien, de una estructura generada por procesos geodinámicos superficiales con origen en la acumulación de gases en el subsuelo, producto de la descomposición de materia orgánica en profundidad, lo cual genera presión suficiente para hacer ascender hacia la superficie agua subterránea y sedimentos arcillosos en forma de lodo.

La confirmación de que no se trata de un volcán resulta tranquilizadora, ya que elimina la posibilidad de peligros asociados a la actividad volcánica, como la emisión de gases o materiales tóxicos, los cuales implicarían restricciones de acceso y medidas de seguridad. En la región Cusco, el único volcán con potencial eruptivo identificado es el volcán Quimsachata (distrito

de San Pedro), ubicado aproximadamente 6 km al noroeste del cono de lodo, donde el Instituto Geofísico del Perú (IGP) inició el monitoreo temporal en noviembre de 2024. En el volcán Quimsachata se tiene previsto instalar una red de vigilancia volcánica permanente, similar a las que ya funcionan en los volcanes Misti, Ubinas y otros once volcanes activos que son supervisados en tiempo real a nivel nacional.

La ausencia de evidencia de deformación del terreno, anomalías térmicas, emisiones de gases peligrosos o materiales de alta temperatura confirma que esta estructura no representa una amenaza tipo volcán. Sin embargo, se recomienda mantener una actitud de precaución ante su posible uso turístico o recreativo. Aunque su atractivo visual puede ser aprovechado para la promoción local, es necesario desarrollar estudios adicionales, particularmente bioquímicos, dermatológicos, toxicológicos y otros que evalúen la seguridad del contacto directo de la población con el lodo y el agua emanados. Dado que se han identificado altas concentraciones de sales disueltas y la presencia de mercurio en niveles que exceden los estándares de potabilidad, no se debe fomentar su manipulación sin la debida evaluación sanitaria. Además, una vigilancia periódica del cono permitirá determinar si su comportamiento varía con el tiempo o si existe algún vínculo indirecto con procesos tectónicos o hidrogeológicos de mayor escala.

4.3 Trabajos de difusión y sensibilización

Como parte de las actividades de campo, el equipo del IGP capacitó a las autoridades y pobladores de la comunidad campesina de Songoña, distrito de San Pablo, a quienes se brindaron explicaciones sobre la actividad volcánica que ocurre en el Perú y los primeros resultados sobre el “volcán de lodo” presente en la zona. También se atendieron entrevistas y se resolvieron dudas de docentes y estudiantes de la I. E. Libertador Simón Bolívar de San Pablo (Figura 15) y del colegio emblemático Mateo Pumacahua de Sicuani. Estas acciones permitieron informar de manera oportuna a la población local sobre la naturaleza del evento, diferenciándolo de una actividad netamente volcánica.

El 11 de julio se participó en una ceremonia de agradecimiento a la Pachamama, organizada por la comunidad junto con el alcalde distrital y otros líderes comunales (Figura 16).

Posteriormente, se ofreció una capacitación pública en el teatrín municipal de San Pablo (Figura 17), en la cual se expuso el trabajo del Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) del IGP. Se explicaron conceptos clave sobre la formación de volcanes y peligros volcánicos, destacando que el fenómeno de emisión de lodo observado



Figura 15. Charla explicativa del IGP a estudiantes y profesores de la I. E. Libertador Simón Bolívar de San Pablo.

no tiene un origen volcánico. Asimismo, se compartieron los hallazgos preliminares del levantamiento de información realizado el día anterior. La participación y el interés mostrado

por la comunidad reflejan el cumplimiento de la misión institucional del IGP en cuanto a difusión del conocimiento y fortalecimiento del vínculo con la ciudadanía.



Figura 16. Participación en la ceremonia de agradecimiento a la Pachamama, acompañada por autoridades y pobladores vestidos con trajes típicos de la zona.



Figura 17. Capacitación del IGP en el teatrín de la municipalidad de San Pablo.

