

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Informe de Investigación

Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburco – Abancay,
2024

Presentado por:

Franklin Aguirre Huillcas

Abancay, Perú

2025



ACTA DE DICTAMEN DEL INFORME FINAL



En las instalaciones de SALO DE DOCENTES EPIM - UNAMBA, siendo las horas del día 21 de ENERO del año 2026 los miembros del Jurado Evaluador, designado mediante: MEMORANDO MULTIPLE N° 012-2025-TRA UNAMBA conformado por:

Presidente : DR. GERMAN RAFAEL ESPINOZA RIVAS

1er Miembro : ING. JOSÉ A. CÁRDENAS CATALÁN

2do Miembro : ING. DARIO DONTE SANCHEZ CASTILLO

Se reúnen para evaluar y dictaminar el informe final de:

Trabajo de investigación (X) Tesis () Tesis en formato de artículo científico ()

Titulado: "POTENCIAL DESBIZANTIAMIENTO DEL CEREO CHUYLLUPATA Y SUS CONSECUENCIAS, TAMBURCO - DISTRITO DE SAN ANTONIO DE TIBAYCO, 2024"

Presentado (a) por : DR. FRANCISCO AGUIRRE HUILLCAS

Previa verificación de levantamiento de observaciones por el interesado(s) y consistencia en la estructura y el contenido del informe final, los miembros del Jurado Evaluador, en uso de sus atribuciones, dictaminan:

APROBAR DESAPROBAR ()

Declarando APTO (X) y expedito para la presentación del informe final y la sustentación en acto público.

Declarando NO APTO () por no cumplir las condiciones mínimas rigurosidad científica.

Siendo las 11:00 horas del mismo día, se da por concluida la reunión.

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
E.A.P. - INGENIERÍA DE MINAS
Dr. Ing. German Rafael Espinoza Rivas
DOCENTE
Firma y sello
Presidente

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
Mtro. Dario D. Sanchez Castillo
DOCENTE AS. EAPIM
Firma y sello
1er. miembro

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
Ing. José A. Cárdenas Catalán
DOCENTE EAPIM
Firma y sello
2do. miembro



Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburco - Abancay, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	palmira.gov.co Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac Trabajo del estudiante	<1%
7	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%



Agradecimiento

A mi esposa e hijos, cuyo amor y apoyo incondicional fueron mi refugio y mi mayor inspiración durante este desafiante pero gratificante proceso e investigación. Gracias por creer en mí, incluso cuando dudaba de mí mismo.



Dedicatoria

Con todo mi amor y gratitud, les dedico este trabajo de investigación.

A mi esposa, compañera de vida y apoyo incondicional, gracias por tu amor, paciencia y comprensión durante este largo proceso. Tu aliento constante y tu fe en mi fueron mi mayor motivación. Eres la luz que ilumina mi camino y la fuerza que me impulsa a seguir adelante.

A mis hijos, fuente de alegría e inspiración, este trabajo es también para ustedes.

Su amor y sus sonrisas me recordaron cada día por qué hago lo que hago. Espero que este logro sea un ejemplo para ustedes, que vean que con esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar las metas.



Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburco – Abancay,
2024

Línea de investigación: Geología, geotecnia y medio ambiente.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CAPÍTULO I	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1 Descripción del problema	6
1.2 Enunciado del problema	8
1.2.1 Problema general	8
1.2.2 Problemas específicos	8
1.3 Justificación de la investigación	8
CAPÍTULO II	10
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	10
2.1 Objetivos de la investigación	10
2.1.1 Objetivo general	10
2.1.2 Objetivos específicos	10
2.2 Hipótesis de la investigación	10
2.2.1 Hipótesis general	10
2.2.2 Hipótesis específicas	10
2.3 Operacionalización de variables	11
2.3.1 Variable independiente: Factores que influyen en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.	11
2.3.2 Variable dependiente: Consecuencias del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.	11
CAPÍTULO III	12
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	12
3.1 Antecedentes	12
3.1.1 Internacionales	12
3.1.2 Nacionales	15
3.1.3 Locales	16
3.2 Marco teórico	18
3.2.1 Precipitación pluvial	18
3.2.2 Infiltración	18
3.2.3 Aguas subterráneas	20



3.2.4	Deslizamiento	20
3.2.4.1	Tipos de deslizamiento (movimiento) en masa	22
3.2.5	Factor de seguridad	24
3.2.6	Reología	24
3.2.6.1	Reología newtoniana	26
3.2.6.2	Reología no newtoniana	26
3.2.6.3	Taxonomía de los flujos de lodo y escombros	31
3.2.7	Flujo de escombros (Debris Flow)	31
3.2.7.1	Concentración volumétrica de sedimentos	33
3.2.7.2	Límite elástico	35
3.2.7.3	La viscosidad dinámica de la mezcla	35
3.2.8	Inteligencia artificial	36
3.2.8.1	HEC-RAS	37
3.2.8.2	Modelo de inundación HEC-RAS	38
3.2.8.3	Modelo hidráulico FLO-2D	40
3.2.8.4	Modelo digital de superficie (DSM)	40
3.2.9	Coefficiente de rugosidad de Manning (n)	41
3.3	Marco conceptual	44
	CAPÍTULO IV	52
	METODOLOGÍA	52
4.1	Tipo y nivel de investigación	52
4.2	Diseño de la investigación	52
4.2.1	Diseño general	52
4.2.2	Componentes específicos	53
4.2.3	Consideraciones éticas	54
4.2.4	Productos esperados	55
4.3	Descripción ética de la investigación	55
4.3.1	Protección de participantes	55
4.3.2	Integridad y objetividad	56
4.3.3	Responsabilidad social	56
4.4	Población y muestra	57
4.4.1	Población	57
4.4.2	Muestra	57
4.5	Procedimiento	57
4.5.1	Fase de planificación y preparación	57
4.5.2	Metodología	57
4.5.3	Trabajo de campo	58
4.5.4	Análisis de datos	58



4.5.5	Resultados y conclusiones	58
4.6	Técnica e instrumentos	58
CAPÍTULO V		60
RESULTADOS Y DISCUSIONES		60
5.1	Análisis de resultados	60
5.1.1	Caracterización del potencial deslizamiento en el cerro Chuyllurpata y sus implicaciones.	60
5.1.1.1	Ubicación	60
5.1.1.2	Causas que generan el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata, Tamburco – Abancay	61
5.1.1.2.1	Aspectos geológicos	62
5.1.1.2.2	Topografía	64
5.1.1.2.3	Cobertura vegetal	66
5.1.1.2.4	Aspectos hidrológicos de la quebrada Sahuanay	69
5.1.1.2.5	Deslizamiento del cerro Chuyllurpata	71
5.1.1.2.6	Impacto del deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay	75
5.1.2	Causas potenciales de deslizamientos futuros en el cerro Chuyllurpata	76
5.1.2.1	Factores geológicos	77
5.1.2.1.1	Presencia de depósitos cuaternarios inconsolidados	77
5.1.2.1.2	Geología de rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias	77
5.1.2.1.3	Eventos geodinámicos previos	77
5.1.2.2	Factores hidrológicos	77
5.1.2.2.1	Precipitaciones pluviales intensas	77
5.1.2.2.2	Comportamiento de la quebrada Sahuanay	78
5.1.2.2.3	Diseño subóptimo de estructuras de canalización	78
5.1.2.3	Factores topográficos	78
5.1.2.3.1	Fuertes variaciones de pendientes	78
5.1.2.3.2	Desnivel en el cauce	78
5.1.2.4	Factores de la actividad humana	78
5.1.2.4.1	Crecimiento poblacional desordenado	78
5.1.2.5	La flora	79
5.1.2.5.1	Cobertura vegetal	79
5.1.3	Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata ocasiona daños en la quebrada Sahuanay – Tamburco – Abancay	79
5.1.3.1	Delimitación del área propenso a deslizamiento	79
5.1.3.2	Sustento para la delimitación de la zona potencial de deslizamiento	81
5.1.3.3	Volumen potencial de deslizamiento en cerro Chuyllurpata	84



5.1.3.4 Zonificación geomecánica del área de impacto del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata	86
5.1.3.4.1 Modelo hidrológico HEC – RAS para la unidad hidrográfica de la quebrada Sahuanay.	89
5.1.4 Resultados del potencial deslizamiento en el cerro Chuyllurpata y sus implicaciones	103
5.1.4.1 Causas que podrían generar un deslizamiento en cerro Chuyllurpata	103
5.1.4.1.1 Factores geológicos	103
5.1.4.1.2 Factores hidrológicos	103
5.1.4.1.3 Factores topográficos	104
5.1.4.1.4 Influencia humana y vegetación	104
5.1.4.2 Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata ocasionaría daños en la quebrada Sahuanay - Tamburco – Abancay	104
5.2 Discusión	106
CAPITULO VI	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
6.1 Conclusiones	109
6.2 Recomendaciones	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXOS	121



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 — Matriz operacional de la variable independiente	11
Tabla 2 — Matriz operacional de la variable dependiente	11
Tabla 3 — Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos	33
Tabla 4 — Parámetros de límite elástico para la ecuación de O'Brian de Julien (1995) (convertidos a la forma exponencial utilizada en HEC-RAS)	35
Tabla 5 — Coeficientes para el multiplicador exponencial de la viscosidad para diferentes tipos de suelos de Julien (1995) (Convertido a forma exponencial)	36
Tabla 6 — Referencia de valores n de Manning. Base de Datos Nacional de Cobertura de Suelo (National Land Cover Database (NLCD))	41
Tabla 7 — Coordenadas del perímetro del área potencial de deslizamiento del cerro Chuyllurpata	85
Tabla 8 — Evolución del caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años	91
Tabla 9 — Evolución del caudal del huaico en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 — Estilos de movimiento de masas: falla	23
Figura 2 — Estilos de movimiento de masas: caída	23
Figura 3 — Estilos de movimiento de masas: deslizamiento	23
Figura 4 — Estilo de movimiento de masas: reptación o flujo lento	23
Figura 5 — Various taxonomies of geophysical flows illustrating the diversity of definitions (modified from Philips (1888) after Bradley and McCutcheon, 1985)	31
Figura 6 — Vista esquemática de un oleaje de escombros	33
Figura 7 — Plano de ubicación cerro Chuyllurpata	60
Figura 8 — Delimitación y topografía de la zona potencial del influencia del deslizamiento del cerro Chuyllurpata	61
Figura 9 — Mapa litológico de la zona de influencia del deslizamiento del cerro Chuyllurpata	63
Figura 10 — Mapa de pendiente	66
Figura 11 — Flora microcuena Sahuanay	67
Figura 12 — Bosque de árboles (coníferas) en el cauce del río en la quebrada Sahuanay	68
Figura 13 — Prácticas agrícolas en Sahuanay	69
Figura 14 — Canalización de la quebrada Sahuanay, con estructuras	70
Figura 15 — Canalización de la quebrada Sahuanay, con estructuras no adecuadas	71
Figura 16 — Vista panorámica de la zona de arranque del flujo de detritos en el cerro Chuyllurpata 2012. En líneas de trazo rojas se indica la escarpa de deslizamiento de 1951	72
Figura 17 — Pendiente de deslizamiento del evento ocurrido el 18 – 03 – 2012	73
Figura 18 — Flujo de detritos al avanzar el huaico por la quebrada de Sahuanay (18-03-2012)	73
Figura 19 — Flujo que incorporó troncos de árboles y bloques de roca (18-03-2012)	74
Figura 20 — Huaico en los años 1951 – 2012 siguieron su cauce natural	76
Figura 21 — Deslizamiento vertical en cerro Chuyllurpata (1951)	80
Figura 22 — Deslizamiento horizontal en cerro Chuyllurpata (2012)	80
Figura 23 — Grieta y deslizamiento (1951 y 2012)	81
Figura 24 — Delimitación del área potencial de deslizamiento del cerro Chuyllurpata	83

Figura 25 – Ubicación del área potencial de deslizamiento	84
Figura 26 – Zonificación geomecánica de la zona en estudio	87
Figura 27 – Simulación avalancha años 1951 y 2012	89
Figura 28 – Imagen ráster DSM de la zona de estudio	90
Figura 29 – Huella de inundación del huaico simulados en periodo de retorno de 100 años	93
Figura 30 – Flujograma del modelamiento y el proceso de simulación de un huaico	94
Figura 31 – Huella de inundación del huaico simulado, del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata – Sahuanay	99
Figura 32 – Simulación del flujo de masa por deslizamiento del cerro Chuyllurpata sobre las ciudades de Tamburco y Abancay	102

INTRODUCCIÓN

En diversas partes del mundo los desastres asociados a deslizamientos (movimiento en masa) generan impactos negativos en el ámbito socioeconómico y ambiental. Además de las pérdidas de vidas, y el daño a la cubierta vegetal, las afectaciones a las viviendas y la infraestructura son frecuentes (GALINDO y ALCÁNTARA, 2015).

“Las causas principales para la ocurrencia de deslizamientos, son las intensas precipitaciones pluviales de la temporada” (GARCÍA, et al., 2018).

La infiltración del agua en el suelo está más influenciada por la cubierta vegetal, según el tipo de uso de la tierra, que por el sistema de labranza del suelo. El laboreo del suelo provoca mayores cambios en la infiltración del agua que el efecto de la cubierta vegetal. Además, la infiltración de agua tiende a ser menor en las áreas bajo suelo desnudo que en aquellas bajo sistemas de conservación del suelo (SAMPAIO DE ALMEIDA, et al., 2018).

“El uso de la tierra afecta significativamente a la variación espacial de las características de infiltración y a sus relaciones con los factores ambientales” (ZHIPENG, et al., 2018).

En la infiltración no saturada, tanto el aumento de la capacidad de infiltración del suelo causada por el agrietamiento y el aumento gradual de las precipitaciones harán que la pendiente evolucione hacia un estado inestable. Cuanto más extenso sea el desarrollo de las grietas en el suelo, mayor será la capacidad de infiltración del suelo. Con el aumento de la duración de las precipitaciones, el efecto de los estados de agrietamiento del suelo en la estabilidad de los taludes durante la infiltración será gradualmente cubierto por el efecto de la lluvia en todas las profundidades (ZHANG, et al., 2020).

“El contenido de limo, arena, materia orgánica del suelo, la densidad de la hojarasca vegetal y la densidad de la masa radicular son los principales factores que influyen en las propiedades de infiltración del suelo” (ZHU, et al., 2020).



Los fragmentos de roca en la superficie del suelo pueden disminuir y aumentar la infiltración. Se ha demostrado que el tamaño de las rocas en la superficie está directamente relacionado con la infiltración, es decir, las rocas más pequeñas disminuyen y las rocas más grandes en la superficie aumentan la infiltración (BRAKENSIEK & RAWLS, 1994).

Su particular comportamiento físico-mecánico a favor de una matriz compuesta por arcillas expansivas (montmorillonita, illita) durante precipitaciones intensas y una coetánea saturación, se expresa mediante un incremento de volumen y consiguiente desintegración de sus componentes rocosos y movilización bajo las condiciones de un flujo denso (GONZÁLEZ y FOLGUERA, 2009).

Sin embargo, en la determinación de algunos factores como los litológicos, las susceptibilidades a la humedad y los desencadenantes de la intensidad de las lluvias, es importante incluir opiniones y juicios experimentados, así como y tener en cuenta la influencia de elementos locales y regionales (MORA & VAHRSON, 1994).

Las infiltraciones generadas en épocas de precipitaciones pluviales, en el sector del cerro Chuyllurpata, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, se ha visto afectado por un movimiento complejo de peligro alto y vulnerabilidad muy alto, eventos ocurridos en el año 1951 y el año 2012. Como referencia se tiene el deslizamiento de grandes proporciones de flujos de lodo y barro que sucedió en la quebrada de Sahuanay (VILLACORTA, et al., 2016).

La presente investigación se orienta al estudio del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y de los efectos que este fenómeno podría generar en el distrito de Tamburco – Abancay. El análisis se centra en los procesos de movimientos en masa y en los impactos socioeconómicos y ambientales que estos producen, los cuales se manifiestan principalmente en la pérdida de vidas humanas, así como en daños considerables a viviendas, vías de comunicación e infraestructura básica.

Este estudio se sustenta en el análisis de diversos factores que influyen directamente en la ocurrencia de los deslizamientos, como son: precipitaciones e infiltración, propiedades físicas y mecánicas del suelo, y el uso del suelo y cobertura vegetal.



Acorde a la investigación lógica y científica, el trabajo se ha ordenado en seis capítulos:

Capítulo I: Planteamiento del problema.

Capítulo II: Formulación de objetivos e hipótesis.

Capítulo III: Marco teórico referencial.

Capítulo IV: Metodología de investigación.

Capítulo V: Resultados y discusiones

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

En la sección final se resumen las conclusiones y se presentan las recomendaciones oportunas.

Para finalizar, se enumeran las fuentes consultadas y se incluyen los anexos relevantes.



RESUMEN

Los distritos de Tamburco y Abancay continúan en estado de alerta por el desplazamiento gradual del cerro Chuyllurpata, el cual avanza siguiendo el cauce de la quebrada Sahuanay. Este fenómeno geológico no solo implica un riesgo actual, sino que también trae a la memoria colectiva lo ocurrido en 1950 y 2012, años en los que deslizamientos similares afectaron seriamente a la población. Estos antecedentes ayudan a dimensionar la preocupación social ante la posibilidad de que se repita una situación parecida. Al mismo tiempo, muestran la necesidad de estudiar a fondo este fenómeno y sus posibles consecuencias. La presente investigación busca comprender y anticipar qué podría suceder si el cerro Chuyllurpata volviera a deslizarse. Más allá del análisis técnico, el objetivo es sensibilizar a la población sobre los riesgos reales que enfrentan las zonas urbanas y rurales cercanas a la quebrada Sahuanay, especialmente en Tamburco y Abancay. Al conocer mejor estas amenazas, se espera fomentar una mayor preparación y cuidado colectivo ante un posible desastre. Para ello, se aplicó una metodología que combinó herramientas cuantitativas y trabajo directo en campo. Se revisaron los registros de desastres de 1950 y 2012, y se realizaron visitas técnicas al área de estudio para obtener información directa del terreno. Los datos recopilados se procesaron con herramientas como GPS navegador, ArcGIS Pro, Civil 3D, Google Earth Pro y Excel, lo que permitió integrarlos y analizarlos para tener un panorama más claro de las condiciones actuales. Finalmente, se utilizó el software HEC-RAS para modelar y simular cómo podría comportarse un eventual deslizamiento del cerro Chuyllurpata. Esta simulación ayuda a visualizar posibles rutas de flujo y zonas de impacto, aportando información clave para la prevención y la toma de decisiones. Se estima que podrían desprenderse hasta 3,2 millones de metros cúbicos de material sólido, volumen que podría convertirse en un movimiento de masas capaz de arrasar más de 204,31 hectáreas. También se calcula que al menos 306 habitantes podrían verse afectados directamente, aunque la cifra real dependerá de factores como la hora del evento, la densidad poblacional y el tipo de construcciones en la zona.

Palabras clave: *Alerta, deslizamiento, prevención, riesgo.*



ABSTRACT

The districts of Tamburco and Abancay remain on alert due to the gradual movement of Mount Chuyllurpata, which continues to advance along the Sahuanay ravine. This geological phenomenon not only poses a current risk but also brings back collective memories of what happened in 1950 and 2012, when similar landslides seriously affected the local population. These past events help illustrate the level of social concern regarding the possibility of a similar situation occurring again. At the same time, they highlight the need to thoroughly study this phenomenon and its potential consequences. This research aims to understand and anticipate what could happen if Mount Chuyllurpata were to slide again. Beyond the technical analysis, the goal is to raise awareness among the population about the real risks faced by the urban and rural areas near the Sahuanay ravine, especially in Tamburco and Abancay. By better understanding these threats, the intention is to promote greater preparedness and collective care in the face of a possible disaster. To achieve this, a methodology combining quantitative tools and direct fieldwork was applied. Disaster records from 1950 and 2012 were reviewed, and technical visits were carried out in the study area to gather firsthand information about the terrain. The collected data was processed using tools such as a GPS navigator, ArcGIS Pro, Civil 3D, Google Earth Pro, and Excel, allowing the information to be integrated and analyzed to obtain a clearer picture of current conditions. Finally, the HEC-RAS software was used to model and simulate how a potential landslide from Mount Chuyllurpata might behave. This simulation helps visualize possible flow paths and impact zones, providing key information for prevention and decision-making. It is estimated that up to 3.2 million cubic meters of solid material could detach, a volume that could turn into a mass movement capable of sweeping away more than 204.31 hectares. It is also estimated that at least 306 inhabitants could be directly affected, although the actual number would depend on factors such as the time of the event, population density, and the type of constructions in the area.

Keywords: *Alert, landslide, prevention, risk.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Los deslizamientos de tierra son procesos asociados a una serie de condiciones geomorfológicas, geológicas, hidrológicas, litológicas (tipos de rocas y suelos), topografía y meteorológicas que favorecen la pérdida de estabilidad en las laderas. Estos eventos ocurren cuando la resistencia de los materiales del terreno se ve reducida de forma progresiva, ya sea por causas naturales como la meteorización, o por intervenciones antrópicas. Factores externos, como lluvias intensas o movimientos sísmicos, suelen ser los condicionantes. En este contexto, el agua cumple una función determinante: al ser absorbida por las partículas del suelo, modifica su comportamiento mecánico, aumentando su plasticidad y favoreciendo fenómenos como el hinchamiento y la contracción. Tanto la erosión del suelo como los deslizamientos representan formas significativas de degradación del terreno, en las que la acción humana tiene un peso creciente, especialmente en zonas con expansión urbana o cambios acelerados en el uso del suelo.

En el cerro Chuyllurpata se registraron dos eventos de movimiento complejo de alto peligro y muy alta vulnerabilidad en los años 1951 y 2012, durante los meses de enero a marzo. Esta situación ha generado una preocupación constante entre los habitantes de la quebrada Sahuanay, Tamburco y Abancay en lo que respecta a su hábitat y a los problemas de estabilidad de las paredes de adobe y materiales nobles. Los pobladores atribuyen este problema al aumento de las lluvias, que provocan el movimiento en masa de las laderas y sus posibles impactos medioambientales.

Este estudio se diseñó con la intención de reunir información objetiva sobre una problemática que la población ha enfrentado desde hace muchos años y que, hasta ahora, ha comprendido e interpretado de manera espontánea, el proyecto tiene además la finalidad de proveer de informaciones que resulten de la investigación científica.

“Los deslizamientos de masas ocurren en todas las regiones climáticas y juega un papel



importante en la sostenibilidad de la vida terrestre y el medio ambiente” (REGMI, et al. 2015). “Las pendientes de arcilla son susceptibles de licuarse repentinamente en deslizamientos de tierra que se aceleran rápidamente, amenazando a personas e instalaciones” (MAINSANT, et al., 2015).

“El agua juega un papel importante en el desarrollo de diferentes procesos de deslizamiento de masas en relación con la influencia a largo plazo en el material subterráneo y el mecanismo de activación a corto plazo por la precipitación y la infiltración” (DIKAU, 2013).

Los movimientos de remoción de masa, derrumbes o caídas son fenómenos muy destructivos debido a la cantidad de material que transportan, principalmente tierra y lodo. Previo a un movimiento, este material se comporta como sólido, pero, una vez que se inicia, el material removido en muchos casos tiene un comportamiento líquido donde el flujo es no uniforme y no estacionario (MÉNDEZ-SÁNCHEZ, et al., 2011).

“Los peligros causados cuestan muchas vidas humanas y causan daños severos a la propiedad” (LIU, et al., 2006). “Los deslizamientos de masas en las pendientes pronunciadas son siempre una gran preocupación porque pueden afectar la vida e infligen pérdidas económicas” (REGMI, et al., 2015). “La generación de nuevos asentamientos urbanos sobre las partes altas de las vertientes, en su mayoría, ha producido degradación ambiental incrementando los niveles de vulnerabilidad y riesgo en las últimas décadas” (YOKOTA & V, 2008).

El estudio de los movimientos de laderas y taludes representa un análisis complejo de un fenómeno que requiere de la necesidad de identificar y clasificar los diferentes tipos de mecanismos que tiene lugar; precisamente su comprensión permite la adopción de medidas de corrección y estabilización en las áreas afectadas (CARMENATES & GUARDADO-LACABA, 2006).

La zonificación precisa de tales peligros proporciona una herramienta importante para las medidas preventivas. Los enfoques previos para la zonificación del riesgo de movimiento masivo son costosos porque requieren grandes cantidades de datos, tiempo y mano de obra, y solo son aplicables a áreas locales específicas (LIU, et al., 2006).



Por lo que el objetivo de este estudio es examinar los factores que influyen y las consecuencias del deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay, Tamburco – Abancay.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburco – Abancay, 2024?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son los factores que influyen en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata, en Tamburco – Abancay, 2024?
- ¿Qué consecuencias generaría el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay, Tamburco – Abancay, 2024?

1.3 Justificación de la investigación

La región de Apurímac está expuesta a fenómenos naturales como son las lluvias intensas, y la quebrada Sahuanay, Tamburco y Abancay no son ajenos a esta situación; este fenómeno puede producir movimientos en masa, que se encuentran mayoritariamente asociados a la susceptibilidad del terreno a ser afectado por desplazamiento frente a estos eventos desencadenantes (VALDIVIA, et al., 2014).

La lluvia es uno de los principales factores detonantes de deslizamientos, sin embargo, definir la manera cómo influye en la estabilidad no es tarea fácil; el proceso de remoción en masa depende fuertemente de las dimensiones y del tipo de deslizamiento, y para tener mayor conocimiento sobre la generación y los factores detonantes, es importante hacer una adecuada recopilación de información de los deslizamientos producidos en un área determinada. Esto permite explorar la posibilidad de buscar relaciones entre algunas características geomorfológicas y climáticas con la ocurrencia de procesos de remoción en masa (RAMOS-CAÑÓN, et al., 2015).

La zona de estudio (cerro Chuyllurpata) es una zona vulnerable al deslizamiento en masa, y aguas abajo (quebrada Sahuanay) consta de viviendas de adobe y materiales nobles.



“Este deslizamiento es reactivado por las fuertes lluvias presentadas en la zona, presentando reptación y deslizamientos más pequeños que afectan la vía y las construcciones aledañas” (GIRALDO, 2013). “Los deslizamientos en masa son eventos potencialmente desastrosos, que han ocasionado cuantiosas pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo” (DAVID & IGNACIO, 2011).

Los procesos gravitacionales o de remoción en masa cobraron mayor importancia en el mundo en las tres últimas décadas del siglo XX debido al considerable incremento en los daños y desastres relacionado con el avance de los asentamientos humanos hacia zonas peligrosas (LUGO-HUBP, et al., 2005).

El valor y la importancia de esta investigación tendrán un impacto tanto local como regional, pues servirán como base para promover un uso más seguro de las zonas libres de riesgo por deslizamientos de masas. Su principal aporte será ofrecer un diagnóstico claro sobre la situación de las áreas vulnerables. Además, este estudio abrirá el camino para investigaciones más profundas, considerando que actualmente la población vive con incertidumbre debido a la falta de estudios técnico-científicos y a la desatención de las autoridades, quienes no han asumido con seriedad las implicancias de los deslizamientos en la quebrada Sahuanay.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Identificar el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburco – Abancay, 2024.

2.1.2 Objetivos específicos

- Analizar los factores que influyen en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata, Tamburco – Abancay, 2024.

- Evaluar las consecuencias que generaría el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay, Tamburco – Abancay, 2024.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

El potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata tendría sus causas que las originan y ocasionarían daños en la quebrada Sahuanay, Tamburco – Abancay, 2024.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El posible deslizamiento del cerro Chuyllurpata estaría influido por varios factores, entre ellos la inestabilidad natural del terreno, las lluvias intensas que se presentan en la zona, la fuerte pendiente del cerro y las intervenciones humanas que se han dado en la quebrada Sahuanay.

- Si llegara a producirse un deslizamiento en el cerro Chuyllurpata, este podría causar daños importantes en la quebrada Sahuanay, afectando viviendas, infraestructura y vías de comunicación, además de poner en riesgo directo a las familias que viven en Tamburco y Abancay.

2.3 Operacionalización de variables

2.3.1 Variable independiente: Factores que influyen en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.

Tabla 1 – Matriz operacional de la variable independiente

Variable	Dimensiones	Indicadores
Factores que influyen en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.	a) Condiciones geológicas.	- Tipo y estabilidad del suelo. - Presencia de fracturas. - Humedad del terreno.
	b) Clima y lluvias.	- Lluvias intensas. - Precipitaciones acumuladas en la zona.
	c) forma del terreno.	- Pendiente del cerro. - Altura y relieve.
	d) Actividad humana.	- Modificaciones o intervenciones en la quebrada Sahuanay. - Uso del suelo y construcciones cercanas.

2.3.2 Variable dependiente: Consecuencias del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.

Tabla 2 – Matriz operacional de la variable dependiente

Variable	Dimensiones	Indicadores
Consecuencias del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.	a) Daños materiales.	- Afectación a viviendas. - Destrucción de infraestructura.
	b) Impacto en la población.	- Número de personas en riesgo. - Pérdidas de bienes y medios de vida.
	c) Afectación del territorio.	- Hectáreas dañadas. - Alteración en el cauce del río.
	d) Interrupción de servicios.	- Vías bloqueadas - Afectación a servicios básicos

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Internacionales

a) ARISTIZÁBAL (2008) en su investigación:

“Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio El Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín concluye que los movimientos en masa son procesos morfodinámicos altamente complejos con un alto componente antrópico en áreas con las características urbanas”.

b) RAMOS, et al. (2015) en la investigación: “Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá indica que el tipo de material deslizado que más se reporta corresponde a suelo y detritos, siendo esto congruente con los tipos de movimiento más registrados (flujos y deslizamientos)”. ALMAGUER y GUARDADO (2006) en la investigación: “Tipología de movimientos de masas desarrollados en el territorio de Moa, Cuba concluye que tenemos mecanismos relacionados con caída libre de la roca donde se manifiestan desprendimientos de rocas y vuelcos”.

c) FERRER y DELGADILLO (2014) en su investigación:

“Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. 2007” incluye también caídas (derrumbes), volcamientos, deslizamientos, propagación lateral, flujos, reptación y deformaciones gravitacionales profundas y su influencia en rocas, suelos (perfiles de meteorización/suelos residuales), detritos, tierra, lodo y turba.

d) ARISTIZÁBAL, et al. (2011) en la investigación: “Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia, concluye que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa es la lluvia acumulada o lluvia de largo plazo”.



e) MÉNDEZ, et al. (2011) en la investigación:

“Determinación del esfuerzo de cedencia para suelos vulnerables a movimientos de remoción de masa originados por las lluvias” se encontró un intervalo crítico donde el esfuerzo disminuye abruptamente para una concentración en peso de agua en el intervalo 25 % - 26 % (16 mm – 17 mm de agua aproximadamente), que es el punto donde se considera se tienen condiciones críticas para que ocurra un flujo de detritos hiperconcentrado.

f) MARCANO y CARTAYA (2013) en el estudio:

“Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones entre Camuri Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela” concluye que la geología de la superficie y la pendiente son las variables fundamentales para generar amenazas a los procesos de remoción en masa por las precipitaciones, siendo las áreas más susceptibles a los procesos de remoción en masa, las cuencas altas y medias bajas.

g) SÁNCHEZ (2011) en el proceso de investigación:

“Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México” concluye que la mayoría de los desastres provocados por remociones en masa, como flujos de detritos y desprendimientos, están determinados por la combinación de factores ambientales, principalmente, precipitaciones extremas, y factores antrópicos, por la presión de las comunidades sobre los espacios vulnerables.

h) LUGO-HUBP et al. (2005) indican en:

“Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos” concluye que el relieve es testigo de una historia prolongada de procesos gravitacionales que han modelado el relieve a lo largo del cuaternario. La erosión de las montañas ha ocurrido en conjugación con movimientos de levantamiento. El efecto de las lluvias fue desencadenar algunos miles de procesos de remoción en masa.



- i) CASTILLO (2011) en esta investigación: “La zonificación de amenaza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el valle del río Sixaola, concluye que en función del nivel de amenaza es posible planificar la densidad de uso del suelo”.
- j) ARISTIZÁBAL (2008) en su investigación:
“Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio el Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín” concluye que el movimiento en masa se clasificó como un movimiento complejo tipo deslizamiento rotacional simple flujo de escombros, que se desplazó con velocidades superiores a 5 m/s.
- k) DURÁN (2002) a lo largo de su investigación:
“Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco, indica que la deformación del suelo depende del esfuerzo normal aplicada al mismo y de su contenido de humedad”.
- l) MERGILI, et al. (2015) en la investigación:
“Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina” indica que los procesos de remoción en masa son normalmente parte de una cadena de procesos que, a menudo, se inicia con eventos de precipitación, terremotos o actividad volcánica. Esta cadena generalmente continúa con consecuencias socioeconómicas.
- m) SEPÚLVEDA, et al. (2016) a lo largo de la investigación:
“Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia: caso Útica, Cundinamarca, Colombia” indica que la mayor población de flujos de detritos está relacionada con la curvatura cóncava o convexa y no con sectores planos. Hay una asociación ligeramente mayor cuando la curvatura de un determinado sector de ladera es cóncava, el flujo de agua se concentra en dicha hondonada, lo que aumentará tanto el contenido de humedad del suelo como el tiempo que permanecerá saturado, pudiendo así generar erosión y desestabilización del estrato superficial.



- n) EL MAY, et al. (2015) en la investigación: “Caracterización geotécnica de los depósitos aluviales cuaternarios de la ciudad de Túnez (Túnez)” revelan que los depósitos cuaternarios proporcionan una alta capacidad de infiltración de agua y forman el acuífero principal.

3.1.2 Nacionales

- a) ZAVALA, et al. (2012) en la investigación:

“Susceptibilidad a los movimientos en masa en la región Cajamarca, norte de Perú y el deslizamiento de Rodeopampa del 22 de febrero del 2010” concluye en lo siguiente: Las condiciones intrínsecas en nuestro territorio, son independientes de los factores detonantes a los que está sujeto nuestro país, como son: lluvias excesivas (El Niño u otras anomalías climáticas), sismos de subducción e intraplaca y actividad antrópica; sin embargo ambos favorecen la generación de grandes movimientos en masa, causando desastres.

- b) VILLACORTA, et al. (2012) en la investigación:

“Mapa de susceptibilidad por movimiento en masa del Perú” concluyeron que las zonas de mayor susceptibilidad a los movimientos en masa en el territorio nacional (Perú), se localizan en: 1) Al oeste entre Cajamarca - La Libertad – Ancash – Lima - Huancavelica; 2) Ayacucho – Apurímac – Cusco – Puno, en el lado suroriental; 3) Arequipa – Moquegua – Tacna, en el lado suroccidental; 4) Junín – Pasco – Huánuco – San Martín, en la región central y nororiental; 5) Otras franjas menores que geográficamente se relacionan a una morfología regional y características litológicas particulares.

- c) QUIROZ, et al. (2024) indican en su investigación:

“Evaluación de la cinemática del deslizamiento de Cuenca en los Andes de Perú central mediante técnicas fotogramétricas y geodésicas”, que los deslizamientos de tierra representan un peligro importante en muchas regiones montañosas, incluidos los valles interandinos del Perú. Los resultados mostraron desplazamientos del orden de los 3,7 cm a 11,7 cm con la técnica de nube de puntos y 2,7 cm a 15 cm con el análisis de los ortomosaicos, siendo concordantes entre sí.



d) QUIROZ, et al. (2018) en su investigación:

“Propuesta de aplicación de métodos geodésicos y geofísicos para el estudio de deslizamiento de tierra: Caso Cuancabamba” los deslizamientos de tierra ocurren con mayor frecuencia que cualquier otro fenómeno geológico en todo el mundo. En el Perú, debido a la intensa actividad geodinámica (límite de placas y periodos de fuerte precipitación pluvial como el fenómeno del niño) los deslizamientos de tierra afectan a una gran parte del territorio. En general, en el Perú no se cuenta con estudios integrales que permitan modelar los movimientos de masa y evaluar su potencial de riesgo a la población.

e) MILLAN-ARANCIBIA y LAVADO CASIMIRO (2023) en la investigación:

“Estimación de umbrales de precipitación para deslizamientos superficiales en Perú a partir de datos diarios en formato de cuadrícula” La saturación del terreno es la principal causa de los deslizamientos de tierra, y en efecto puede producirse de diversas maneras (lluvias intensas, deshielo, cambios en el nivel freático, descargas de agua en lagos, lagunas y embalses, y aumento del caudal de los arroyos). La lluvia es el más frecuente e importante para desencadenar deslizamientos. Sin embargo, la máxima probabilidad de que ocurran deslizamientos no siempre está asociado a condiciones extremas de lluvias torrenciales y alta humedad del suelo.

3.1.3 Locales

a) VILLACORTA, et al. (2016) en su estudio:

“Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú)” indica que es evidente que la presencia de agua tanto superficial (escorrentía) como subterránea es fundamental en la ocurrencia de fenómenos geohidrológicos en Abancay. La lluvia por tanto juega un papel importante en la generación de estos eventos.

b) INDECI (2007) menciona que:

Actualmente, la ciudad de Abancay (ubicada en Apurímac, región del sur del Perú) presenta un crecimiento poblacional desordenado, sin



considerar las características geográficas, geodinámicas y climáticas de la zona. Gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimientos en masa. En el cauce de la quebrada Sahuanay se encuentran asentamientos humanos que han sido perjudicados en el año 2012, cuando se suscitó el movimiento complejo del cerro Chuyllurpata.

c) O'CONNOR (2008) en su trabajo de investigación:

“Planeamiento urbano para la prevención de desastres naturales en el Perú. Un asunto territorial” concluye que los desastres no son “naturales”, son responsabilidad del ser humano y la sociedad. Prevenir es actuar sobre los factores sociales que hacen vulnerables nuestras vidas y bienes.

d) RODRÍGUEZ, et al. (2019) en el estudio de:

“Evaluación de estrategias para mitigar el riesgo de flujos de escombros en la provincia de Abancay, Andes centro – sur peruanos” indican que durante el verano austral 2011 – 2012, la provincia de Abancay experimentó precipitaciones persistentes sin precedentes en los registros que se remontan localmente a 1982. Como consecuencia, un gran flujo de escombros se desencadenó en la parte alta del arroyo Sahuanay el 18 de marzo de 2012, con consecuencias catastróficas en los distritos densamente poblados aguas debajo de Tamburco.

e) VILLACORTA, et al. (2016) en la investigación realizada:

“Estudio integral dirigido a la evaluación de eventos Geohidrológicos y cambio climático en la ciudad de Abancay (Perú)” mencionan que las constantes lluvias, en algunos casos, extremas; generan diversos fenómenos geohidrológicos que afectan a la ciudad y poblados aledaños. Los procesos más relevantes por su afectación, registrados entre 1951 y 2012, se indica a continuación: paraje/lugar: cerro Chuyllurpata; evento: movimiento complejo; peligro: alto; vulnerabilidad: muy alto; fechas: 1951 y 2012. En la quebrada Sahuanay la surgencia en época de lluvia alcanza un caudal de $0,51 \text{ m}^3/\text{s}$.



3.2 Marco teórico

3.2.1 Precipitación pluvial

“Precipitación se refiere al agua en forma líquida o sólida que cae sobre la superficie de la tierra” (AYARZAGÜENA, et al. [sin fecha]). “Es la contribución de la precipitación atmosférica” (ŠOŠTARIĆ, et al. 2017).

PORTILLO (2024) indica que la lluvia es un fenómeno natural que ocurre cuando el vapor de agua en la atmósfera se condensa y cae en forma de gotas líquidas hacia la superficie terrestre. Este proceso, esencial en el ciclo del agua tiene múltiples consecuencias que impactan tanto a los ecosistemas como a las actividades humanas.

SALAS, et al. (2017) indican que dejando a un lado las formaciones ligadas a cursos de agua, lagos etc., el principal recurso es la lluvia. Existen condiciones del terreno que condicionan el reparto del agua de lluvia. Dos de estas variables, quizá las más importantes son la inclinación y la presencia de afloramientos rocosos o de pedregosidad en el suelo. La cantidad de afloramiento rocoso aumenta la escorrentía, acumulando agua en las zonas terrosas situadas entre las rocas, por lo que un mayor porcentaje de pedregosidad en el suelo conlleva una acumulación de agua en el suelo que lo rodea.

La precipitación promedio anual de Abancay es de 598 mm, los meses de octubre a marzo corresponden a periodo de lluvias, donde el mes más lluvioso es febrero con una precipitación promedio de 113 mm/mes, los meses poco lluviosos son de abril a setiembre, la precipitación pluvial promedio mensual con menos lluvia es junio con 2 mm/mes (CONDORI y PEÑA, 2016).

Al considerar el impacto de la lluvia se encontró que la lluvia extrema tiene una mayor probabilidad de desencadenar deslizamiento de tierra.

3.2.2 Infiltración

“Infiltración, el proceso por el cual entra agua en la superficie del suelo, es uno de



los procesos más importantes de la superficie de la tierra” (ZHIPENG, et al., 2018).

Los flujos por tierra y los caudales profundos en la mayoría de las situaciones reales son generados por la lluvia sobre superficies inclinadas que producen efectos adicionales. El proceso está controlado por muchos factores, incluida la profundidad del suelo y la geomorfología, las propiedades hidráulicas del suelo y las precipitaciones o las propiedades climáticas (MORBIDELLI, et al., 2018).

Después de que la lluvia se infiltra en la pendiente, ejerce presión de agua estática y presión de agua dinámica sobre la roca y el suelo, y la acción de filtración relacionada destruye el equilibrio de tensiones de la pendiente, reduce la resistencia de la pendiente al deslizamiento y aumenta la fuerza descendente. Al mismo tiempo, la infiltración de lluvia también provoca una disminución en la succión matricial de la roca y el suelo de la superficie del talud, reduciendo el factor de seguridad del talud y, en última instancia, provocando inestabilidad del talud y deslizamientos de tierra (REN, 2024).

La infiltración de agua del suelo está influenciada por varios factores, tales como labranza y cobertura vegetal, rugosidad superficial, porosidad y densidad del suelo, cantidad de carbono orgánico, tamaño y nivel de estabilidad de los agregados y contenido de agua en el suelo. Estos factores que influyen en la infiltración, en consecuencia, interfieren en la esorrentía (SAMPAIO DE ALMEIDA, et al., 2018).

“El cambio en el uso del suelo tiene un impacto notable en los procesos hidrológicos. Sin embargo, se sabe poco sobre el uso de la tierra, variación dependiente de las características de infiltración de agua del suelo” (ZHIPENG, et al., 2018).

Cuando el agua de lluvia se infiltra en las laderas, puede debilitar la tierra. Esta pérdida de fuerza en el suelo aumenta el riesgo de deslizamiento. La capacidad del suelo para mantenerse unido, lo que se llama resistencia a la tracción, es crucial



para evitar que las laderas se deslicen.

3.2.3 Aguas subterráneas

“El agua subterránea es el stock más grande de agua dulce accesible” (MIRZOYAN, et al., 2018); “el potencial de recarga es generado por la precipitación” (CHANG, et al., 2017); “son administradas por un único propietario y donde un sustituto perfecto, la recolección de agua de lluvia, está conectado físicamente con la fuente primaria de agua” (STAHN y TOMINI, 2017). “Las mediciones de las fluctuaciones del nivel del agua subterránea pueden proporcionar un medio práctico para estimar las tasas de recarga de aguas subterráneas temporalmente y espacialmente variables” (KROGULEC, 2017); “el agua subterránea se asocia con actividades antropogénicas, como el bombeo excesivo y los procesos naturales, principalmente a través de la reducción de la recarga” (ABIYE, et al., 2018). “La interacción de las aguas subterráneas con otros sistemas urbanos, como la infraestructura y las redes de aguas superficiales, es bien reconocida por expertos y está cada vez más en la agenda de la ciudad” (BRICKER, et al, 2017).

3.2.4 Deslizamiento

“Los fenómenos naturales como sismos y lluvias intensas pueden producir movimientos en masa, que se encuentran mayoritariamente asociados a la susceptibilidad del terreno a ser afectado por desplazamientos” (VALDIVIA, et al., 2014).

Los deslizamientos ocurren cuando la masa más externa de una ladera, y hasta cierta profundidad, se corta, desliza y se mueve como una pendiente abajo sobre una superficie de falla principal. Su velocidad es variable, desde muy baja hasta muy alta (HINOJOSA-CORONA, et al., 2011).

Los deslizamientos de tierra representan una transformación geológica dinámica que incluye tres fases distintas: el período de incubación inicial, donde comienzan a formarse las condiciones para la inestabilidad; la fase de evolución posterior, caracterizada por el desplazamiento y la deformación progresivos; y la etapa de extinción,



donde el movimiento cesa y la pendiente se estabiliza (BOYI, y otros, 2024).

La caracterización física y geotécnica de los sistemas geológicos superficiales que forman las laderas y la definición de las condiciones hidrológicas del suelo que conducen a deslizamientos superficiales inducidos por las lluvias son factores clave para la evaluación eficaz del peligro de deslizamiento (DI MAIO, et al., 2024).

Los componentes del suelo (grava, arena, limo y arcilla) y su proporción impactan significativamente en la iniciación del deslizamiento de tierra. Varias propiedades geotécnicas así como la composición del tamaño del grano del suelo, juegan un papel directo en la ocurrencia de deslizamientos de tierra en condiciones saturadas o secas (BHANDARI y DHAKAL, 2020).

El agua juega un papel importante en causar procesos de movimiento en masa. En los suelos y rocas saturadas, la masa de agua subterránea produce presión hidrostática, que aumenta linealmente con la profundidad y la tensión de flotación, lo que crea un efecto de empuje opuesto al estrés normal del sistema de materiales (DIKAU, 2013).

“En Abancay, cada año son registrados una serie de deslizamientos, ocurridos en su mayoría durante la época de lluvias. Entre los más relevantes se cuentan los de Ccocha – Pumaranra, el cerro Chuyllurpata, quebrada Sahuanay” (INGEMMET 2019).