Conclusiones

- El cono de lodo observado en la comunidad campesina de Songoña, distrito de San Pablo (Cusco) tiene 1.52 m de largo, 1.4 m de ancho y 0.44 m de alto, y cubre un área total de aproximadamente 17.94 m², es decir, es una estructura bastante pequeña; sin embargo, no se descarta que continúe creciendo en el futuro debido a la acumulación progresiva de sedimentos transportados desde el subsuelo a la superficie. Este tipo de estructuras puede continuar emanando lodo de manera intermitente, incluso con posibles episodios de aceleración, en función de las variaciones en la presión de fluidos y el aporte de sedimentos desde el subsuelo. La duración del fenómeno es incierta y puede prolongarse durante meses o años hasta que se agoten las condiciones que lo originan, aunque no se descarta su reactivación en el futuro.
- El cono de lodo pequeño no corresponde a un volcán activo, ya que en la zona no se identificó material volcánico en superficie y el análisis de los datos recolectados en campo no muestra la existencia de actividad volcánica, por lo cual no existe riesgo volcánico en la zona. El análisis satelital de la zona de estudio no mostró deformación del terreno a gran escala ni anomalías térmicas en la zona, lo que refuerza la conclusión de que no existe actividad volcánica. La formación del cono de lodo estaría asociado a la presión de gases subterráneos que transportan sedimentos arcillosos y agua del subsuelo a la superficie.
- Las mediciones *in situ* indican que el lodo presenta temperaturas frías (entre -1 °C y 13 °C), coherentes con la temperatura ambiente, lo que descarta una fuente de calor profunda. El pH neutro a ligeramente alcalino (7-8) refleja condiciones no ácidas ni corrosivas. Además, se registraron altos niveles de sólidos disueltos (~2000 ppm) y una conductividad eléctrica de 3999 µS/cm, valor que alcanzó el límite máximo de detección del instrumento, lo que indica una elevada concentración de sales minerales asociadas al arrastre de dichos materiales desde el subsuelo.
- El análisis químico del lodo evidenció una alta concentración de hierro (>25 000 mg/kg), sodio (22 500 mg/kg) y magnesio (7200 mg/kg), además de cantidades notables de aluminio (4405 mg/kg), potasio (2120 mg/kg), fósforo (388 mg/kg) y boro (157 mg/kg). Esta composición es coherente con materiales arcillosos ricos en minerales movilizados desde capas profundas del subsuelo. Asimismo, los altos niveles de sólidos disueltos (TDS) y de conductividad eléctrica observados en campo coinciden con esta carga mineral significativa. Por otro lado, los metales pesados de mayor preocupación toxicológica, como arsénico, plomo, mercurio y cadmio, se encontraron por debajo de los límites de detección, lo cual es favorable desde una perspectiva ambiental. No obstante, se recomienda cautela al considerar cualquier uso recreativo o terapéutico del lodo, ya que aún no se cuenta con estudios específicos sobre su toxicidad o efectos en la salud humana.
- La muestra de agua analizada del sector de "Cusjutunku" presentó una concentración de mercurio (0.0046 mg/L) que supera el límite máximo permisible para el consumo humano y que justifica la realización de estudios toxicológicos complementarios.
- La similitud entre los parámetros físico-químicos del lodo y los de la fuente de agua "Cusjutunku" sugiere una posible conexión hidrogeológica subterránea entre ambos puntos.

Recomendaciones●

- Evitar el contacto directo con el lodo y abstenerse de usarlo con fines recreativos o terapéuticos sin una evaluación sanitaria completa que incluya análisis dermatológicos, toxicológicos, microbiológicos y otros.
- Si se desea promover el fenómeno como atractivo turístico o cultural, hacerlo bajo estrictas condiciones de seguridad y conservación, asegurando que el uso recreativo no comprometa la salud de los visitantes ni el equilibrio del ecosistema local.
- El IGP ampliará los estudios hidrogeológicos para comprender la dinámica subterránea de la zona y su vinculación con otras fuentes de agua cercanas. Por otro lado, se implementará un monitoreo periódico de los parámetros físico-químicos del lodo y agua para identificar posibles cambios en el tiempo. Finalmente, se profundizará el análisis de elementos químicos en aguas superficiales y subterráneas aledañas a la zona, especialmente en lo referente a elementos como el mercurio, para descartar efectos acumulativos o impactos en la salud pública.