Una gran cantidad de hechos han demostrado que la lluvia es el factor más importante que afecta la estabilidad de taludes y causa inestabilidad de taludes, y los deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia representan aproximadamente el 90 % del número total de deslizamientos de tierra. Después de que la lluvia se infiltra en la pendiente, ejerce presión de agua estática y presión de agua dinámica sobre la roca y el suelo, y la acción de filtración relacionada destruye el equilibrio de tensiones de la pendiente, reduce la resistencia de la



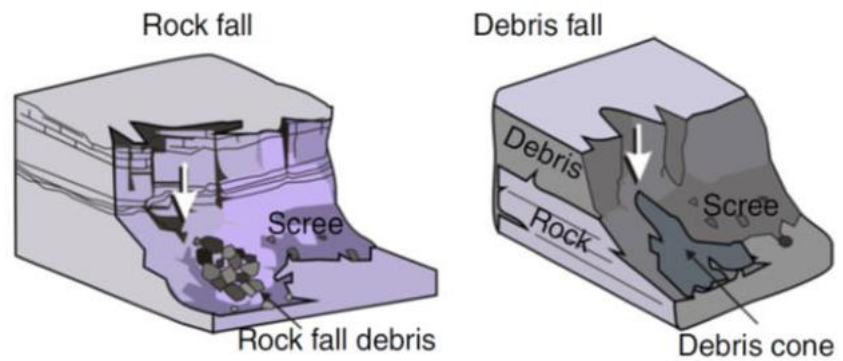
pendiente al deslizamiento y aumenta la fuerza descendente (REN, et al., 2024).

Cuando los eventos de lluvia son prolongados y/o intensos, el agua se filtra en el suelo, cambia el comportamiento del suelo, si la infiltración es demasiado se vuelve inestable, y el suelo débil es más propenso a deslizarse provocando un deslizamiento.

3.2.4.1 Tipos de deslizamiento (movimiento) en masa

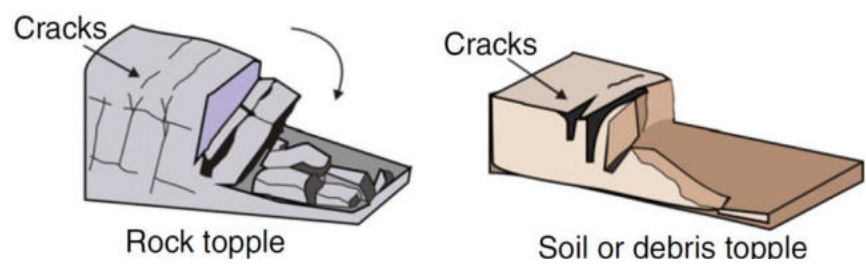
“Se pueden observar los siguientes: deslizamientos superficiales del suelo y capa vegetal (tipo soil – slide), y deslizamientos profundos rotacionales” (CAPRA & DÁVILA, 2003).

Sistema de clasificación está basado en los siguientes tipos: *falling*, (Fig. 1) falla o desprendimiento del suelo o la roca; *toppling* (Fig. 2), caída hacia delante de la roca o el suelo alrededor de un eje o punto que se encuentra por debajo de gravedad de la masa desplazada; *sliding* (Fig. 3), deslizamiento, movimiento descendente de una roca o masa de suelo a lo largo de una superficie de rotura pueden ser traslacionales o rotacionales; *flowing* (Fig. 4), flujos se caracterizan por la turbulencia espacialmente continuo movimiento de roca o suelo desagregado sobre una cama rígida, ya sea agua o aire actuando como fluido de poros; *spreading*, dilatación o extensión espacial de una masa de roca o suelo cohesivo junto con una subsidencia en un material subyacente; *Creeping*, deformación lenta, plástica y descendente de la roca o suelo sin superficies de corte o deslizamientos definidas (GUTHRIE, 2013).



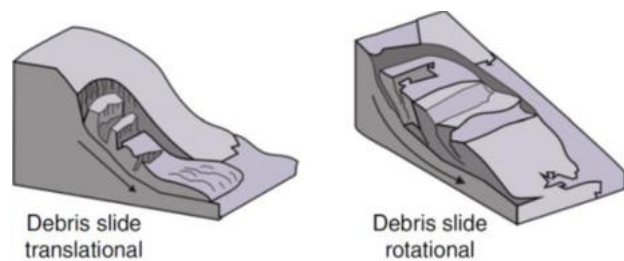
FUENTE: GUTHRIE (2013)

Figura 1 – Estilos de movimiento de masas: falla



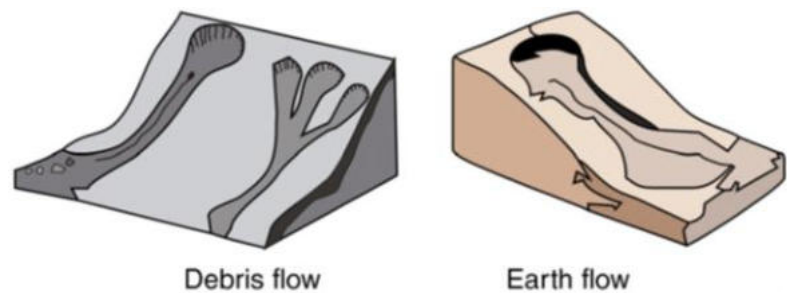
FUENTE: GUTHRIE (2013).

Figura 2 – Estilos de movimiento de masas: caída



FUENTE: GUTHRIE (2013).

Figura 3 – Estilos de movimiento de masas: deslizamiento



FUENTE: GUTHRIE (2013).

Figura 4 – Estilo de movimiento de masas: reptación o flujo lento

3.2.5 Factor de seguridad

“El factor de seguridad (FS) se usa comúnmente para cuantificar el nivel de seguridad de una pendiente. Debido a la incertidumbre y la variabilidad involucradas en el suelo condiciones y métodos analíticos, el FS calculado de una pendiente puede no ser exacto” (BAHSAN, et al., 2014).

“El FS para deslizamientos de tierra puede ser valiosa para desarrollar un sistema de alerta, especialmente en las regiones tropicales que es proverbialmente propenso a deslizamientos de tierra” (NAIDU, et al., 2017).

“La superficie crítica de deslizamiento y el FS se obtienen mediante el uso de elementos finitos, equilibrio límite, Morgenstón - Price y la reducción de la resistencia y otros métodos disponibles” (MAULA y ZHANG, 2011) “o métodos tradicionales” (RABIE, 2014).

“La infiltración de lluvia también provoca una disminución en la succión matricial de la roca y el suelo de la superficie del talud, reduciendo el factor de seguridad del talud y, en última instancia, provocando inestabilidad del talud y deslizamientos de tierra” (REN, et al., 2024).

3.2.6 Reología

“la reología es la ciencia que estudia la deformación de los objetos sometidos a fuerzas externas” (CABALLERO, et al., 2017; PEARSON y ROBERTS, 2009).

Según TANNER (2009) “la reología es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia, especialmente de materiales no clásicos. La reología es ahora una ciencia de mediana edad, pero tiene una relevancia en constante evolución para la tecnología y las necesidades”.

La reología se ocupa de la deformación dependiente del tiempo de los cuerpos bajo la influencia de tensiones aplicadas, tanto la magnitud como la velocidad, ya sean los cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos. Es decir, el enfoque principal es la deformación plástica o el flujo del material (DARVELL, 2018).



“Por lo tanto, la reología es la herramienta lógica para caracterizar y describir el comportamiento de flujo, el espesamiento, la pérdida de trabajabilidad, la estabilidad e incluso la compactibilidad de una suspensión de partículas” (GHODDOUSI y SALEHI, 2017).

WILSON (2018) “indica que la reología se ocupa de la pregunta ¿Cómo responde un material a una fuerza?”. La ecuación básica en palabras es:

$$\mathbf{Fuerza = (propiedad) * (medida de respuesta) \quad Ec.01.}$$

Los científicos físicos se refieren a las fuerzas que actúan sobre materiales en términos de tensiones, o fuerza por unidad de área. La respuesta se cuantifica de deformación, o la velocidad de deformación. Las unidades de tensión y presión son Newtons por metro cuadrado (N/m^2), o Pascales (Pa):

$$\mathbf{Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{N}{m^2} * \frac{m}{m} = \frac{J}{m^3} \quad Ec.02.}$$

Donde:

Pa: presión

N: fuerza (Newton)

m^2 : área

m^3 : volumen

J/m^3 : energía por unidad de volumen (Joule/ m^3)

La presión es, por lo tanto, una medida del contenido de energía por unidad de volumen de fluido.

“Según la composición y propiedades físicas, en el campo de la reología los fluidos pueden ser descritos por diferentes modelos reológicos desde newtonianos hasta no newtonianos” (LEYVA, et al., 2016).



3.2.6.1 Reología newtoniana

Se dice que un fluido es newtoniano si las tensiones viscosas que surgen de su flujo, en cada punto, son proporcionales a la velocidad de deformación local. Más precisamente, un fluido es newtoniano si, y solo si, los tensores que describen la tensión viscosa y la velocidad de deformación están relacionados por un tensor de viscosidad constante que no depende del estado de tensión y la velocidad del flujo. Si el fluido es también isotrópico, el tensor de viscosidad se reduce a dos coeficientes reales, que describen la resistencia del fluido a la deformación continua por corte y a la compresión o expansión continua, respectivamente (DUTTO, 2014).

La reología newtoniana estudia aquellos fluidos cuya respuesta a una fuerza es bastante predecible: cuando se les aplica una tensión de corte, su deformación aumenta de forma proporcional. En otras palabras, fluyen de manera constante. Lo más interesante es que su viscosidad no cambia sin importar cuánta fuerza se les aplique. Algunos ejemplos comunes de este tipo de fluidos son el agua, ciertos aceites minerales y los gases.

3.2.6.2 Reología no newtoniana

Un fluido no newtoniano es un fluido que tiene una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte en un flujo de corte simple. Además, la reología no newtoniana se exhibe en masas de suelo fluidizado en deslizamientos de tierra similares a flujos y en algunas lutitas (LAVROV, 2023).

Un fluido no newtoniano es aquel cuya viscosidad varía en función de la tensión cortante o la fuerza aplicada. La característica principal es que su resistencia al flujo (viscosidad) cambia. Puede aumentar o disminuir dependiendo de la fuerza aplicada.

Los fluidos no newtonianos no se comportan como los que describe la ley de Newton, ya que su viscosidad puede variar según la fuerza que se les aplique. Este tipo de comportamiento es común en muchos fenómenos



naturales, como los flujos de lodo, los deslizamientos de escombros, los lahares (que son corrientes de lodo volcánico) y las avalanchas de nieve.

“Existen una variedad de enfoques para simular fluidos no newtonianos, incluidos los monofásicos y multifásicos. Las capacidades actuales de HEC-RAS utilizan los enfoques monofásicos, que modelan el comportamiento de fluidos con modelos reológicos (relaciones tensión – deformación)” (CHAVERRA et al. 2025).

Un enfoque monofásico trata el flujo como una sola fase homogénea, en lugar de considerar múltiples fases separadas (ejemplo, una mezcla de agua y sedimentos como fases distintas).

a) Método Bingham

En el campo de la dinámica de fluidos es muy conocido que los fluidos tipo Bingham son materiales viscoplásticos que tienen un comportamiento dual determinado por un límite elástico (Límite de esfuerzo de fluencia) que determina las partes del material que se comportan como fluido (sobre el límite elástico), o como un sólido (bajo el límite elástico) (NÚÑES, 2018).

Los fluidos viscoplásticos de Bingham son fluidos no-newtonianos que se caracterizan por presentar una tensión de corte mínima, denominada tensión de fluencia. Por encima de esta tensión de corte mínima el fluido comienza a moverse. En caso de no superar esta tensión de fluencia, el fluido se comporta como un cuerpo rígido o cuasirrígido, con velocidad de deformación nula (MORENO y CERVERA, 2016).

MORENO (2014) menciona que, en el medio ambiente, los fluidos de Bingham pueden modelizar fluidos de lodos y de residuos mineros, entre muchos otros. Los lodos son buenos ejemplos de los plásticos de Bingham. En el modelo de Bingham la viscosidad está dada por:



$$\begin{aligned} \mu(\dot{\gamma}) &= \mu_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} && \text{para } \tau > \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 && \text{para } \tau \leq \tau_y \end{aligned} \quad \text{Ec. 03.}$$

Donde:

μ_0 : viscosidad plástica

$\mu(\dot{\gamma})$: viscosidad aparente

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación

τ_y : tensión de corte mínima, a partir de la cual comienzan a moverse.

τ : magnitud del tensor de tensiones desviadoras

En consecuencia, el tensor de tensiones desviadoras es:

$$\begin{aligned} \tau &= 2 \left[\mu_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \right] \varepsilon(\mathbf{u}) && \text{para } \tau > \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0 && \text{para } \tau \leq \tau_y \end{aligned} \quad \text{Ec.04.}$$

Para definir si una partícula del fluido se mueve o no, es decir, si está en fluencia o no, se comprueba si la magnitud del tensor de tensiones desviadoras, τ , excede o no el valor de la tensión de fluencia, τ_y . Cuando la magnitud del tensor de tensiones del fluido, τ , supera la tensión de fluencia, el comportamiento es similar al de un fluido Newtoniano; en caso contrario, el fluido no presenta deformaciones por corte.

b) O'Brien Equation (Quadratic)

El método de la Ecuación de O'Brien (Cuadrática) se utiliza principalmente en el contexto de la modelización de flujos hiperconcentrados, como flujos de lodo y flujos de escombros.

Martínez (2022) indica que **FLO-2D** utiliza la relación cuadrática de O'Brien (1993):

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{\frac{3}{4}}} \quad \text{Ec.05.}$$

Donde:

S_f : pendiente de la línea de energía

τ_y : esfuerzo de fluencia

γ_m : peso específico de la mezcla

h : profundidad

V : velocidad

η : viscosidad dinámica

K : coeficiente laminar

n_{td}^2 : pseudo número de Manning que es corregido por la concentración de sedimento.

HEC-RAS, el modelo cuadrático, también basado en la ecuación de O'Brien se presenta a continuación:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{\eta}{\gamma_m h} \frac{3V}{h} + \frac{l_m^2}{gh} \frac{3V^2}{h} + \frac{0,01}{\gamma_m h} \left(\left(\frac{0,615}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^{-2} d_s^2 \left(\frac{3V}{h} \right)^2 \quad \text{Ec.06.}$$

Donde:

$\frac{3V}{h}$: tasa de deformación angular que HEC-RAS asume en cada celda

l_m : longitud de la mezcla de Prandtl

d_s : tamaño de grano representativo

C_v : concentración volumétrica de sedimentos

ρ_s : densidad de la mezcla

c) Método Clastic Grain-Flow

Los granos o clastos se mueven esencialmente por la acción de la gravedad, pero en presencia de un fluido. Grain flows o flujo de granos, se producen cuando sedimentos no cohesivos se mueven pendiente abajo por empuje de la gravedad. Aunque hay aire o agua entre granos, sólo actúa como lubricante y no empuja a los granos. El flujo de granos se mantiene por las presiones causadas por las colisiones de granos (e.g. avalanchas de arena) (LEÓN, et al., 2020).



“HEC-RAS dispone del modelo reológico modelo Clastic – Grain Flow (Modelo geotécnico de Mohr – Coulomb) para flujo clástico” (SOUSA, 2022).

PARRA (2024) señala, el modelo de Mohor – Coulomb es un modelo matemático que describe los flujos no newtonianos desde un enfoque plástico y su aplicación ha sido utilizada para describir flujos granulares en aquellas corrientes donde las fuerzas friccionales son las predominantes en el flujo. Este modelo está dado por:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{Ec.07}$$

$$\sigma = (\rho_m - \rho_w) g h \cos^2 \theta \quad \text{Ec.08}$$

Donde:

c : cohesión

ϕ : ángulo de fricción interna del fluido

θ : pendiente del lecho

ρ_m : densidad de los sedimentos

ρ_w : densidad del agua

g : gravedad

h : profundidad vertical del flujo

d) Modelo de Herschel – Bulkley

A diferencia del modelo planteado por Bingham, en donde el esfuerzo cortante versus deformación se comporta de forma lineal, este modelo plantea una relación no lineal que se puede representar mediante la siguiente ecuación (PARRA, 2024):

$$\tau_{MD} = \tau_y + \tau_{vd} \quad \text{Ec.09.}$$

$$\tau_{vd} = K \dot{\gamma}^n \quad \text{Ec.10.}$$

Donde:



K : factor o índice de consistencia

τ_y : esfuerzo cortante

τ_{vd} : esfuerzo viscoso

$\dot{\gamma}$: velocidad de cizallamiento

3.2.6.3 Taxonomía de los flujos de lodo y escombros

HEC-RAS (2019) indica que a medida que la carga de sedimentos aumenta y se vuelve más gruesa, el flujo pasa de newtoniano a hiperconcentrado, lodo, escombros y finalmente, flujos clásticos (Fig. 5). La taxonomía de los flujos de escombros puede ser confusa, ya que diferentes disciplinas, agencias y publicaciones describen la gama de flujos geofísicos de manera diferente.

SOURCE	CONCENTRATION PERCENT BY VOLUME (S.G. = 2.65)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Beverage and Culbertson (1964)	High	Extreme	Hyperconcentrated				Mud Flow			
Costa (1984)	Water Flood		Hyperconcentrated			Debris Flow				
NRC from O'Brien & Julien (1984)	Water Flood		Mud Flood		Mud Flow	Landslide				
Takahashi (1981)			Debris or Grain Flow						Fall, Landslide, Creep, Sturzstrom, Pyroclastic Flow	
Chinese Investigators (Fan & Dou, 1980)	Sediment Laden		Hyperconcentrated Flow			Debris or Mud Flow				
Pierson & Costa (1984)	STREAMFLOW Normal Hyperconcentrated			SLURRY FLOW (Debris Torrent), Debris & Mud Flow, Solifluction			GRANULAR FLOW Sturzstrom, Debris Avalanche, Earthflow, Soil Creep			

Fast
↑
VELOCITY
↓
Slow

FUENTE: HEC-RAS (2019)

Figura 5 – Various taxonomies of geophysical flows illustrating the diversity of definitions (modified from Philips (1888) after Bradley and McCutcheon, 1985)

3.2.7 Flujo de escombros (Debris Flow)

Los flujos de escombros se producen en todas las regiones con relieves abruptos y al menos precipitaciones ocasionales. Son uno de los procesos de movimiento de masas más frecuentes y desempeñan un papel importante en el traslado de sedimentos. Su alta velocidad de flujo, las fuerzas de impacto y el largo recorrido, combinados con una escasa previsibilidad temporal, hacen que flujos de escombros y las avalanchas



de escombros sean uno de los tipos de deslizamiento de tierras más peligrosos (MATTHIAS y HUNGR, 2005).

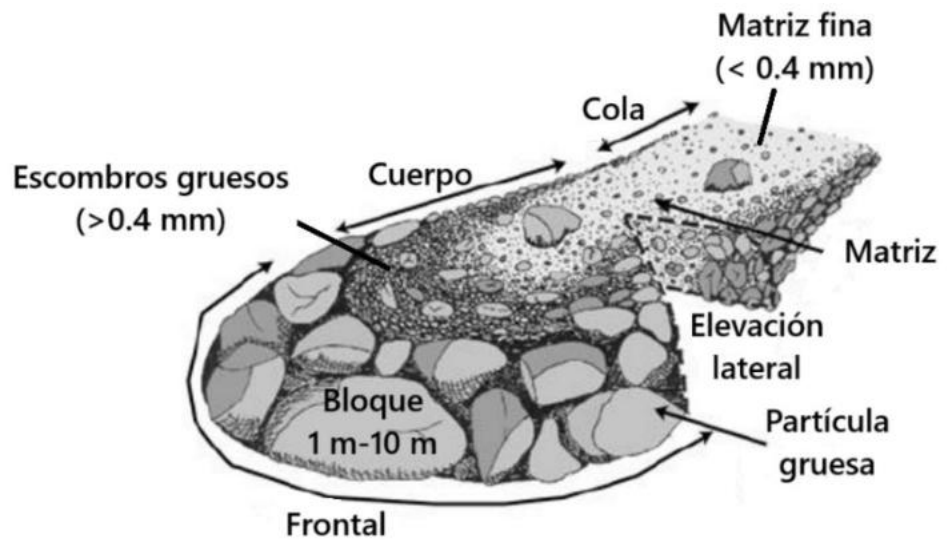
Se pueden distinguir dos regímenes de flujo límite. La carga de fondo y la suspensión se refieren al transporte diluido de sedimentos dentro del agua. Esto significa que el agua es el principal agente en la dinámica del flujo y que la concentración de partículas no supera unos pocos por ciento. Los flujos de detritos son un importante peligro natural, que se cobra miles de vidas y millones de dólares en pérdidas materiales cada año en casi todas las zonas montañosas de la tierra (ANCEY, 2013).

“Tras la movilización, los flujos de detritos parecen moverse como masas agitadas de concreto húmedo. Los flujos más grandes pueden transportar rocas de 10 m o más de diámetro” (IVERSON, 1997).

Los flujos de masa pueden desarrollarse en cualquier área donde haya sedimento suelto presente en laderas. El riesgo para la población y las estructuras humanas está directamente relacionado con la proximidad entre el fenómeno y los intereses humanos. Obviamente, los eventos que movilizan pequeños volúmenes de material en las laderas de las colinas es probable que afecten solo a los intereses – si los hay – al pie de la ladera. Los eventos que movilizan grandes volúmenes de material es probable que se propaguen a grandes distancias y pueden afectar a poblaciones remotas, a veces a decenas de kilómetros de distancia del área de activación (LAIGLE y BARDOU, 2022).

En la figura 6 observamos una vista esquemática de una oleada de flujo de detritos y los elementos componentes, siendo el cuerpo es más largo. El frente está constituido por piedras y fragmentos de rocas con gradación proporcional a la profundidad, que tiene una tendencia a disminuir su velocidad de avance y a incrementar su volumen. El cuerpo está constituido por piedras y barro en estado altamente turbulento, con cantos rodados en movimiento. La cola es de barro con arena y guijarros, en alta concentración, que fluye por mucho tiempo después de que la onda ha pasado (AGUIRRE, et al., 2000).





FUENTE: LAIGLE y BARDOU, 2022.

Figura 6 – Vista esquemática de un oleaje de escombros

3.2.7.1 Concentración volumétrica de sedimentos

“La concentración volumétrica de sedimentos (C_v) es la relación existente entre el volumen de sólidos y el volumen total, se expresa mediante la siguiente ecuación” (CÓRDOBA y MAFFLA, 2022).

$$C_v = \frac{\text{Volumen de sólidos}}{(\text{Volumen de sólidos} + \text{volumen de aguas})} \quad \text{Ec.11.}$$

Tabla 3 – Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos

Comportamiento del flujo en función de la concentración de sedimentos			
	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	Por volumen	Por peso	
Deslizamientos	0.65-0.80	0.83-0.91	No fluye, falla por deslizamiento en bloque
	0.55-0.65	0.76-0.83	Deslizamiento en bloque con deformación interna y reptación previa a la falla.
Flujo de barro	0.48-0.55	0.72-0.76	Flujo evidente; reptación sostenida de barro; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no



			ocurre esparcimiento sobre una superficie plana.
	0.45-0.48	0.69-0.72	Flujo con esparcimiento sobre superficies planas. Flujo cohesivo; mezcla.
Inundaciones o crecidas de barro	0.40-0.45	0.65-0.69	Flujo se mezcla fácilmente; deposición de grandes bloques; ocurren ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35-0.40	0.59-0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; esparcimiento casi completo en superficies planas; dos fases en superficie con ondas.
	0.30-0.35	0.54-0.59	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; la mayor parte de la arena y la grava se han asentado y se mueven como carga de fondo
	0.20-0.30	0.41-0.54	Ondas dominan el movimiento superficial
Inundaciones o crecidas de agua	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con posibilidades de sedimentos en suspensión o carga de fondo
<p>NOTA</p> <p>El texto se ha traducido del documento original siguiendo los principios establecidos en la norma ISO/IEC 2021, con adaptaciones para el idioma español.</p> <p>FUENTE: FLOW-2D USERS MANUAL (O'Brien 2003)</p>			

Para un evento de flujo de barro, la concentración promedio de sedimentos generalmente varía en el rango de 20 % a 35 % en volumen con picos de concentración de aproximadamente 50 %. Cuando llega al pico, la concentración media de sedimentos disminuye generalmente al rango de 30 % a 40 % en volumen y en la recesión del hidrograma, pueden producirse oleadas de una concentración más alta de sedimento (RUT, et al., [sin fecha]).

Para un evento de flujo de escombros, se estima una distribución de Cv en el tiempo partiendo de un valor cercano a 0,2 y aumentando gradualmente hasta 0,35 o 0,45 dependiendo del tipo

de sedimento de la cuenca. Si la cuenca produce flujo de lodos y escombros entonces se debe utilizar valores cercanos a 0,45 (LAURA, et al., 2018).

3.2.7.2 Límite elástico

Todos los modelos reológicos, lineales o no lineales, requieren un límite elástico. Matemáticamente, el límite elástico es la intersección con el eje y de la relación tensión – deformación. Conceptualmente, es el rango de tensiones dentro del cual la mezcla no se mueve (HEC-RAS, 2023).

Tabla 4 – Parámetros de límite elástico para la ecuación de O'Brian de Julien (1995) (convertidos a la forma exponencial utilizada en HEC-RAS)

Type	Liquid Limit Cv	$\tau_y = ae^{bc_v}$		
		a	b	Rango (Pa)
Typical Soil	65-80 %	0.005	17.2	375-5,000
Kaolinite	40-50 %	0.05	20.7	200-1,600
Sensitive Clays	35-60 %	0.3	23.0	950-300 k
Bentonite	5-20 %	0.002	230.3	200-2E+17
FUENTE:(HEC-RAS, 2023)				

3.2.7.3 La viscosidad dinámica de la mezcla

(A veces denominada “viscosidad cargada de sedimentos”) es la viscosidad de la mezcla. Dos de los modelos reológicos incorporan el impacto de los sólidos, en parte, mediante la viscosidad dinámica de la mezcla, que es la viscosidad aparente de la mezcla, incluyendo la influencia de la fase sólida sobre la fase líquida. Los flujos de lodo y escombros son más viscosos que el agua (HEC-RAS, 2023).



Tabla 5 – Coeficientes para el multiplicador exponencial de la viscosidad para diferentes tipos de suelos de Julien (1995) (Convertido a forma exponencial)

Type	Liquid Limit Cv	$\eta = 0.001e^{BC_v}$	
		B	Rango (Pa)
Typical Soil	65-80 %	18.4	160-2,500
Kaolinite	40-50 %	18.4	1.6-10
Sensitive Clays	35-60 %	11.5	0.1-1
Bentonite	5-20%	230.3	100-1E+17
FUENTE: (HEC-RAS, 2023)			

3.2.8 Inteligencia artificial

Para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, se hará uso de herramientas de inteligencia artificial a través de distintos programas como Global Mapper v.26.0, AutoCAD v.2018, ArcGis v.10.5, ArcGIS Pro v.3, HEC-RAS v.6.7, entre otros. Estos softwares permitirán automatizar varios procesos, lo que contribuirá a obtener resultados sólidos y confiables.

La IA se define como la ciencia y la ingeniería de la fabricación de máquinas inteligentes, especialmente programas informáticos inteligentes, hoy en día tiene objetivos mucho más concretos y aplicables en el corto plazo. Por ejemplo se busca que un sistema sea capaz de adquirir información y tomar decisiones del modo más parecido a lo que haría un ser humano en tareas concretas (BECERRA y MENDOZA, 2021).

“La IA se manifiesta en algoritmos cuyo desempeño es difícil de predecir o explicar. Actualmente se investiga la aplicación de IA a todos los campos del conocimiento” (GRAZIA y VIZOSO, 2022).

Las computadoras procesan información y toman decisiones. Hasta hace poco, las decisiones que tomaban no eran complejas, pero debido a los incesantes avances tecnológicos que se producen, los sistemas basados en IA están logrando niveles de competencia en la toma de decisiones que en muchos contextos igualan o superan a las personas (VERDEGAY, et al.,



2021).

3.2.8.1 HEC-RAS

HEC-RAS fue desarrollado para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). Sin embargo, el software desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica se pone a disposición del público cuando corresponda. Su uso no está restringido y personas ajenas al USACE pueden usar el programa gratuitamente.

HEC-RAS es una aplicación de software ampliamente utilizada que puede realizar cálculos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para una red completa de canales naturales y construidos, áreas de desbordamiento/llanura de inundación, áreas protegidas por diques; etc. HEC-RAS tiene cuatro módulos principales: (a) perfiles de superficie de agua de flujo constante, que está destinado a calcular perfiles de superficie de agua para flujo constante gradualmente variado; (b) simulación de flujo inestable, que puede simular flujo inestable unidimensional, bidimensional y unidimensional /bidimensional combinado a través de una red completa de canales abiertos, llanuras de inundación y abanicos aluviales; (c) cálculos de transporte de sedimentos, que está destinado a la simulación de cálculos de transporte de sedimentos unidimensionales/límites móviles resultantes de la socavación y la deposición durante períodos de tiempo moderados a largos; y (d) análisis de la calidad del agua; que tiene como objetivo permitir al usuario realizar análisis de calidad del agua fluvial (LEON y GOODELL, 2016).

Para abordar los desafíos de sedimentación, el software HEC-RAS (Centro de ingeniería hidrológica-Sistema de análisis fluvial) ofrece un enfoque eficaz para comprender las características de sedimentación a lo largo del tiempo. Permite investigar los patrones de sedimentación a través del modelado numérico utilizando HEC-RAS 2D, centrándose específicamente en: 1) identificar zonas propensas a sedimentos dentro del embalse y su



distribución espacial; 2) analizar los cambios en la elevación del lecho y cuantificar los cambios volumétricos debido a la acumulación de sedimentos; y 3) examinar la relación entre las características hidráulicas, particularmente los patrones de velocidad de flujo, y el comportamiento de sedimentación resultante (PRATAMA, et al., 2025).

3.2.8.2 Modelo de inundación HEC-RAS

DASALLAS (2019) menciona que, “en las últimas décadas, se han desarrollado numerosos modelos de inundación que utilizan diferentes enfoques hidrológicos. Estos tipos de modelos hidrológicos suelen clasificarse como hidrodinámicos. Puede agruparse dimensionalmente en modelos 1D, 2D y 3D”.

El manual de HEC-RAS (2016) que introdujo las capacidades del modelado en 2D y por lo tanto contiene información de los modelos unidimensionales (1D), y bidimensionales (2D) de inundación.

Los modelos de inundación unidimensionales (1D) simulan flujos que se supone que todos los flujos de agua fluyen en dirección longitudinal. Las ecuaciones de movimientos unidimensionales se transforman entonces en:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \quad \text{Ec.12}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{\Phi^2 Q^2}{A_c}\right)}{\partial x_c} + \frac{\partial\left[\frac{(1-\Phi)^2 Q^2}{A_f}\right]}{\partial x_f} + gA_c \left[\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc}\right] + gA_f \left[\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff}\right] = 0$$

Ec.13

Donde:

Q: flujo total

A: área de flujo

Φ : cociente de la capacidad de conducción del canal sobre la capacidad de conducción total

z: elevación de la superficie del agua



S_f : pendiente de fricción

c : canal

f : llanura de inundación

Los modelos de inundación bidimensionales (2D) permiten el movimiento de agua tanto en dirección longitudinal como lateral, mientras que se supone que la velocidad en insignificante en la dirección z . Asumiendo que la ecuación gobernante representa un fluido incompresible, la forma diferencial no permanente de la conservación de masa se convierte en:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Ec.14}$$

Donde:

t : tiempo

q : término de fuente/sumidero

u y v : son los componente de velocidad en las direcciones x e y , respectivamente

H : elevación de la superficie del agua, se define como la suma de la elevación de la superficie $z(x, y)$ y la profundidad del agua $h(x, y, t)$.

La ecuación de conservación de masa de batimetría de subcuadrícula de HEC-RAS se representa entonces como:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k V_k * n_k A_k(H) + Q = 0 \quad \text{Ec.15}$$

Donde:

Ω : es el espacio volumétrico tridimensional ocupado por el fluido

Q : representa al término de fuente/sumidero que cruza la superficie inferior (infiltración) y la superficie superior (lluvia/evaporación)

Los términos con superíndice n y $n + 1$ representan los índices de pasos de tiempo entre dos pasos de tiempo consecutivos Δt , y V_k , $A_k(H)$ y n_k son la velocidad promedio, el área y el vector normal unitario en la cara k .



Para permitir la representación de características verticales, turbulencia vertical, vórtices y flujos espirales se utilizan modelos 3D (en desarrollo relativamente reciente). Los modelos tridimensionales también pueden superar otras limitaciones de los modelos 1D y 2D, como la inclusión de supuestos hidrostáticos, esfuerzos cortantes viscosos, la fricción del lecho de los componentes del fluido, etc.

3.2.8.3 Modelo hidráulico FLO-2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D simula flujo de fluidos no newtonianos, como aludes torrenciales, en conos de deyección. El modelo permite simular flujo en topografías complejas. Puede modelarse flujo de agua, flujo hiperconcentrado de sedimentos, flujo de barro y alud torrencial. Los datos de entrada que se requiere son: la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla (LAURA, 2018).

3.2.8.4 Modelo digital de superficie (DSM)

En los últimos años las técnicas de procesamiento de datos topográficos como geoespaciales han experimentado un gran desarrollo, ha sido posible en el ámbito de la geomorfología llevar a cabo campañas de monitoreo capaces de obtener modelos digitales precisos y de alta resolución (NIEVAS, 2020).

Gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica y la evolución de los sensores satelitales que hicieron posible la creación de Modelos Digitales de superficie (MDS) precisos y de alta resolución. El MDS representa el relieve incluyendo todo tipo de elementos presentes como edificaciones, vegetación u otros objetos (GONZÁLES, et al., 2023; NIEVAS, 2020).

“El MDS es una capa de información fundamental y de esta pueden



extraerse un número muy elevado de nuevos parámetros” (FUENTES, et al., 2012).

3.2.9 Coeficiente de rugosidad de Manning (n)

La “n” de Manning es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces, naturales o artificiales. Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie de factores como la vegetación, irregularidades, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros. Uno de los métodos más conocidos y de aplicación universal para estimar el caudal es la Ecuación de Manning, que se fundamenta en los parámetros de la sección hidráulica de la estructura de conducción y en la rugosidad de dicha sección (FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA, et al., 2018; OSÍO, et al., 2000).

Tabla 6 – Referencia de valores n de Manning. Base de Datos Nacional de Cobertura de Suelo (National Land Cover Database (NLCD))

Valor de NLCD	n Rango de valores	Descripción
11	0,025-0,05	Aguas abiertas: áreas de aguas abiertas, generalmente con menos del 25 % de cobertura de vegetación o suelo.
12	N/A	Hielo/nieve perenne: áreas caracterizadas por una cubierta perenne de hielo y/o nieve, generalmente superior al 25 % de la cobertura total.
21	0,03-0,05	Espacios abiertos desarrollados: áreas con una mezcla de algunos materiales construidos, pero sobre todo vegetación en forma de césped. Las superficies impermeables representan menos del 20 % de la cobertura total. Estas áreas incluyen más comúnmente unidades de vivienda unifamiliar de lotes grandes, parques, campos de golf y vegetación plantada en entornos desarrollados con fines recreativos, de control de la erosión o estéticos.
22	0,06-0,12	Áreas desarrolladas, de baja intensidad: con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Las superficies impermeables representan entre el 20 % y el 49 % de la cobertura total. Estas áreas incluyen más comúnmente unidades de vivienda unifamiliar.
23	0,08-0,16	Desarrollado, Intensidad Media: áreas con una

		mezcla de materiales contruidos y vegetación. Las superficies impermeables representan entre el 50 % y el 79 % de la cobertura total. Estas áreas incluyen más comúnmente unidades de vivienda unifamiliar.
24	0,12-0,20	Áreas desarrolladas de alta intensidad: altamente desarrolladas donde las personas residen o trabajan en grandes cantidades. Algunos ejemplos son los complejos de apartamentos, las casas adosadas y los establecimientos comerciales e industriales. Las superficies impermeables representan entre el 80 % y el 100 % de la cubierta total.
31	0,023-0,03	Tierra estéril (roca/arena/arcilla): áreas de lecho rocoso, pavimento desértico, escarpes, talud, deslizamientos, material volcánico, escombros glaciares, dunas de arena, minas a cielo abierto, pozos de grava y otras acumulaciones de material de tierra. En general, la vegetación representa menos del 15 % de la cobertura total.
41	0,10-0,20	Bosque caducifolio: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20 % de la cobertura vegetal total. Más del 75 % de las especies de árboles pierden follaje simultáneamente en respuesta al cambio estacional.
42	0,80-0,16	Bosque perennifolio: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20 % de la cobertura vegetal total. Más del 75 % de las especies arbóreas mantienen sus hojas durante todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
43	0,08-0,20	Bosque mixto: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20 % de la cobertura vegetal total. Ni las especies de hoja caduca ni las de hoja perenne superan el 75 % de la cubierta arbórea total.
51	0,025-0,05	Matorral enano: solo áreas de Alaska dominadas por arbustos de menos de 20 centímetros de altura, con dosel arbustivo típicamente mayor del 20 % de la vegetación total. Este tipo a menudo se asocia con pastos, juncias, hierbas y vegetación no vascular.
52	0,07-0,16	Arbustos/Matorrales: áreas dominadas por arbustos; Menos de 5 metros de altura con dosel arbustivo típicamente mayor del 20 % de la vegetación total. Esta clase incluye arbustos verdaderos, árboles jóvenes en una etapa de sucesión temprana o árboles atrofiados debido a las condiciones ambientales.
71	0,025-0,05	Pastizales/herbáceos: áreas dominadas por vegetación gramanoide o herbácea, generalmente

		superior al 80 % de la vegetación total. Estas áreas no están sujetas a un manejo intensivo como la labranza, pero pueden ser utilizadas para el pastoreo.
72	0,025-0,05	Juncia/Herbácea: solo áreas de Alaska dominadas por juncos y hierbas, generalmente más del 80 % de la vegetación total. Este tipo puede ocurrir con otros pastos significativos u otras plantas similares al césped, e incluye la tundra de juncos y la tundra de juncos.
73	N/A	Líquenes: Alaska solo áreas dominadas por líquenes fruticosos o foliosos, generalmente más del 80 % de la vegetación total.
74	N/A	Musgo: Alaska solo áreas dominadas por musgos, generalmente más del 80% de la vegetación total.
81	0,020-0,05	Pastos/heno: áreas de pastos, leguminosas o mezclas de gramíneas y leguminosas plantadas para el pastoreo de ganado o la producción de semillas o cultivos de heno, generalmente en un ciclo perenne. La vegetación de pastos/heno representa más del 20 % de la vegetación total.
82	0,020-0,05	Cultivos agrícolas: áreas utilizadas para la producción de cultivos anuales, como maíz, soja, hortalizas, tabaco y algodón, y también cultivos leñosos perennes como huertos y viñedos. La vegetación de cultivo representa más del 20 % de la vegetación total. Esta clase también incluye todas las tierras que se cultivan activamente.
90	0,045-0,15	Humedales leñosos: áreas donde la vegetación forestal o de arbustos representa más del 20% de la cubierta vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente de agua.
95	0,05-0,085	Humedales herbáceos emergentes: áreas donde la vegetación herbácea perenne representa más del 80% de la cobertura vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente con agua.
<p>NOTA</p> <p>El texto se ha traducido del documento original siguiendo los principios establecidos en la norma ISO/IEC, con adaptaciones para el idioma español.</p> <p>FUENTE: HEC, 2025)</p> <p>Clave n Valores de Manning</p>		

Los valores **n** de Manning son una adaptación de Chow (1959), excluyendo el tipo de tierra “desarrollada”. Estos valores **n** son para profundidades apreciables de flujo y no están destinados a flujo superficial



(y pueden no ser apropiados para cálculos de lluvia en malla). Los valores n de Manning de flujo superficial y superficial son generalmente mucho más altos, debido a la rugosidad relativa más alta en comparación con las profundidades de flujo más altas (HEC, 2025).

3.3 Marco conceptual

a) Calentamiento Global

El calentamiento global se refiere a un fenómeno generado por el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, siendo las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación, las responsables de este aumento. Este aumento en la concentración de gases de efecto invernadero provoca un incremento en la temperatura promedio de la tierra, lo cual tiene consecuencias negativas para el clima, ecosistemas y la biodiversidad. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), el calentamiento global es uno de los mayores desafíos ambientales y socioeconómicos de nuestro tiempo, y sus impactos ya se están sintiendo en todo el mundo (MAHESHWARI, et al., 2024).

“Una de las principales influencias del calentamiento global es que las fuertes lluvias pueden intensificarse a medida que los vapores de agua atmosféricos aumentan a una tasa de ~ 7 % por grado de calentamiento según la relación termodinámica Clausius-Clapeyron (CC)” (ZHAO, et al., 2022).

b) Hidrología

Ciencia que estudia el ciclo del agua y su evolución sobre la superficie de la tierra y bajo el suelo, constituyendo una de las ramas principales el análisis del volumen hídrico de una región determinada y su distribución en el espacio y en el tiempo (FRANQUET, 2003).

c) Hidráulica

Es la parte de la mecánica de los fluidos que estudia el equilibrio (hidrostática) y el movimiento o flujo (hidrodinámica) de los líquidos. Mediante la hidráulica se estudian principalmente los flujos de agua dirigidos y limitados por las paredes resistentes, es decir, corrientes en conducciones libres o abiertas y cerradas o a presión (FRANQUET, 2003).



d) Lluvia

“La lluvia es una precipitación de agua en forma de gotas que caen con una velocidad y de modo continuo. Según el tamaño de las gotas se clasifica en llovizna y lluvia” (INDECI, 2020). “Se clasifican por su intensidad en: Fuertes (entre 15 mm/h a 30 mm/h); muy fuertes (entre 30 mm/h a 60 mm/h) ; y torrenciales (por encima de 60 mm/h)” (INAMHI, 1999).

La lluvia es un fenómeno meteorológico que genera precipitación líquida originada por la combinación de vapor de agua y el cambio de masa de aire existentes en la troposfera (capa más baja de la atmósfera). Se forma debido a la coalescencia de microgotas de agua que van creciendo de tamaño hasta que no son capaces de mantenerse en suspensión y, por propia gravedad, acaban cayendo sobre la superficie terrestre (CANARIA, [sin fecha]).

e) Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. Se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora. Las disminuciones de tasa hacen que el suelo se sature. Si la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración, se producirá escorrentía a menos que haya alguna barrera física (ÚBIDA y DELGADO, 2018).

“Durante eventos de lluvia, el agua se infiltra en el perfil del suelo reduciendo inicialmente la succión y posteriormente aumentando la presión de poros” (ARISTIZÁBAL, et al., 2022) “Las fallas en taludes durante periodos prolongados de infiltración, son atribuidas al avance del humedecimiento dentro del cuerpo de talud” (MORA y ROJAS, 2012).

La infiltración del agua en el suelo es un proceso importante del ciclo del agua en los ecosistemas terrestres, debido a que este influye en el balance hídrico de la vegetación, la pérdida potencial de la capa superior del suelo por erosión. La capacidad de infiltración del suelo está influida por las características del suelo, las estructuras, los factores químicos y los factores biológicos (GARATE-QUISPE, et al., 2022).



f) Deslizamiento

“Los deslizamientos de tierra son fenómenos complejos, juegan un papel importante en la evolución del relieve” (MORENO, 2022). “Un deslizamiento es el desplazamiento de las rocas que conforman una ladera, bajo la influencia combinada de la gravedad y saturación acuosa (por infiltraciones pluviales subterráneos o de riego) siguiendo planos de debilidad” (VILLACORTA y VALDERRAMA, 2012).

Un deslizamiento es la ruptura y desplazamiento de pequeñas o grandes masas de suelos, rocas, rellenos artificiales o combinación de éstos, en talud natural o artificial. Se caracteriza por presentar necesariamente un plano de deslizamiento o falla, a lo largo del cual se produce el movimiento que puede ser lento o violento y por la presencia de: lluvias torrenciales, vibraciones y explosiones, actividad sísmica, excavaciones y construcciones al pie de quebrada (Cia. MINERA PODEROSA, 2019).

Los deslizamientos o movimientos en masa no son iguales en todos los casos, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan. Una de ellas son los **flujos de lodo** que se forman en el momento en que la tierra y la vegetación son debilitadas considerablemente por el agua, alcanzando gran fuerza cuando la intensidad de las lluvias y su duración es larga (SNET, [sin fecha]).

g) Huaico

“Un huaico es un alud de lodo y piedras que se produce en las laderas de los cerros durante la temporada de lluvias intensas. Estos deslizamientos pueden causar graves daños en zonas habitadas y cultivos” (SONCCO, 2015). “Llamado también *lloclla* en idioma quechua, es un tipo de aluvión de magnitudes ligeras o moderadas, que se registra con frecuencia en las cuencas hidrográficas del país, generalmente en periodo de lluvias” (RODRIGUEZ, [sin fecha]). “Un aluvión es una violenta corriente de lodo que transporta de manera rápida rocas de gran tamaño y arrasa todo a su paso” (Gob.pe [sin fecha]).

h) Quebrada

Es un paso estrecho y abrupto entre montañas. Su origen puede encontrarse en la acción del discurrir de las aguas en el transcurso del tiempo o por actividad



tectónica. Según informa el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (**Senamhi**), la activación de una quebrada o huaico es un fenómeno que se origina a consecuencia de tres condiciones principales: presencia de lluvias intensas que humedecen los suelos, pendientes pronunciadas y rocas o piedras en la zona (EL DIARIO COMERCIO, 2023).