Referencias●

- Audebaud, E. (1973). *Boletín N.º 025: Geología de los cuadrángulos de Ocongate (28-t) y Sicuani (29-t)*. Servicio de geología y minería. Lima, Perú. 85 p.
- Carvajal, H., & Mendivelso, D. (2017). *Volcanismo de lodo del Caribe central colombiano*. Servicio Geológico Colombiano. 94 p. Recuperado de <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/volcanismo-lodo.pdf>
- Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G. G., Aloisi, G., Planke, S., Malthé-Sørenssen, A., & Istadi, B. (2007). Triggering and dynamic evolution of the Lusi mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>
- Ministerio de Salud del Perú (2010). *Decreto Supremo N.º 031-2010-SA. Reglamento de la calidad del agua para consumo humano*. Dirección General de Salud Ambiental DIGESA. 33 p. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/273650/reglamento-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano.pdf?v=1561937448>
- Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D. A., & Jamtveit, B. (2003). Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. *Geo-Marine Letters*, 23(3-4), 258–268. <https://doi.org/10.1007/s00367-003-0152-z>
- Sánchez, A. & Zapata, A. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Sicuani (29-t), Nuñoa (29-u), Macusani (29-v), Limbani (29-x), Sandia (29-y), San Ignacio (29-z), Yauri (30-t), Azángaro (30-v), Putina (30-x), La Rinconada (30-y), Condoroma (31-t), Ocuquiri (31-u), Juliaca (31-v), Callalli (32-t), y Ácora (32-x) escala 1:100 000*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima, Perú. 55 p.

Anexos

- Anexo 1: Informe de ensayo en laboratorio de muestra de lodo



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Clave generada : 4D39B6A8

INFORME DE ENSAYO LAS01-SD-AC-25-00006

Fecha de emisión: 26/07/2025

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	7153											
		Ag	Al	As	B	Ba	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
		mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
SD25000027	MUESTRA VOLCAN DE LODO SEDIMENTO - LODO	b<2,0	4405	b<2,0	157	22,8	b<1,0	1751	b<1,0	b<1,0	b<0,90	b<1,0	>25000,0

Código interno L.A.S.	Nombre de Muestra	7153											
		Hg	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	Sb	Se
		mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
SD25000027	MUESTRA VOLCAN DE LODO SEDIMENTO - LODO	b<1,0	2120	15.9	7200	407	b<1,0	22500	b<1,0	388	b<2,0	b<2,0	b<3,0

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	7153					
		Sn	Sr	Ti	Tl	V	Zn
SD25000027	MUESTRA VOLCAN DE LODO SEDIMENTO - LODO	b<2,0	15,7	b<1,0	b<2,0	14,8	69,4

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico CIP 19474

Firmado por: SIXTO VICENTE JUÁREZ NEIRA, GERENTE. Emisor de certificado: CAMERFIRMA PERU S.A.C., 26/07/2025 19:05:12

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(") Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

"<Valor numérico"=Límite de detección del método, "<Valor Numérico"=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>.

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



- Anexo 2: Informe de ensayo en laboratorio de muestra de agua



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Clave generada : 3EC11A4E

INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-25-00172

Fecha de emisión: 21/7/2025

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	796	800
		As	Hg
		mg/L	mg/L
AG25000289	AGUA CUSIJUTUNKU	b<0,005	0,0046

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

Firmado por: JUÁREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES, Emisor de certificado: LLAMA PE, 21/7/2025 15:15:38

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

("*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

"a<Valor numérico"=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico"=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>. Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Información clave para ti

Puedes consultar, descargar y compartir desde el Repositorio Geofísico Nacional (REGEN) los diferentes **reportes**, **boletines** e **informes** que genera el IGP.

RECUERDA: La Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se fundamenta en la investigación científica. El IGP es una entidad líder en la generación de conocimiento científico en el país.



REGEN



Sede central del Instituto Geofísico del Perú (IGP)