Una quebrada es una formación natural que se parece a un canal angosto y profundo, con paredes muy empinadas. Se forma cuando el agua, ya sea de ríos o arroyos, va desgastando poco a poco el terreno en zonas montañosas. Son bastante comunes en regiones con paisajes irregulares y pendientes pronunciadas.

i) Reología

La reología es la ciencia de la deformación de los materiales. El nombre fue acuñado por Eugene Bingham, quien fundó la Sociedad de Reología en los EE. UU., y su raíz se encuentra en la palabra griega para flujo. Incluye la teoría 'subyacente' a la deformación y la práctica de la medición. Las herramientas de corrección ortográfica a menudo intentan cambiar el término a 'teología': aquellos que trabajan en el campo se describen a sí mismos como reólogos (WILSON, 2018).

j) Flujo permanente

“El flujo es permanente cuando en una sección del canal permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.)” (SIERRA, 2022).

k) Flujo no permanente

Un flujo no permanente o no estacionario en una sección del canal no permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad, tirante, etc.). El movimiento del agua en la naturaleza presenta normalmente una variación del caudal de paso con el tiempo, en particular en los episodios de avenidas (SIERRA, 2022).

l) Flujo de escombros

El término de huaico se emplea comúnmente para describir los flujos de escombros que son movilizaciones en masa de materiales saturados de suelos



predominantemente de grano grueso que fluyen rápidamente por taludes escarpados. Ocurren en áreas con relieves topográficos pronunciados y precipitación alta. La granulometría varía en tamaño desde arcillas hasta bolones que pueden ser mayores a los 5 m (LUQUE y ALVA, [sin fecha]).

Los flujos de escombros suelen estar compuestos en su mayoría por material sólido, con una proporción de hasta un 60 % a 80 % de partículas gruesas, como rocas, grava, y bloques de gran tamaño. El contenido de agua es relativamente bajo, generalmente entre un 20% y 40%, lo que hace que el flujo sea menos viscoso y, en muchos casos, más rápido. Esta combinación de alta densidad de sólidos y bajo contenido de agua contribuye a su velocidad y capacidad destructiva.

m) Flujo de detritos

Los flujos de detritos se refieren a cualquier mezcla de partículas en agua que fluye, donde las partículas pueden variar desde sedimentos hasta rocas. Lo que distingue a los flujos de detritos de las caídas de rocas y los procesos secos es que el agua tiene una influencia sustancial dinámica. El sedimento suspendido aumenta la viscosidad efectiva del agua, por lo que los flujos de detritos también tienen algunas características de las corrientes de gravedad viscosas (TURNBULL, et al., 2015).

“La identificación de una reología apropiada ha sido considerada durante mucho tiempo como la clave para la interpretación, modelado y predicción exitosos del comportamiento de los flujos de detritos” (IVERSON, 2003).

Los flujos de detritos suelen tener una gran cantidad de partículas pequeñas, como arena, limo y arcilla, y también contienen más agua en comparación con los materiales sólidos. Debido a esto, suelen moverse lentamente, ya que el agua y las partículas finas hacen que el flujo sea muy espeso y viscoso.

n) Flujo de lodos

También conocido como alud de barro, este fenómeno consiste en el rápido descenso por pendientes de una mezcla de agua con sedimentos finos como arcilla, limo y arena. Su consistencia puede variar desde una masa densa y pegajosa hasta una corriente más fluida. Generalmente, estos deslizamientos se generan tras lluvias intensas.



El comportamiento del flujo de lodo es similar a un flujo viscoso, cuya resistencia a fluir varía con la rapidez de deformación del material. Prácticamente, esto se puede traducir como: “A mayor velocidad del flujo se presenta mayor resistencia”. La propiedad que influye en este comportamiento es la viscosidad (SALGADO, 2007).

ñ) Desastre natural

Los desastres naturales se definen como procesos naturales que se producen en los ecosistemas, que pueden originar inestabilidad dentro de los sistemas sociales y económicos. Puede establecerse una tipología de los desastres de acuerdo a su origen y características, pudiendo dividirse en seis categorías: geológicos, meteorológicos, ambientales, contaminantes, incendios, marinos y biológicos (GARGANTILLA y PÉREZ, 2025).

“Hoy en día los desastres naturales que se presentan en todo el mundo no dejan lugar a duda de que el cambio climático tendrá severas consecuencias en el sistema de seguridad social de cada país” (MENDIZÁBAL, 2015).

Los desastres naturales son eventos que ocurren cuando la fuerza de la naturaleza se desata de forma intensa y, muchas veces, sin previo aviso. Pueden manifestarse como terremotos, huracanes, inundaciones, sequías, avalanchas, lluvias muy fuertes o incluso tsunamis. Cuando suceden, suelen dejar a su paso grandes daños: afectan a las personas, destruyen viviendas, carreteras y servicios básicos, y también causan un fuerte impacto en la naturaleza. Son situaciones difíciles, que obligan a actuar con rapidez para salvar vidas y, después, trabajar durante mucho tiempo para reconstruir todo lo que se perdió.

o) Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas del relieve de la tierra. Además de tratar la configuración general de la superficie terrestre, estudia la clasificación, descripción, naturaleza, origen y desarrollo de las formas del terreno y sus relaciones con las estructuras geológicas subyacentes, así como la historia de los cambios geológicos registrados por esas superficies (Instituto Geográfico Nacional, 2015).



p) Inteligencia artificial

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de la informática que se enfoca en la creación de programas de computadora que pueden realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el reconocimiento de patrones, el aprendizaje y la toma de decisiones. La IA abarca una amplia variedad de aplicaciones, como el procesamiento del lenguaje natural, la visión por computadora, la robótica y los sistemas expertos (RUSSELL y NORVING, 2008).

q) Pendiente

Se entiende por pendiente de un terreno en general a su inclinación respecto a la horizontal, puede ser ascendente o descendente según el punto de observación. Si el terreno es horizontal su pendiente es cero. La forma más usual de expresar la pendiente es en tanto por ciento (%) indicando el número, la diferencia de nivel existente por cada 100 unidades. Si la dirección es el inicio de la obra hasta el final de la obra, subiendo, será positiva y la inversa negativa, expresada en +% o -% (GÁMEZ, 2015 .MACHADO, 2022).

r) Geología

Es la ciencia que persigue la comprensión del planeta tierra. La ciencia de la geología se ha dividido tradicionalmente en dos amplias áreas: La física y la histórica. La geología física, estudia los materiales que componen la tierra y busca comprender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre. El objetivo de la geología histórica es comprender el origen de la tierra y su evolución a lo largo del tiempo (TARBUCK y FREDERICK, 2005).

s) Erosión

“La erosión (proceso que desgasta la tierra)” (TARBUCK y FREDERICK, 2005).

La erosión del suelo es un proceso importante de degradación de la tierra, que amenaza la sostenibilidad agrícola mundial y el ciclo del carbono. Las intervenciones humanas y las modificaciones de la superficie terrestre desde que las actividades humanas se han generalizado han dado como resultado una erosión acelerada del suelo mucho mayor que en el pasado geológico. El uso de la tierra y los cambios en la cobertura vegetal inducidos por el ser humano son



factores bien reconocidos de la erosión del suelo (LI et al. 2024).

t) Sismo

El sismo es un movimiento originado por fenómenos geológicos o causa artificiales, en un punto de la corteza terrestre, que se propaga en forma de ondas concéntricas a dicho punto, haciendo oscilar la superficie en diferentes direcciones. Cuando sobrepasan un determinado nivel de intensidad y ocasionan daño reciben el nombre de terremotos y cuando solo alcanzan a ser percibidos toman la denominación de temblores (Colombiana Cruz Roja [sin fecha]).

La teoría de la tectónica de placas ayuda a comprender el porqué del movimiento relativo entre ellas; también, cómo esa gran deformación y fueras de fricción se originan en la fronteras de la corteza. Esto provoca que el material del que están constituidos las placas finalmente se fracture y provoque, en la mayoría de casos, desplazamientos súbitos o perturbaciones, lo cual constituye la antesala de lo que en la superficie terrestre se conoce como sismo (ESPÍNDOLA y PÉREZ, 2018).



CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

Esta investigación se plantea como una investigación aplicada, porque nace de la necesidad de comprender un problema real que afecta directamente a la comunidad: el posible deslizamiento del cerro Chuyllurpata y las consecuencias que podría generar en Tamburco – Abancay. Se trata de una investigación descriptiva y explicativa: descriptiva, porque busca detallar cómo es el cerro en términos geológicos, geomorfológicos, climáticos y antrópicos, con el fin de comprender sus características actuales. Explicativa, ya que se enfoca en identificar las causas que podrían favorecer un deslizamiento y en analizar las posibles repercusiones para la población, las viviendas y el entorno urbano.

En cuanto al nivel de investigación es descriptivo, explicativo y predictivo. Descriptivo, en esta etapa lo que se busca es entender cómo está la situación en este momento: cómo es el fenómeno, cómo es el entorno y que condiciones presenta. Explicativo, en este nivel la intención es entender por qué ocurre el problema: qué lo origina y cuáles son los factores que lo están detonando. Predictivo porque se utilizaron herramientas informáticas y software especializados para estimar la probabilidad de ocurrencia de futuros deslizamientos, así como para proyectar las zonas que podrían verse afectadas.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental de corte transeccional (o transversal). Este enfoque permite describir y explicar la situación tal como se encuentra en un momento específico, y además proyectar posibles escenarios o consecuencias a futuro.

4.2.1 Diseño general

- a) **Investigación mixta:** Se combinaron enfoques cuantitativos y cualitativos para lograr una comprensión integral del problema. Por un lado, se aplicaron métodos cuantitativos para medir y modelar el riesgo de deslizamiento del cerro, así como para estimar sus posibles consecuencias. Por otro lado, los métodos cualitativos permitieron conocer, desde la perspectiva de la propia



población afectada, cómo viven esta amenaza, qué percepciones tienen sobre el riesgo y cómo enfrentan sus posibles impactos.

- b) Investigación descriptiva – explicativa:** Se realizó una descripción detallada del estado actual del cerro Chuyllurpata y de la vulnerabilidad que presenta la zona circundante. A partir de esta base, se identificaron y analizaron las causas que podrían generar un eventual desplazamiento del cerro, así como las consecuencias que ello traería para la comunidad y el entorno.
- c) Investigación de campo:** El estudio se desarrolló directamente en el lugar de los hechos. Para ello, se efectuaron trabajos en terreno que incluyeron la recolección de datos geológicos, geotécnicos y topográficos, con el fin de contar con información precisa y actualizada sobre las condiciones físicas del cerro y su entorno.

4.2.2 Componentes específicos

- a) Recopilación de información geográfica:** Para comprender con precisión las características del terreno, se emplearon Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permitieron recolectar, analizar y representar datos espaciales de manera detallada. Además, se utilizaron imágenes satelitales, específicamente modelos digitales de superficie (DSM), que ofrecen una visión tridimensional del relieve y ayudan a identificar zonas vulnerables o de interés.
- b) Evaluación del riesgo de avance:**
- **Análisis geológico y geotécnico:** Se llevó a cabo un estudio detallado del cerro Chuyllurpata, evaluando su litología, estructura geológica y condiciones de estabilidad. Se analizó la resistencia del suelo y la roca, así como la inclinación de las pendientes y las posibles deformaciones del terreno que puedan indicar movimientos inminentes.
 - **Modelado del deslizamiento:** Mediante el software especializado HEC-RAS (versión 6.7), se simuló el comportamiento del posible deslizamiento. Esta herramienta permite generar mapas de riesgo y establecer distintos escenarios de impacto para anticipar las consecuencias en caso de que el evento se produzca.



- **Análisis hidrológico:** Se tomó en consideración las precipitaciones históricas en la zona y se evaluó su efecto sobre la estabilidad del cerro Chuyllurpata. También se analizó el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas, ya que estas pueden contribuir a la saturación del suelo y al debilitamiento de las laderas.

La razón por la que no se utilizaron piezómetros en la investigación del cerro Chuyllurpata y la quebrada Sahuanay para calcular gradientes hidráulicos o entender la dirección y la velocidad del flujo subterráneo, es que estos estudios estuvieron centrados por completo en analizar y modelar los movimientos en masa y los flujos de detritos (huaicos) que ocurren en superficie. Estos fenómenos suelen activarse por las lluvias muy intensas y por las propias características geomorfológicas e hidrológicas de la microcuenca

c) Evaluación de las consecuencias:

- **Consecuencias que generaría el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay, Tamburco – Abancay, 2024:**

Se analizan las posibles repercusiones de un eventual deslizamiento del cerro Chuyllurpata sobre la quebrada Sahuanay, ubicada en el distrito de Tamburco, provincia de Abancay. Este análisis incluye la estimación del volumen del deslizamiento considerando tanto el componente sólido como el líquido, la identificación de las áreas potencialmente afectadas, tanto rurales como urbanas, y la proyección del número de personas que podrían verse comprometidas.

- d) Análisis de datos históricos:** Se recopila información sobre antecedentes de deslizamientos en la zona y se analizan patrones históricos de precipitaciones, así como otros factores desencadenantes. Este enfoque permite entender la recurrencia del fenómeno y mejorar la capacidad predictiva ante eventos similares en el futuro.

4.2.3 Consideraciones éticas

- a) El compromiso es cuidar con responsabilidad toda la información personal que se recogió, asegurándonos de que no sean identificados las personas participantes. La confidencialidad y el anonimato son fundamentales en cada



etapa del proceso.

- b) Una vez finalizada la investigación, informaremos los resultados de manera sencilla, transparente y comprensible para todas las personas afectadas. Nuestro objetivo es que la comunidad entienda lo que se ha encontrado y pueda tomar decisiones informadas.

4.2.4 Productos esperados

- a) Un mapa que muestre con claridad cuáles son las partes del cerro Chuyllurpata más vulnerables a un posible deslizamiento, para así facilitar una mejor planeación y ayudar a tomar decisiones más acertadas.
- b) Informe técnico con la evaluación de las consecuencias del deslizamiento del cerro Chuyllurpata.
- c) Un análisis detallado de los posibles impactos que podría generar un deslizamiento en la zona, incluyendo efectos en la población, infraestructura, medio ambiente.
- d) Recomendaciones prácticas y estratégicas orientadas a reducir la probabilidad de deslizamientos y minimizar sus efectos en caso de que ocurran, considerando tanto acciones estructurales como no estructurales.

4.3 Descripción ética de la investigación

Esta investigación requiere una sólida base ética debido a su impacto potencial en la comunidad. Aquí algunos aspectos a considerar:

4.3.1 Protección de participantes

- a) Consentimiento informado: Antes de comenzar con la investigación, nos aseguramos de conversar abierta y claramente con todas las personas involucradas. Les explicamos con detalle cuál era el propósito del estudio, qué beneficios y posibles riesgos podrían surgir, y recalcamos que su participación era totalmente voluntaria. En todo momento respetamos su decisión de participar (o no), y cuidamos especialmente la privacidad de sus datos, sobre todo aquellos que pudieran considerarse sensibles.



- b) No causar daño: Uno de nuestros principios fundamentales fue no poner en riesgo la seguridad ni el bienestar de la comunidad. Por eso, actuamos con mucha responsabilidad al manejar la información, evitando difundir datos que pudieran generar alarma innecesaria. También fuimos muy conscientes de no aprovechar la situación de vulnerabilidad que atraviesan quienes viven con el riesgo de deslizamientos, buscando siempre un enfoque ético, respetuoso y empático.

4.3.2 Integridad y objetividad

- a) Transparencia: Se actuó con total honestidad desde el inicio. Se explica con claridad cómo llevó a cabo su trabajo, qué métodos usó y de dónde obtuvo la información. Los resultados se comparten tal como son, sin maquillarlos, exagerarlos ni restarles importancia.
- b) Evitar conflicto de intereses: Se identificó y se manejó con cuidado todas aquellas situaciones que podrían afectar la objetividad del estudio. Se aseguró de mantener su independencia y tomar decisiones imparciales durante todo el proceso, especialmente al recolectar y analizar los datos. La idea es que los resultados reflejen la realidad, sin influencias externas.

4.3.3 Responsabilidad social

- a) Beneficio para la comunidad: Esta investigación tiene como propósito principal aportar al bienestar colectivo. Buscamos generar conocimientos que ayuden a prevenir desastres y proteger a la comunidad. Además, nos comprometemos a socializar los resultados de manera clara y sencilla, para que tanto las autoridades locales como la población puedan comprenderlos y utilizarlos en su día a día.
- b) Colaboración con la comunidad: Creemos firmemente en trabajar de la mano con la comunidad. Por eso, se involucró desde el inicio del proceso, identificando juntos los problemas, participando en la investigación y ayudando a difundir los resultados. Fomentaremos un diálogo abierto y constante con autoridades locales, organizaciones sociales y líderes vecinales para construir soluciones colectivas y sostenibles.



- c) Consideraciones específicas: Coordinaremos activamente con instituciones clave como el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), garantizando que los datos obtenidos se compartan de forma adecuada y útil. Nuestro objetivo es que esta información sirva como base sólida para la toma de decisiones responsables que beneficien a todos.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población está conformada por las zonas potencialmente propensas a deslizamientos y movimiento en masa, en la expansión urbana del distrito de Tamburco – Abancay.

4.4.2 Muestra

La muestra para el presente estudio es el cerro Chuyllurpata y la quebrada Sahuanay. El número se determinó mediante la técnica de muestreo no probabilístico que se caracteriza por la selección intencional de los elementos de la muestra por parte del investigador, basándose en su juicio y conocimiento, en lugar de utilizar métodos aleatorios.

4.5 Procedimiento

4.5.1 Fase de planificación y preparación

- a) Revisión bibliográfica: se ha realizado estudios previos los eventos de deslizamiento suscitados en el distrito de Tamburco, provincia de Abancay; se recopiló información sobre las características geológicas y geotécnicas del área; se revisó investigaciones anteriores realizadas en la zona.

4.5.2 Metodología

- a) Estudio geológico y geotécnico: mapeo geológico; análisis de la composición del suelo y la roca; uso de imágenes satelitales.
- b) Evaluación de la estabilidad del cerro: efecto de las lluvias.
- c) Análisis de consecuencias: áreas vulnerables y la población en riesgo; impactos en la infraestructura, viviendas y actividades económicas.



4.5.3 Trabajo de campo

Delimitación de la zona de estudio, levantamiento topográfico, se recopiló datos sobre las condiciones del terreno, presencia de agua y otros indicadores de inestabilidad.

4.5.4 Análisis de datos

Procesar y analizar los datos recopilados en el trabajo de campo y la revisión bibliográfica. Se utilizó la Inteligencia Artificial (AI) a través del uso de softwares AutoCAD v.2020, ArcGIS Pro v.3, HEC – RAS v.6.7 e imagen satelital DSM; HEC – RAS v.6.7 software especializado para procesar y realizar el análisis de datos. Se elaboró mapas de riesgo y vulnerabilidad.

4.5.5 Resultados y conclusiones

- a) El análisis realizado en el área del cerro Chuyllurpata ha permitido identificar diversas causas que podrían desencadenar un deslizamiento. Entre las más relevantes se encuentran la pendiente pronunciada del terreno, la presencia de suelos poco consolidados y materiales geológicamente inestables, así como la constante intervención humana en la zona (como construcciones y deforestación). Además, las lluvias intensas que suelen presentarse en la región durante ciertas épocas del año aumentan la saturación del suelo, reduciendo su cohesión y favoreciendo movimientos en masa.
- b) Si llegara a producirse un deslizamiento en el cerro Chuyllurpata, las consecuencias serían significativas para la quebrada Sahuanay, zona urbana (Tamburco, Abancay) adyacente al curso del huaico y sus alrededores. Se podría afectar directamente a viviendas, vías de comunicación y servicios básicos, poniendo en riesgo la seguridad de la población. Además, el material desplazado podría obstruir la quebrada, generando represamientos o desbordes que agravarían el impacto. El daño ambiental también sería considerable, alterando el ecosistema local y la estabilidad del terreno a mediano y largo plazo.

4.6 Técnica e instrumentos

Los datos se tomaron en campo y luego fueron procesados en gabinete y los instrumentos utilizados fueron:



- ✓ GPS navegador
- ✓ Dron
- ✓ Softwares
- ✓ Winchas
- ✓ Tableros
- ✓ Carpas
- ✓ Eclímetro
- ✓ Brújula
- ✓ Softwares: AutoCAD v.2020, ArcGIS Pro v.3, HEC – RAS v.6.7, Excel.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

5.1.1 Caracterización del potencial deslizamiento en el cerro Chuyllurpata y sus implicaciones.

5.1.1.1 Ubicación

La zona de investigación cerro Chuyllurpata – quebrada Sahuanay, pertenece al distrito de Tamburco, provincia de Abancay, región Apurímac. Esta se encuentra ubicada en latitud $13^{\circ}35'52,25''$ Sur, longitud $72^{\circ}52'46,43''$ Oeste, a una altitud de 3212 m.s.n.m., al norte de la provincia de Abancay y la región de Apurímac que se encuentra al sur de Perú, como se aprecia en la figura 7.

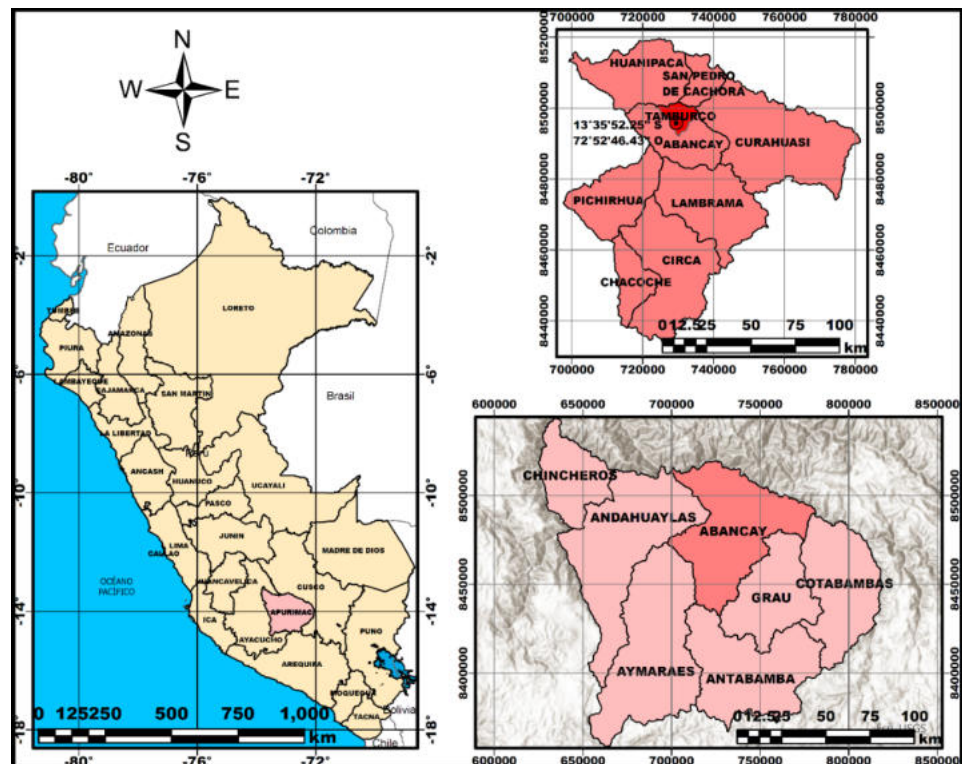


Figura 7 – Plano de ubicación cerro Chuyllurpata



5.1.1.2 Causas que generan el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata, Tamburco – Abancay

Para determinar las causas que generan el deslizamiento del cerro Chuyllurpata se ha realizado el levantamiento topográfico de la zona potencial de influencia (Fig. 8) ubicando las grietas generadas y el punto de inicio del deslizamiento del año 1950 y 2012, en un área de 888 ha.

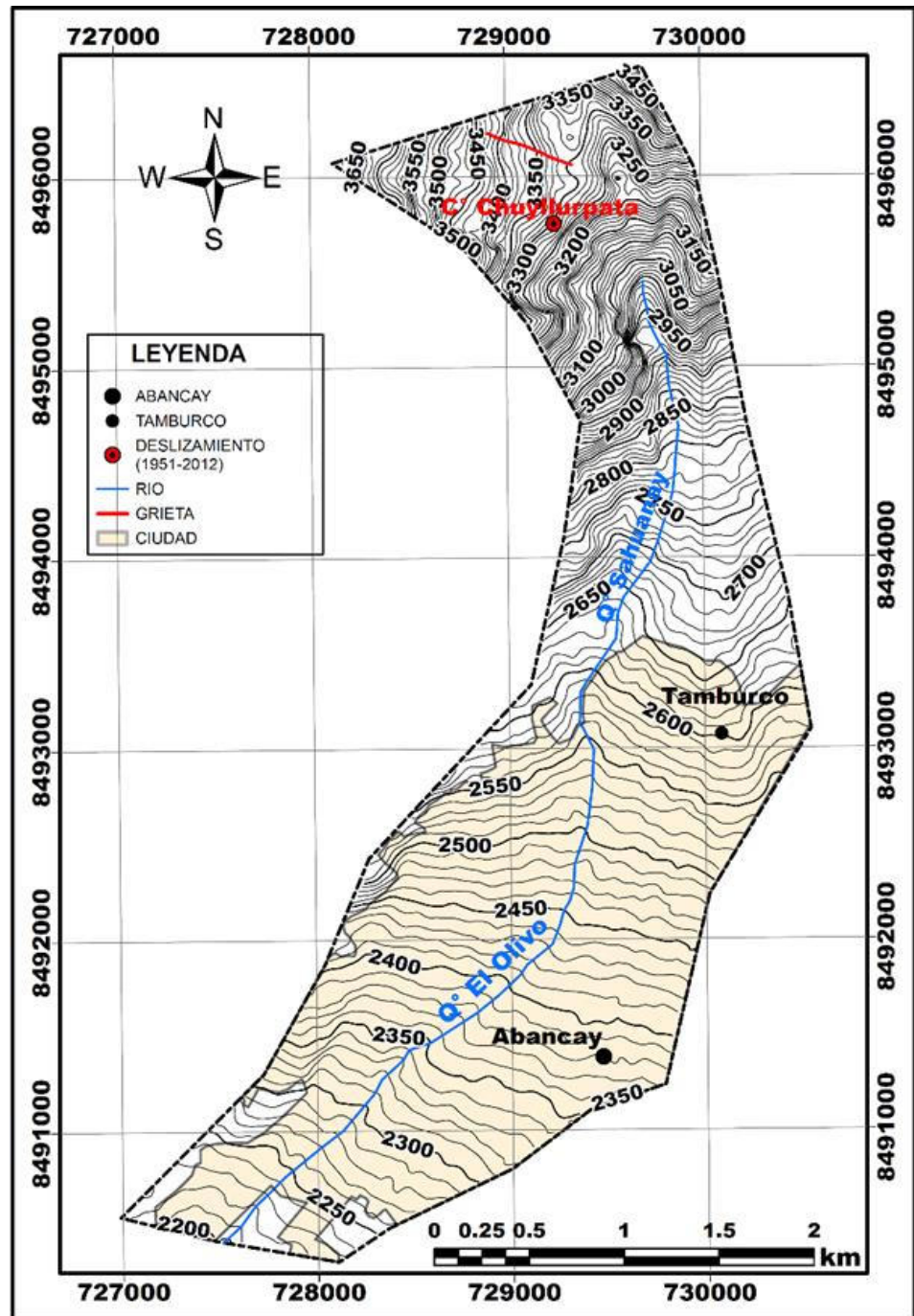


Figura 8 – Delimitación y topografía de la zona potencial del influencia del deslizamiento del cerro Chuyllurpata

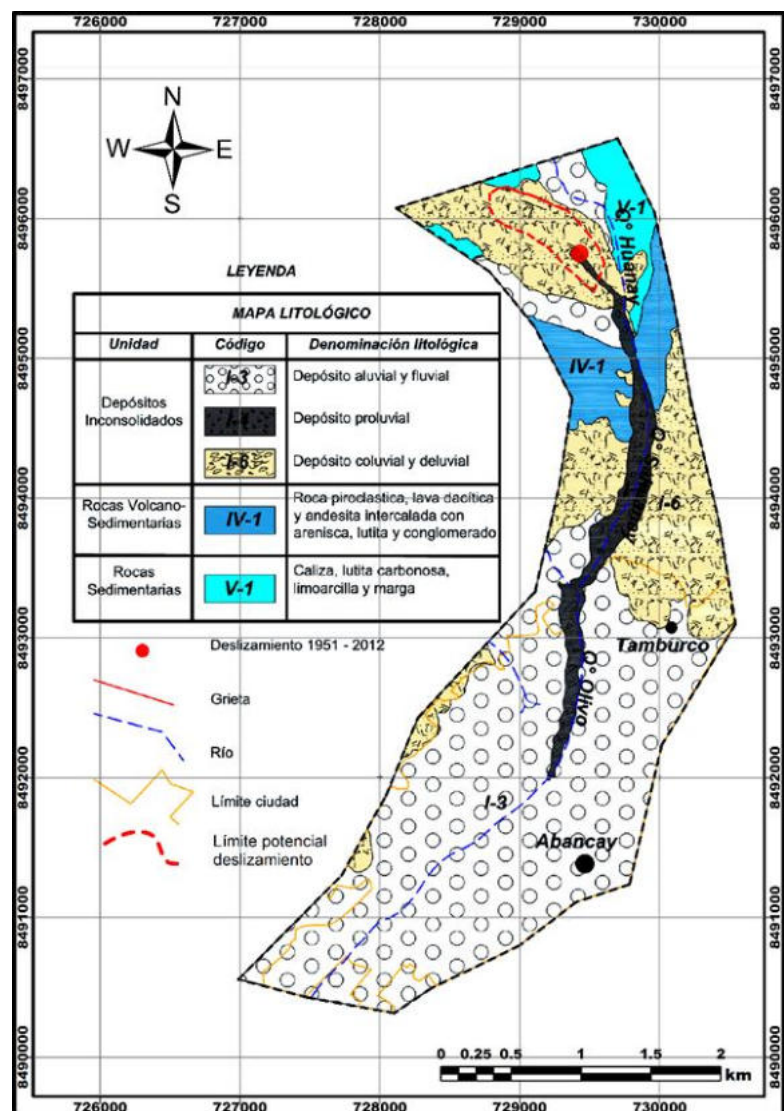
5.1.1.2.1 Aspectos geológicos

Las condiciones geológicas y la estratigrafía en la quebrada Sahuanay está enmarcada litológicamente a finales de la era paleozoica con rocas pertenecientes al periodo pérmico (286 a 245 millones de años), representada por la formación Copacabana, seguida por la formación Mitu, rocas sedimentarias marinas y continentales; la mayor cantidad de condiciones inestables se concentran en las zonas del cuaternario, formado principalmente por tectonismo y eventos geodinámicos de gran magnitud (DÍAZ, 2013).

Según los estudios realizados por VILLACORTA, et al. (2019) “con el fin de desarrollar estudios geológicos en la microcuenca del río Mariño que a su vez abarca la zona en estudio (Chuyllurpata – Sahuanay) ha considerado los siguientes aspectos geológicos” (Fig. 9):

Cuaternarios inconsolidados en las laderas de los cerros cercanos a la quebrada Sahuanay se encuentran depósitos de origen reciente, formados por distintos procesos geológicos. Estos se clasifican en: **Depósito aluvial y fluvial**, desde las laderas ubicadas al norte de Abancay, pasando por la zona de Tamburco y dentro de la misma ciudad, se pueden ver acumulaciones de tierra y piedras. Se trata principalmente de gravas de distinta composición, mezcladas con arena y limo. Estos materiales fueron transportados por los huaicos (1951, 2012) y arroyos de la zona, y presentan formas que van desde subredondeadas hasta completamente redondeadas. **Depósito proluvial**, Se localizan en el cauce de la quebrada Sahuanay y en sus afluentes. Están compuestos por fragmentos de roca de distintos tamaños y tipos, con formas angulosas o subangulosas, contenidos en una matriz de arena y limo. Por su naturaleza, podrían activarse nuevamente con eventos extremos como lluvias intensas o sismos. **Depósito**

coluvial y deluvial, los depósitos deluviales provienen de la alteración física y química de las rocas. Están formados por bloques de caliza de distintos tamaños, desde grandes hasta muy pequeños, sin cohesión entre ellos. Son más abundantes en la ladera derecha de la quebrada, donde también se encuentran gravas y bloques con formas que van de subredondeadas a subangulosas, mezcladas en una matriz arcillo-limosa.



FUENTE: VILLACORTA, et al. (2019).

Figura 9 – Mapa litológico de la zona de influencia del deslizamiento del cerro Chuyllurpata

Las rocas vulcano – sedimentarias están asociadas al Grupo Mitu y se localizan en una pequeña área al norte de la zona de estudio. El conjunto está compuesto por rocas piroclásticas, lavas dacíticas y andesitas, las cuales se encuentran intercaladas con capas de arenisca, lutita y conglomerado. Esta combinación sugiere un entorno geológico influenciado tanto por procesos volcánicos como sedimentarios.

Las rocas sedimentarias pertenecientes al grupo Yura, esta formación se encuentra a ambos lados de la quebrada Sahuanay, extendiéndose tanto por su margen derecha como por la izquierda. Está compuesta principalmente por caliza, lutita con contenido de carbono, limo arcilloso y marga.

5.1.1.2.2 Topografía

La topografía que rodea la zona de Chuyllurpata y la quebrada de Sahuanay abarca altitudes que van desde los 2600 hasta los 3350 metros sobre el nivel del mar (ver Fig. 8). En las zonas más altas, el terreno presenta un relieve abrupto, con pendientes pronunciadas (ver Fig. 10) en las laderas cercanas a la quebrada, así como desniveles marcados en el cauce. Estas condiciones favorecen la aparición de procesos geodinámicos activos, los cuales aceleran la erosión y el desprendimiento de rocas en las laderas.

El terreno está conformado principalmente por depósitos fluvio-aluviales, y la zona de desembocadura presenta una forma típica de abanico aluvial. A unos 1000 metros cuesta abajo desde el punto donde ocurrió el deslizamiento en el año 2012, se observan viviendas asentadas en la margen derecha del cauce. Más adelante, en un tramo de aproximadamente 1300 metros hacia la parte baja, existen edificaciones en ambos márgenes, como resultado del crecimiento urbano de la ciudad de Tamburco.

El cauce continúa su trayecto hacia abajo durante unos 4100 metros, atravesando el centro de la ciudad de Abancay. La mayor concentración de población urbana y el desarrollo de nuevas construcciones se encuentran entre los 2200 m.s.n.m. y 2500 m.s.n.m., donde se evidencia una expansión significativa del área urbana.

Las pendientes se clasifican en categorías: suave, moderada, fuerte, muy fuerte y extrema, basados en rangos de porcentaje o grados lo que facilita la interpretación de las características del terreno (Fig. 10). Las pendientes determinadas en la zona de estudio se han clasificado en:

De 0 % a 5 % **suave** que tiene una extensión de 4,32 ha.

De 5 % a 15 % **moderada** que tiene una extensión de 361,38 ha.

De 15 % a 30 % **fuerte** que tiene una extensión de 243,62 ha.

De 30 % a 50 % **muy fuerte** que tiene una extensión de 56,73 ha.

>50 % **extrema** que tiene una extensión de 66,68 ha.

Tomando de referencia la figura 10 la zona de potencial deslizamiento, la pendiente en dicha zona es muy fuerte (30 % a 50 %) y extrema (> 50 %), luego este recorrido tomará una pendiente fuerte y finalmente una pendiente moderada como se aprecia en la figura 10.

Al analizar las pendientes, notamos que hacia el norte el terreno se vuelve bastante abrupto. Las laderas son muy inclinadas y la topografía, bastante irregular, con altitudes que van desde los 2600 m.n.s.m. hasta los 3350 m.s.n.m. Estas condiciones hacen que sea más probable que ocurran deslizamientos de tierra.



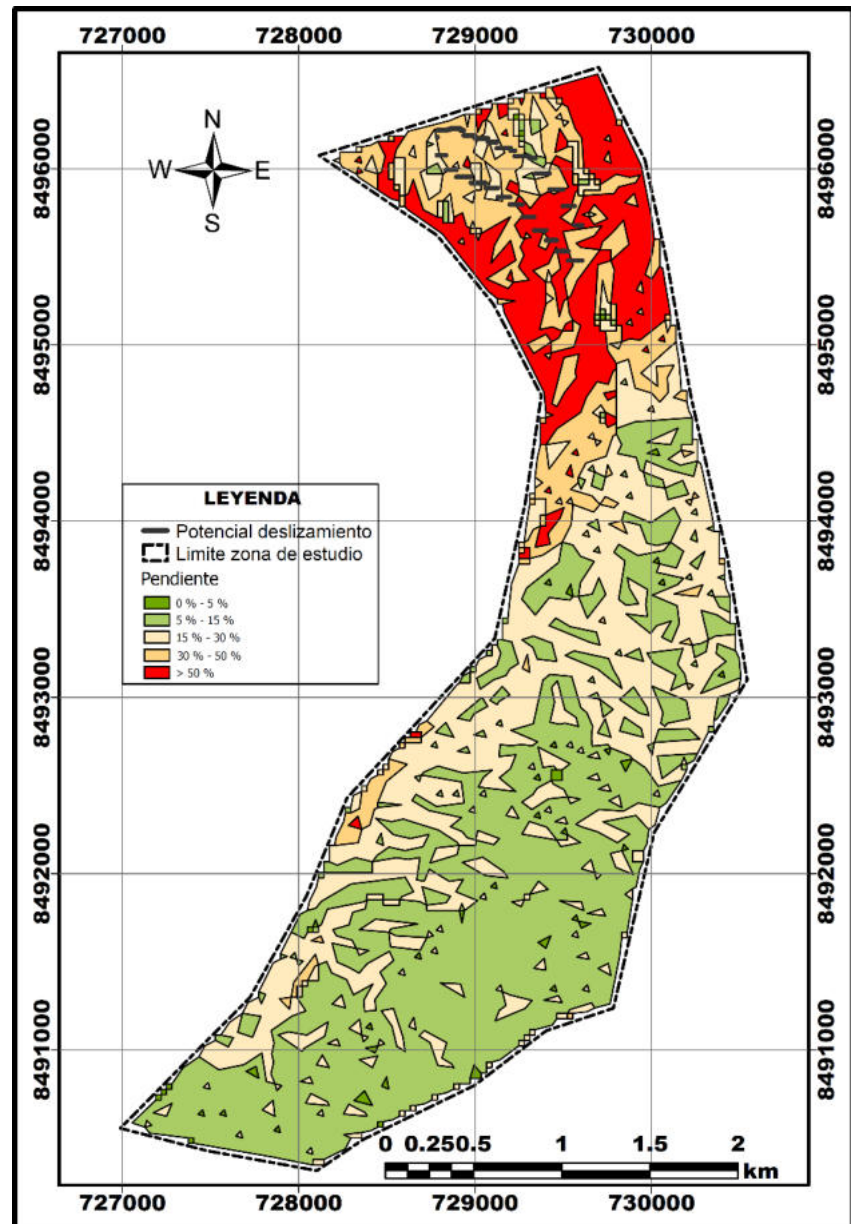


Figura 10 – Mapa de pendiente

5.1.1.2.3 Cobertura vegetal

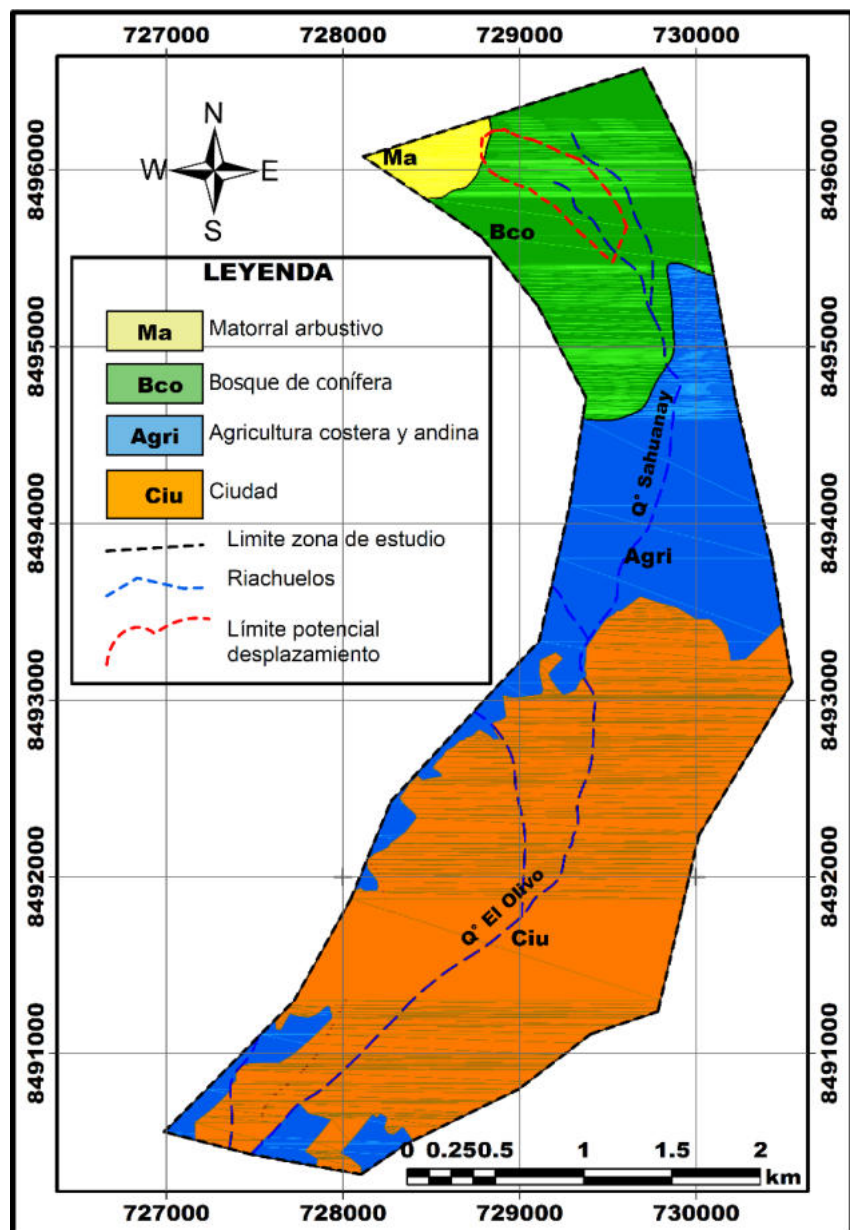
En la zona de estudio predominan distintos tipos de vegetación, entre los que destaca el matorral arbustivo, compuesto principalmente por bosques montanos, con presencia significativa del bosque de intimpa. Estos forman masas boscosas densas que se extienden entre los 3300 m.s.n.m y 3600 m.s.n.m.

A altitudes que van de los 2700 m.s.n.m a los 3300 m.s.n.m., el paisaje cambia y da lugar a una mezcla interesante de especies



adaptadas a estas condiciones, propias del bosque montano bajo y del matorral andino.

Dentro del área analizada, que abarca un total de 403,33 ha, se identificaron tres unidades principales: el matorral arbustivo (Ma), que ocupa el 4,5 % del territorio; el bosque de coníferas (Bco), que representa el 42,75 %; y las zonas destinadas a agricultura costera y andina (Agri), que cubren el 52,75 % restante.



FUENTE: VILLACORTA, et al. (2019).

Figura 11 – Flora microcuenca Sahuayanay

El crecimiento de la población en las ciudades de Tamburco y Abancay ha provocado que más de la mitad del área analizada 54,57 %, como se muestra en la figura 11, quede dentro de la zona en cuestión. Este aumento poblacional ha ocurrido de manera desordenada, sin seguir las directrices de planificación urbana establecidas por las autoridades. En caso de que ocurriera una catástrofe como ya se ha advertido que podría suceder, esta sería la zona más vulnerable.

En el recorrido del río (2931 m.s.n.m.) se aprecia que el bosque de coníferas cubre la quebrada por donde discurre el agua (Fig. 12).

En el caso de ocurrir un crecimiento o deslizamiento de masas estas serían obstruidas por los árboles del bosque e incrementarían el volumen de las masas y como consecuencia el cauce en su recorrido, abarcando más extensiones de terreno.



Figura 12 — Bosque de árboles (coníferas) en el cauce del río en la quebrada Sahuanay



Figura 13 – Prácticas agrícolas en Sahuanay

Entre los 2200 y 2700 m.s.n.m., la vegetación cambia bastante y da paso a lo que se conoce como bosque montano y su transición hacia el bosque montano bajo. La variedad de plantas que crecen en esta zona depende mucho de sucesos como en qué parte de la ladera se encuentren, cuánta humedad hay en el suelo, qué tan cerca están de ríos o manantiales, y otras condiciones del clima local. En buena parte de este rango altitudinal también se practica la agricultura, tanto la típica de la costa como la de zonas más altas, como se muestra en la figura 13.

5.1.1.2.4 Aspectos hidrológicos de la quebrada Sahuanay

La quebrada Sahuanay en su cauce alto nace a unos 3900 m.s.n.m., aunque en las partes más altas de la microcuenca puede alcanzar hasta los 5100 m.s.n.m. Desde su origen, presenta una pendiente bastante pronunciada, lo que provoca que el agua fluya con fuerza y rapidez, generando una intensa capacidad de erosión.

Por esta inclinación tan marcada, el agua arrastra con facilidad rocas, sedimentos y otros materiales sueltos, modificando el terreno a su paso. Conforme la quebrada va descendiendo, la pendiente se suaviza y eso favorece que el material transportado desde las zonas altas comience a depositarse, dando lugar a la

formación de terrazas sedimentarias que pueden inundarse en ciertas épocas.

Por debajo de los 2800 m.s.n.m., el valle se va ensanchando poco a poco por la acción combinada de la erosión y la acumulación de sedimentos. A lo largo del recorrido de la quebrada se han identificado algunos puntos de agua, los cuales parecen estar vinculados a procesos geodinámicos antiguos.

Ya cerca de su desembocadura, en el río Mariño, la pendiente se reduce aún más, lo que hace que la quebrada pierda fuerza para seguir transportando sedimentos. Como resultado, se forma un abanico aluvial, donde el lecho está compuesto por una mezcla de gravas, cantos rodados, arena y algo de limo, producto del arrastre fluvial.

En ciertos tramos, sobre todo los más cercanos a zonas habitadas, la quebrada ha sido canalizada con diversas estructuras (Fig. 14). Sin embargo, algunas de estas obras podrían no estar correctamente diseñadas o ser insuficientes para las condiciones del lugar (Fig. 15).



Figura 14 — Canalización de la quebrada Sahuanay, con estructuras



Figura 15 – Canalización de la quebrada Sahuanay, con estructuras no adecuadas

Por las fuertes pendientes en la parte alta de la quebrada Sahuanay y la presencia de bastante material suelto, existe un riesgo considerable de que se generen huaicos, sobre todo en épocas de lluvias intensas. Estos deslizamientos pueden afectar seriamente las zonas canalizadas con estructuras no adecuadas que se encuentran cerca del tramo bajo del cauce.

5.1.1.2.5 Deslizamiento del cerro Chuyllurpata

El 18 de febrero de 1951, como producto de fuertes precipitaciones pluviales, se produjo un fenómeno de remoción en masa proceso que comprendió depósitos morrénicos, coluviales muy saturados que se movilizaron debido a la sobresaturación generando una avalancha de detritos y posterior flujo del mismo material que se desplazó por la quebrada Sahuanay (Fig. 16) llegando hasta las cercanías de la ciudad de Abancay, afectando a 27 ha de cultivo, al oeste de Tamburco destruyendo viviendas y causando 11 muertos (DAVILA y ZAVALA, 1997).



FUENTE: VALDERRAMA, et al. (2012).

Figura 16 – Vista panorámica de la zona de arranque del flujo de detritos en el cerro Chuyllurpata 2012. En líneas de trazo rojas se indica la escarpa de deslizamiento de 1951

61 años después (año 2012) hubo tres eventos principales: el primero, el 11 de marzo, erosionó la quebrada Sahuanay sin afectar la zona urbana; el segundo, el 17 de marzo, fue de medianas proporciones que también discurrió por la misma quebrada sin causar daños; el tercer evento la más grande ocurrió el 18 de marzo, tuvo una escarpa de 283 m de largo y movilizó cerca de 600000 m³ de material incorporando, material por erosión lateral por la quebrada Sahuanay (Fig. 17). El flujo de detritos, al avanzar por la quebrada Sahuanay, dañó cultivos, sistemas de alcantarillado y vías de transporte vehicular (Fig.18). Al

llegar a Maucacalle, impactó dos viviendas, desviándose hacia el estadio Maucacalle, que al estar en construcción y bajo el nivel del suelo, actuó como depósito de gran parte del material grueso, reduciendo la velocidad y turbulencia del flujo (VALDERRAMA, et al., 2012).



Figura 17 – Pendiente de deslizamiento del evento ocurrido el 18 – 03 – 2012



Figura 18 – Flujo de detritos al avanzar el huaico por la quebrada de Sahuanay (18-03-2012)

En los años 1951 y 2012, en el cerro Chuyllurpata, se registraron eventos que comenzaron como deslizamientos superficiales de tierra. Estos movimientos fueron provocados por la acumulación de agua en los suelos sueltos que recubren la base rocosa del cerro, producto de lluvias muy intensas. Con el paso del tiempo y a medida que arrastraban más agua y materiales en su camino, los deslizamientos se transformaron en huaicos, arrasando todo a su paso.

El cerro Chuyllurpata está formado por capas gruesas de lutitas negras, calizas y areniscas arcósicas con intercalaciones de lutitas rojas de tipo arcilloso. Estas formaciones geológicas datan del período Paleozoico. Toda esta estructura está cubierta por antiguos depósitos de origen coluvial, aluvial y glacial que se han acumulado con el tiempo.

La inestabilidad del terreno se originó por la pérdida de firmeza del material coluvial saturado de agua, lo que desencadenó el primer deslizamiento. A medida que avanzaba ladera abajo, el flujo fue arrastrando más tierra desde los costados de la quebrada Sahuanay, producto de la erosión y pequeños derrumbes. En su camino también sumó troncos de árboles y grandes rocas, lo que hizo que aumentara tanto en volumen como en fuerza destructiva (Fig. 19).



Figura 19 – Flujo que incorporó troncos de árboles y bloques de roca (18-03-2012)

5.1.1.2.6 Impacto del deslizamiento del cerro Chuyllurpata en la quebrada Sahuanay

Los huaicos ocurridos en los años 1951 y 2012 descendieron por la quebrada Sahuanay, siguiendo su cauce natural (Fig. 20). A lo largo de su recorrido, provocaron una fuerte erosión y arrastraron gran cantidad de material, dejando huellas visibles en todo su paso.

Cuando el huaico llegó a la parte baja de la quebrada, cerca de la ciudad de Abancay, golpeó con fuerza las viviendas ubicadas a ambos márgenes del cauce de la quebrada Sahuanay y sobre el cono de deposición. En el año 2012, uno de los lugares más afectados fue el estadio de Maucacalle, donde se acumuló gran parte del material arrastrado. Al alcanzar esta zona más plana, el flujo perdió velocidad y fuerza, convirtiéndose en una especie de inundación de lodo y escombros que se extendió por todo el terreno.

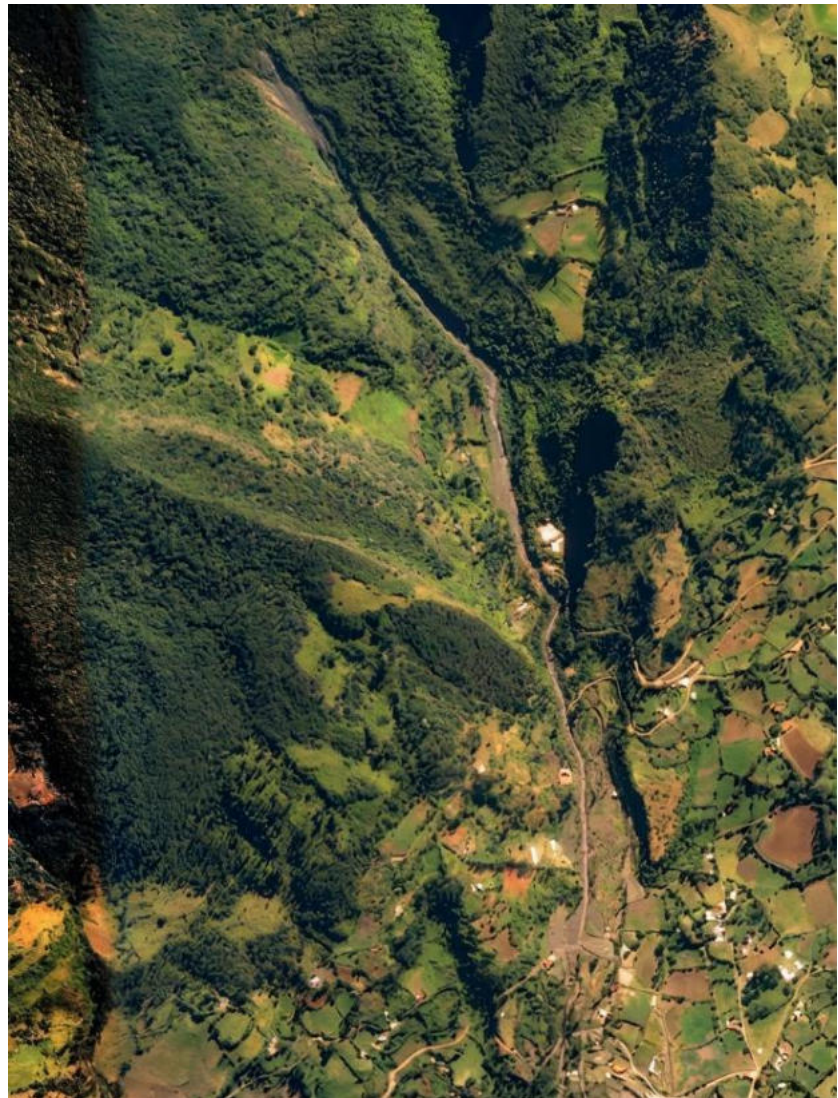
Después del evento ocurrido en el año 2012, se detectó una surgencia de agua en la quebrada Sahuanay, posiblemente vinculada al huaico. Esto indica que el deslizamiento pudo haber alterado el flujo subterráneo del agua en la zona.

El deslizamiento ocurrido en 2012 dejó en evidencia lo vulnerable que es la quebrada Sahuanay a este tipo de huaicos, debido a la combinación de su geología, la forma del terreno y las intensas lluvias que se presentan en la zona. Este hecho resalta la urgencia de implementar acciones preventivas y de mitigación que protejan tanto a la población como a las infraestructuras cercanas.

Lo sucedido en el cerro Chuyllurpata ese año fue un evento de gran impacto. El movimiento comenzó por la inestabilidad de los suelos saturados en la superficie, y al avanzar cuesta abajo por la quebrada Sahuanay (Fig. 20), se transformó en un huaico de gran



fuerza, causando serios daños en las partes bajas. Este evento encendió las alertas sobre el riesgo constante que representan estos fenómenos en la región.



FUENTE: Google Earth Pro (2014).

Figura 20 — Huaico en los años 1951 – 2012 siguieron su cauce natural

5.1.2 Causas potenciales de deslizamientos futuros en el cerro Chuyllurpata

Los futuros deslizamientos en el cerro Chuyllurpata podrían deberse a una mezcla de varios factores: las características del suelo y los estratos que conforman la geología del lugar, el comportamiento del agua en la zona, la forma del terreno y, también, las actividades humanas que alteran el entorno.

5.1.2.1 Factores geológicos

5.1.2.1.1 Presencia de depósitos cuaternarios inconsolidados

En las laderas del cerro y a lo largo de la quebrada Sahuanay se encuentran distintos tipos de sedimentos sueltos, como depósitos aluviales, fluviales, coluviales, entre otros. Todos estos materiales están formados por fragmentos de roca sin cohesión, lo que los hace muy vulnerables a ser arrastrados por el agua. Por eso, en caso de lluvias intensas, no se descarta que puedan volver a activarse y generar nuevos deslizamientos.

5.1.2.1.2 Geología de rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias

El cerro está formado por capas gruesas de lutitas negras, calizas, areniscas con alto contenido de feldespato y lutitas rojas de tipo arcilloso, correspondientes a las formaciones Copacabana, Mitu y Yura. Sobre estas rocas descansan depósitos coluviales y aluviales, que al saturarse con agua pierden su resistencia, generando condiciones que favorecen la inestabilidad del terreno.

5.1.2.1.3 Eventos geodinámicos previos

Las zonas más inestables se encuentran principalmente en áreas formadas durante el período Cuaternario, moldeadas por fuertes movimientos tectónicos, sismicidad y otros procesos geodinámicos intensos. Esto indica que, por su propia formación geológica, estas áreas ya tienen una mayor propensión a sufrir deslizamientos y otros movimientos de masa.

5.1.2.2 Factores hidrológicos

5.1.2.2.1 Precipitaciones pluviales intensas

A lo largo de la historia, los deslizamientos ocurridos en los años 1951 y 2012 estuvieron ligados a lluvias intensas. La acumulación excesiva de agua en los depósitos morrénicos y coluviales fue el detonante principal. Esa sobresaturación hizo que el deslizamiento inicial se transformara rápidamente en un huaico, al ir sumando más agua y materiales en su camino.



5.1.2.2.2 Comportamiento de la quebrada Sahuanay

La parte alta de la quebrada tiene una pendiente bastante pronunciada (Fig. 10), lo que hace que el agua baje con fuerza y rapidez, generando una gran capacidad para erosionar el terreno y arrastrar materiales sueltos. Esta característica representa un riesgo importante. Además, en la zona hay afloramientos de agua que podrían estar ligados a antiguos eventos geodinámicos, lo que también podría influir en la inestabilidad del lugar.

5.1.2.2.3 Diseño subóptimo de estructuras de canalización

En ciertos tramos, la quebrada ha sido canalizada con estructuras que quizá no fueron diseñadas de la mejor manera (Fig. 14, 15). Esto podría dificultar el paso del agua y afectar la estabilidad del terreno, especialmente durante lluvias intensas.

5.1.2.3 Factores topográficos

5.1.2.3.1 Fuertes variaciones de pendientes

La zona que se analiza, ubicada entre los 2850 m.s.n.m y 3350 m.s.n.m., tiene un relieve bastante accidentado, con pendientes muy marcadas y laderas bastante empinadas. En este terreno tan irregular, el deslizamiento comenzó en una de las zonas con mayor inclinación, superior al 50 %, lo que favorece que se produzcan movimientos de masa con mayor facilidad.

5.1.2.3.2 Desnivel en el cauce

La diferencia de altura a lo largo del cauce de la quebrada, junto con las empinadas laderas que la rodean, crea las condiciones ideales para que ocurran procesos geodinámicos que facilitan el desprendimiento y arrastre de materiales sueltos.

5.1.2.4 Factores de la actividad humana

5.1.2.4.1 Crecimiento poblacional desordenado

El crecimiento desordenado de la población en las ciudades de Tamburco y Abancay, sin seguir una adecuada planificación urbana, ha incrementado la vulnerabilidad de las viviendas e



infraestructuras. Aunque esto no es lo que provoca directamente los deslizamientos, sí empeora sus efectos, ya que muchas construcciones se han edificado en zonas con alto riesgo, sin respetar la franja marginal.

5.1.2.5 La flora

5.1.2.5.1 Cobertura vegetal

Si llegara a ocurrir un deslizamiento, los bosques de coníferas presentes en la zona podrían actuar como obstáculos, haciendo que el flujo de tierra y rocas se detenga momentáneamente, pero al mismo tiempo aumente su volumen al acumular más material. Esto haría que el huaico se expanda y cause daños en áreas aún más amplias a lo largo de su recorrido.

En el caso del cerro Chuyllurpata, es probable que los futuros deslizamientos se deban a una combinación de factores: un terreno geológicamente inestable, litología de materiales inconsolidados, la acción del agua que erosiona y satura los suelos, las pendientes pronunciadas del lugar, la presencia de bosques y viviendas en zonas que ya presentan un alto nivel de riesgo.

5.1.3 Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata ocasiona daños en la quebrada Sahuanay – Tamburco – Abancay

5.1.3.1 Delimitación del área propenso a deslizamiento

En el cerro Chuyllurpata existen grietas generadas por los deslizamiento ocurridos (1951 y 2012) en 1951 el desplazamiento ha sido vertical como se aprecia en la figura 21, y el año 2012 el desplazamiento ha sido de forma horizontal, por consiguiente, la grieta que se generó es más visible (Fig. 22).

La grieta mostrada en las figuras 21 y 22, que alcanza una longitud explorada de 530 metros (Fig. 23), junto con la composición geológica del cerro Chuyllurpata y los antecedentes de deslizamientos ocurridos tras



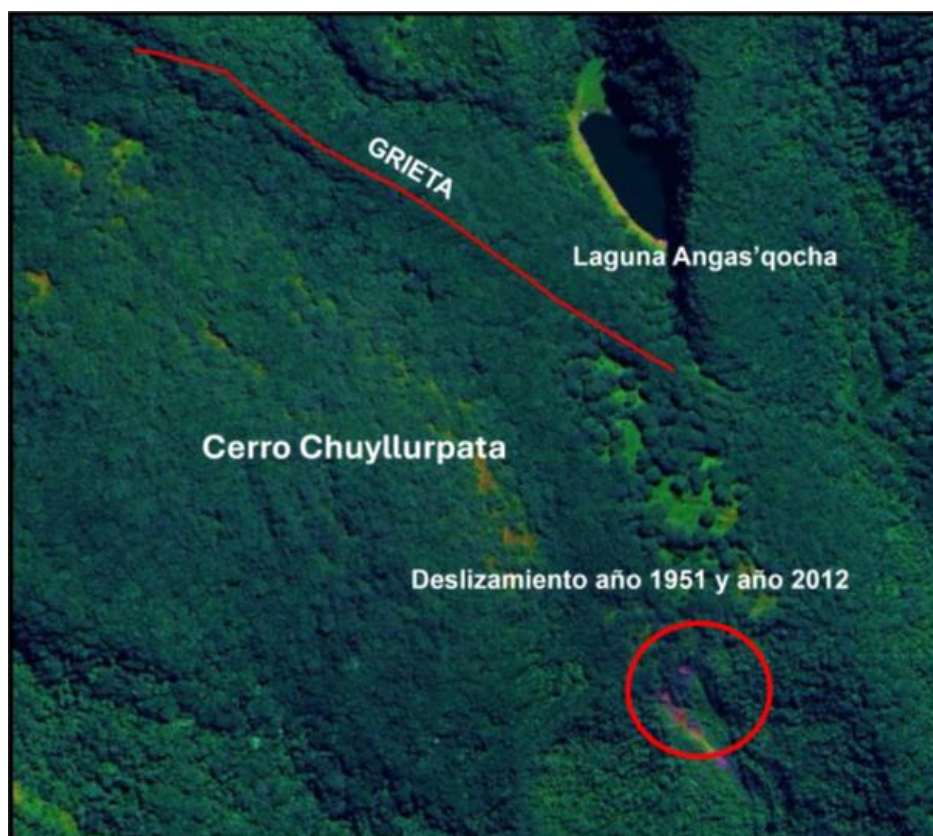
lluvias intensas, son señales claras de que la ladera presenta un proceso de inestabilidad y geodinámica activa.



Figura 21 — Deslizamiento vertical en cerro Chuyllurpata (1951)



Figura 22 — Deslizamiento horizontal en cerro Chuyllurpata (2012)



FUENTE: Google Earth Pro (2025)

Figura 23 – Grieta y deslizamiento (1951 y 2012)

5.1.3.2 Sustento para la delimitación de la zona potencial de deslizamiento

Para definir el área en estudio, se tomó en cuenta la grieta existente, la cual marcó dos momentos clave: en 1951, cuando provocó un deslizamiento vertical, y luego en 2012, cuando se registró un desplazamiento horizontal. Estos cambios pueden observarse en las imágenes correspondientes (Fig. 21 y 22).

Entre los factores geológicos que influyen en la zona del cerro Chuyllurpata, destacan la presencia de depósitos cuaternarios sueltos, como aluviales, fluviales, proluviales, coluviales y deluviales, distribuidos a lo largo de su extensión.

Su importancia para delimitar radica en las formaciones que están cubiertas por materiales coluviales y aluviales inconsolidados que, al saturarse con agua, pierden su firmeza y aumentan considerablemente el riesgo de deslizamientos.



Eventos meteorológicos de precipitaciones extremas (por ejemplo, ocurridos en los años 1951 y 2012). El área potencial incluye el recorrido del agua durante las lluvias intensas cuesta abajo.

La quebrada Sahuanay presenta un comportamiento particular que la hace especialmente crítica en esta zona. Su fuerte pendiente inicial le da al agua una gran velocidad y capacidad para erosionar el terreno. Además, en su trayecto se han identificado afloramientos de agua que podrían estar relacionados con antiguos procesos geodinámicos.

El cauce de la quebrada y las áreas que la rodean juegan un papel clave, ya que no solo desgastan la base de las laderas, sino que también funcionan como vía natural para el transporte del material que se desliza. A esto se suma que algunas estructuras de canalización construidas en el lugar no están bien diseñadas. En ciertos tramos, estas deficiencias podrían provocar que el flujo de lodo se concentre y se acumule el material, y se desborde, afectando ambos márgenes del cauce cercanas y ampliando considerablemente el área en riesgo.

En la zona de estudio, que se encuentra entre los 2850 y 3350 m.s.n.m., el terreno presenta cambios bruscos de pendiente, con laderas bastante empinadas, algunas que superan el 50 % de inclinación. Es precisamente en estas zonas más inclinadas donde suelen originarse los deslizamientos, que luego se desplazan cuesta abajo. Esta franja altitudinal define el sector más vulnerable de la ladera, donde hay mayor probabilidad de que ocurran estos eventos.

El desnivel del cauce en la quebrada Sahuanay es bastante marcado, y al combinarse con las empinadas laderas que la rodean, se generan zonas con mucha energía, donde es fácil que el agua arranque y arrastre material suelto. Estas condiciones hacen que el lugar tenga un alto potencial para desencadenar deslizamiento.

Con base a toda la información analizada, se ha definido una zona potencial de deslizamiento que abarca un área aproximada de 27,20 ha



(equivalente a 271964,31 metros cuadrados), delimitada por un perímetro de 2361 metros lineales (Fig. 24 y Fig. 25).

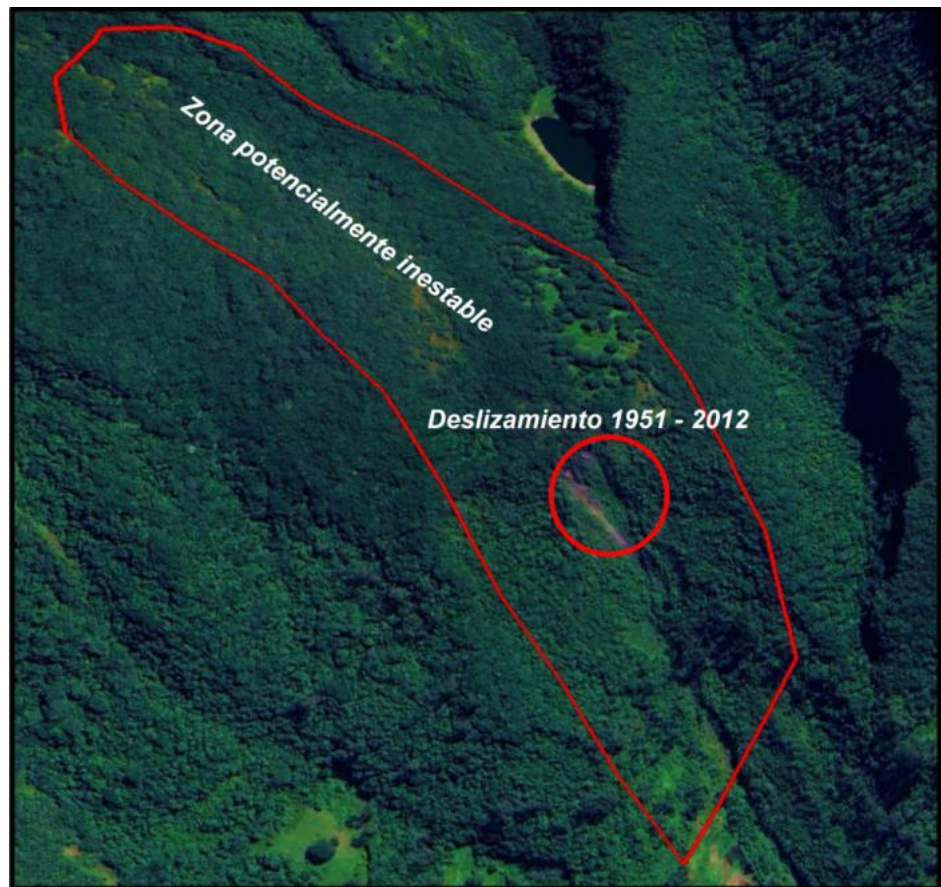


Figura 24 — Delimitación del área potencial de deslizamiento del cerro Chyllurpata

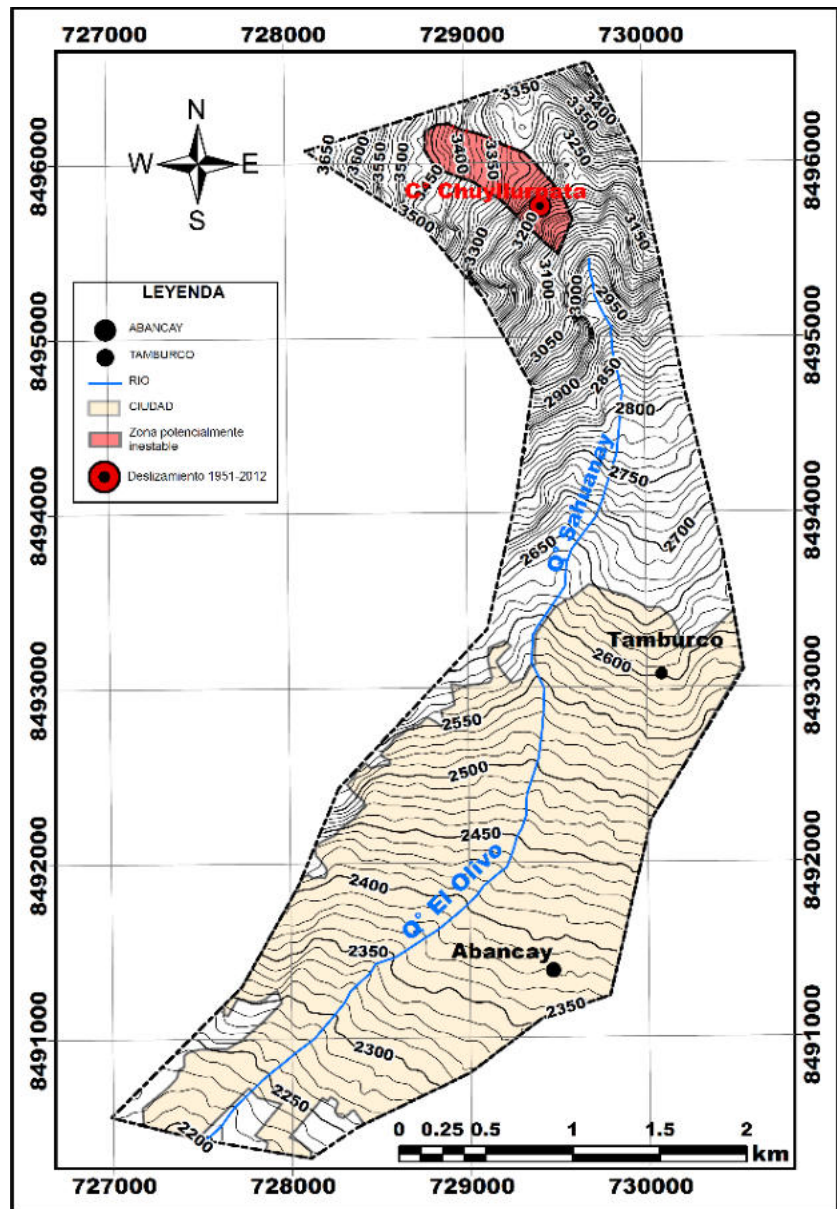


Figura 25 – Ubicación del área potencial de deslizamiento

5.1.3.3 Volumen potencial de deslizamiento en cerro Chuyllurpata

El volumen potencial de deslizamiento en el cerro Chuyllurpata fue calculado con precisión utilizando el software ArcGIS Pro. Para ello, se llevó a cabo un levantamiento topográfico detallado del área en riesgo (Fig. 24), registrando las coordenadas (este, norte y altitud) de cada punto en la superficie del terreno. Se consideró un espesor promedio de 10 metros para la masa que podría deslizarse, asumiendo que seguiría la inclinación natural del terreno.



Tabla 7 – Coordenadas del perímetro del área potencial de deslizamiento del cerro Chuyllurpata

Pts.	Este	Norte	Cota	Pts.	Este	Norte	Cota
1	729341	8496059	3301	16	728976	8495919	3413
2	729308	8496071	3305	17	729060	8495890	3382
3	729225	8496102	3327	18	729128	8495838	3362
4	729201	8496116	3336	19	729198	8495796	3333
5	729123	8496151	3361	20	729268	8495726	3291
6	729073	8496171	3372	21	729335	8495650	3215
7	728999	8496188	3394	22	729403	8495593	3172
8	728936	8496216	3421	23	729462	8495532	3127
9	728918	8496227	3429	24	729528	8495478	3072
10	728860	8496222	3454	25	729607	8495678	3127
11	728845	8496218	3461	26	729564	8495787	3193
12	728787	8496179	3475	27	729498	8495882	3252
13	728784	8496076	3472	28	729422	8495973	3291
14	728834	8495992	3465	29	729341	8496059	3301
15	728894	8495953	3444				

Luego, toda esta información fue procesada en ArcGIS Pro, lo que permitió construir un modelo digital del terreno antes y después del deslizamiento. Gracias a este modelo, fue posible estimar el volumen total del material que podría ser desplazado.

$$\text{Área} = 271964,309 \text{ m}^2$$

$$V = 3216233,0451 \text{ m}^3$$

Antes de estimar el volumen del material que podría movilizarse en un posible deslizamiento del cerro Chuyllurpata, se revisó información y estudios previos sobre los espesores de los movimientos en masa que ocurrieron en los años 1951 y 2012.

La información encontrada en los resúmenes de búsqueda no detalla el espesor del material deslizado ni del flujo de detritos ocurrido en el evento de 1951. Sin embargo, VILLACORTA, et al. (2016) “al realizar una simulación numérica empleando el modelo bidimensional FLO-D para un evento extremo de 36 Mm³, donde se buscó replicar la avalancha de detritos del cerro Chuyllurpata –



quebrada Sahuanay del 18 de febrero de 1951, las alturas del flujo estimadas alcanzan hasta 7 m sobre el área del cauce”.

TUÑOQUE (2023) en su tesis de investigación: “Riesgo cuantitativo por flujo de detritos desencadenados por precipitaciones pluviales en la microcuenca Sahuanay, Distrito de Tamburco – Abancay – Apurímac” indica que el volumen desplazado en el cerro Chuyllurpata en marzo del 2012 fue 684946,03 m³ en un área de 41296,38 m² lo que infiere un espesor de 16,59 m.

5.1.3.4 Zonificación geomecánica del área de impacto del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata

Según VILLACORTA, et al. (2016), “tras analizar las características geomecánicas del área en estudiada, se logró dividir la zona en cuatro categorías distintas”, como se muestra en la figura 26.

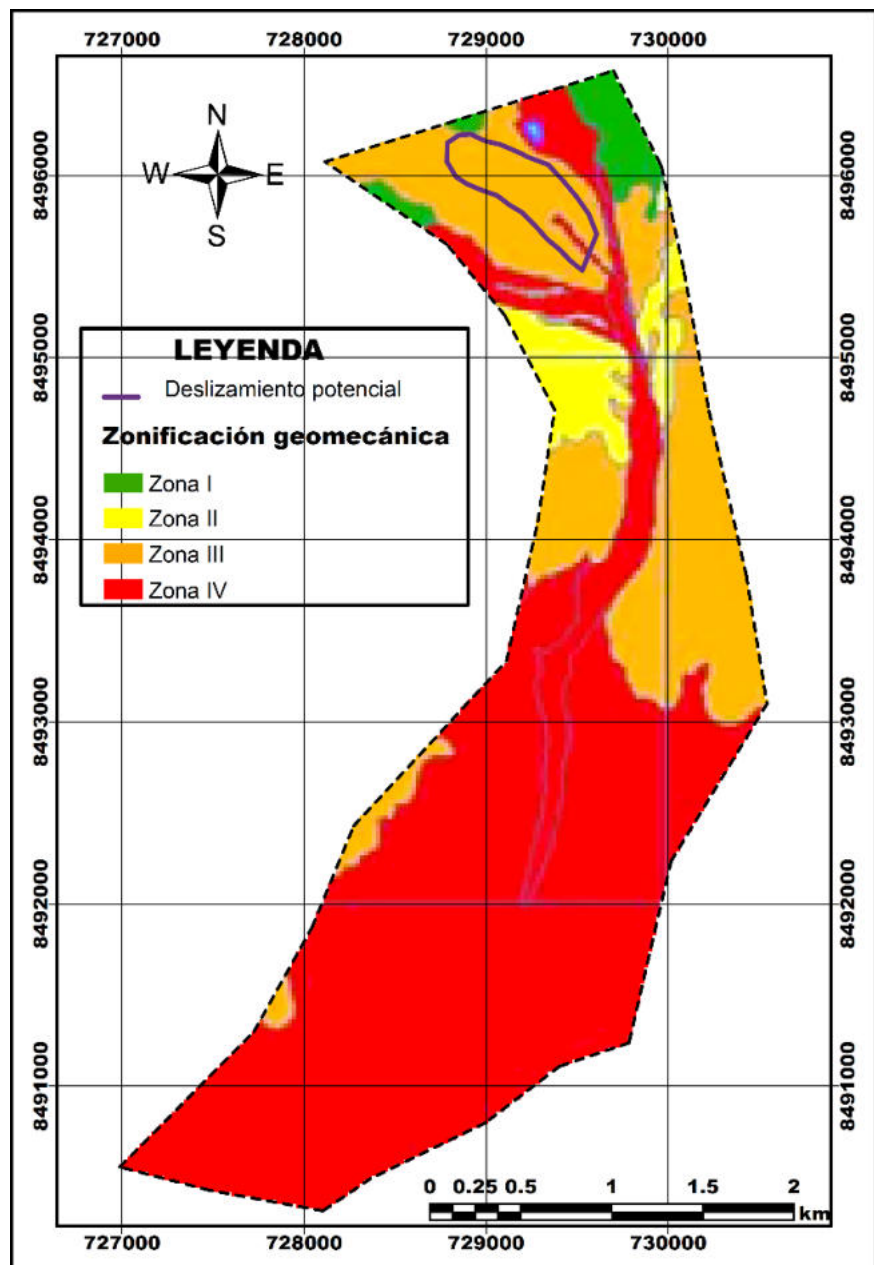
Zona I: corresponde a las rocas de mejor calidad con resistencia a la compresión entre 85 MPa a 100 MPa (Calizas compactas, areniscas, dacitas, granitos, monzogranitos y monzonitas e intrusivos metamorfizados).

Zona II: corresponde a lavas andesíticas basálticas, areniscas y calizas, lo cual permite clasificar a esta unidad litográfica como roca de calidad buena. En algunos sectores disminuye su resistencia y calidad, debido a la intercalación de limonitas y lutitas, cercanas a zonas de fallas y fuerte argilización supérgena por procesos meteóricos.

Zona III: la resistencia a la compresión de los afloramientos de calizas en esta zona resulta 85 MPa que permite clasificar a las rocas con calidad regular. La mayoría de ellos se presenta en bancos delgados intercalados con limonitas. Está cubierto con fragmentos inconsolidados pobremente graduados.



Zona IV: corresponde a materiales inconsolidados (mezcla poliméctica de fragmentos rocosos heterométricos en matriz limo-arcillosa) producto de los diferentes movimientos en masa que se han acumulado hasta por decenas de metros en diferentes sectores de la cuenca, sobre todo en laderas y en ambas márgenes de los cursos de agua.



FUENTE: VILLACORTA, et al. (2016).

Figura 26 – Zonificación geomecánica de la zona en estudio

El cerro Chuyllurpata ha sido identificado como el punto de origen de los

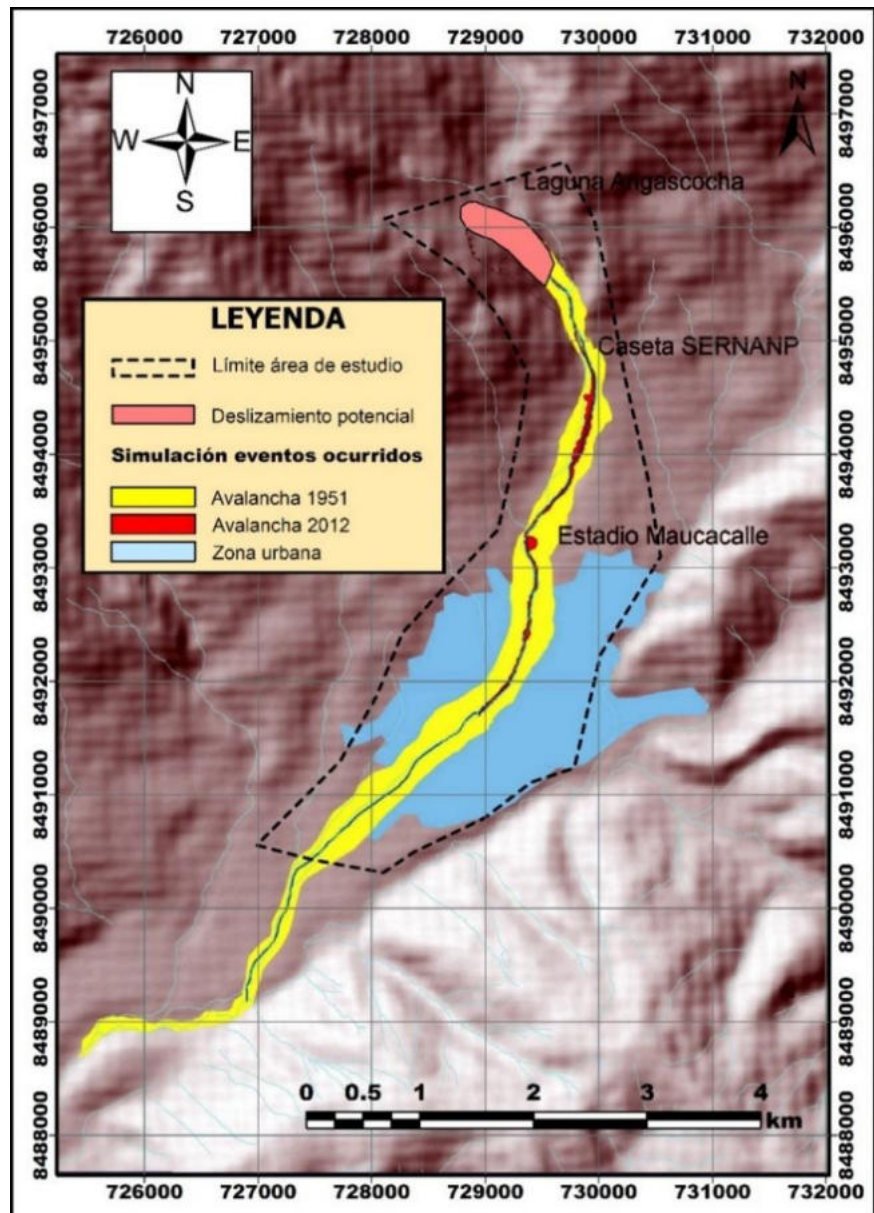


flujos de detritos. Las investigaciones confirman que los huaicos registrados el año 2012 se desencadenaron justamente en este cerro, al reactivarse la huella de un antiguo deslizamiento ocurrido en año 1951. Entre los factores que explican la inestabilidad del terreno y que pueden detonar deslizamientos se encuentran: la acumulación de grandes volúmenes de material suelto, como depósitos coluviales y morrénicos; la fuerte pendiente del terreno, que favorece el desprendimiento; y las lluvias intensas, que saturan el suelo y terminan provocando su movilización.

Tomando en cuenta la información geológica, la topografía del lugar, los factores que generan inestabilidad y los antecedentes de deslizamientos ocurridos en los años 1951 y 2012, se han registrado dos eventos catastróficos en un periodo de 61 años. Esto permitiría estimar un periodo de retorno similar. No obstante, esta cifra debe manejarse con cautela, ya que es muy posible que hayan ocurrido otros eventos menores en la zona que no fueron documentados. Por ello, se puede deducir que la probabilidad de que se repita un evento de magnitud igual o mayor a los años 1951 y 2012 en un año cualquiera es considerablemente alta.

Respecto al resultado de la simulación para el flujo de detritos de 1951 según VILLACORAT et al. (2016), considerando la movilización de 36 Mm^3 de materiales, permitió observar una alta probabilidad de afectación por flujos en parte de los distritos de Tamburco y Abancay. Las alturas de flujo estimadas alcanzan hasta 7 m sobre el área del cauce (fig. 27). En amarillo se observan las áreas de posible afectación en la ciudad de Tamburco – Abancay por flujo de detritos, en rojo avalancha de detritos de marzo 2012. Se analizó la dinámica de los flujos mediante la simulación numérica, empleando el modelo bidimensional FLO-2D (O' Brien, 2004), y los valores de número de Manning en el cauce del río y áreas aledañas de 0,057 y 0,075 respectivamente.





FUENTE: (VILLACORAT et al. 2016).

Figura 27 – Simulación avalancha años 1951 y 2012

5.1.3.4.1 Modelo hidrológico HEC – RAS para la unidad hidrográfica de la quebrada Sahuanay.

CONTRERAS, et al. (2017) realizaron la simulación - Modelo Hidrológico HEC – HMS (Hydrologic Modeling System) para un periodo de retorno de la precipitación pluvial que generarían caudales de máximas avenidas en un periodo de retorno de 100 años. En la tabla N°7 se muestra para este caso el caudal máximo de diseño de $8,81 \text{ m}^3/\text{s}$.



Esta investigación se centra en analizar a fondo las capacidades del software HEC-RAS v6.7 para simular huaicos en la zona del cerro Chuyllurpata – Sahuanay, en un periodo de retorno de 100 años. Con el objetivo de garantizar un abordaje técnico riguroso, se llevó a cabo una revisión detallada de la documentación del software, la metodología de modelado y casos de estudio relacionados. HEC-RAS v6.7 cuenta con módulos que permiten simular flujos de detritos tanto en 1D como en 2D, y ofrece la opción de trabajar con fluidos no newtonianos, permitiendo elegir entre distintos métodos y configurar los parámetros correspondientes.

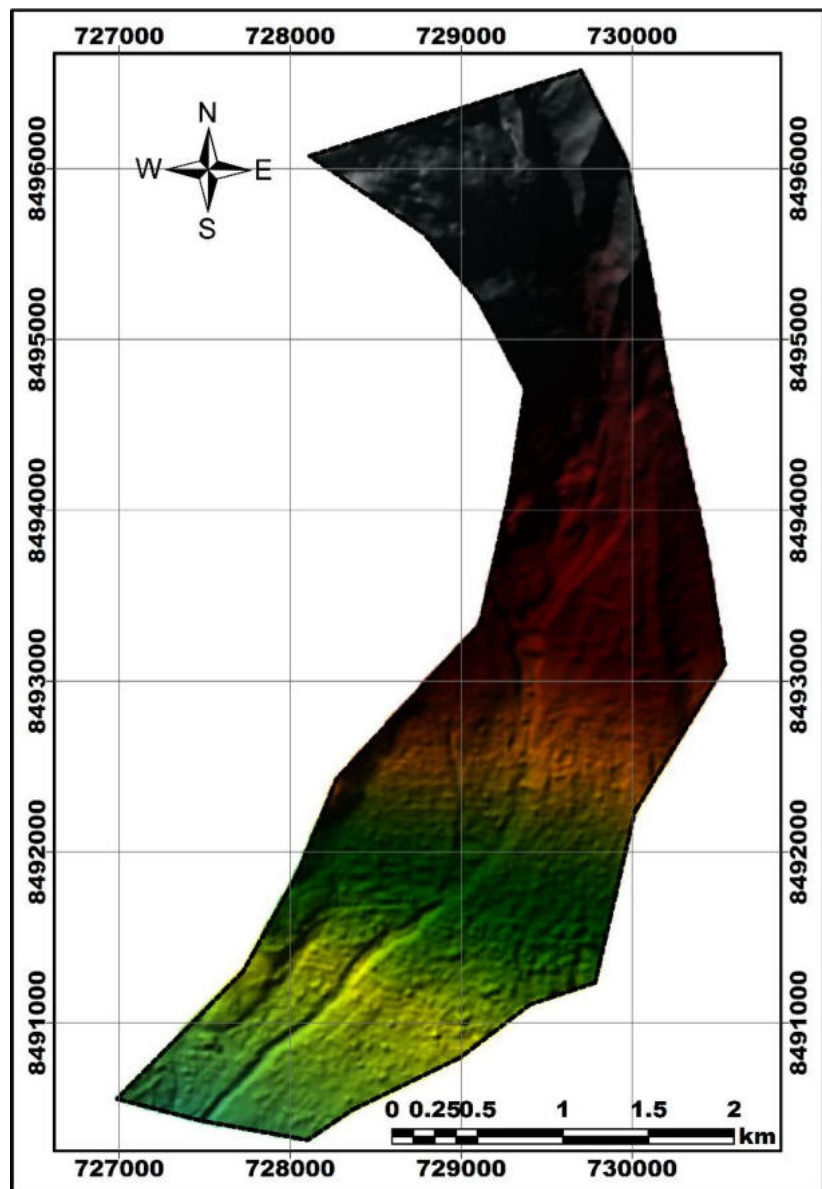


Figura 28 – Imagen ráster DSM de la zona de estudio



Para generar el modelado y la simulación correspondiente, la imagen satelital ráster es un insumo primordial que, permite realizar análisis, clasificaciones, mapeos, monitoreos, etc. Para este proceso de modelado y simulación del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata se ha utilizado imagen ráster Modelo Digital de Superficie (DSM) de 0,50 m. (Fig. 28).

Tabla 8 – Evolución del caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años

Date	Time	Inflow fro... (m ³ /s)	Outflow (m ³ /s)	Acumulado (m ³)
01ene2014	20:00	0.9585	0.9585	575.100
01ene2014	20:10	2.8076	2.8076	1684.560
01ene2014	20:20	5.2958	5.2958	3177.480
01ene2014	20:30	7.2140	7.2140	4328.400
01ene2014	20:40	8.3982	8.3982	5038.920
01ene2014	20:50	8.8106	8.8106	5286.360
01ene2014	21:00	8.5029	8.5029	5101.740
01ene2014	21:10	8.1233	8.1233	4873.980
01ene2014	21:20	7.666	7.666	4599.600
01ene2014	21:30	7.1494	7.1494	4289.640
01ene2014	21:40	6.7345	6.7345	4040.700
01ene2014	21:50	6.3565	6.3565	3813.900
01ene2014	22:00	6.006	6.006	3603.600
01ene2014	22:10	5.7225	5.7225	3433.500
01ene2014	22:20	5.4702	5.4702	3282.120
01ene2014	22:30	5.2361	5.2361	3141.660
01ene2014	22:40	5.0425	5.0425	3025.500
01ene2014	22:50	4.8659	4.8659	2919.540
01ene2014	23:00	4.6948	4.6948	2816.880
01ene2014	23:10	4.5478	4.5478	2728.680
01ene2014	23:20	4.4172	4.4172	2650.320
01ene2014	23:30	4.2922	4.2922	2575.320
01ene2014	23:40	4.1869	4.1869	2512.140
01ene2014	23:50	4.0916	4.0916	2454.960
02ene2014	0:00	4.0003	4.0003	2400.180
02ene2014	0:10	3.9226	3.9226	2353.560
02ene2014	0:20	3.8493	3.8493	2309.580
02ene2014	0:30	3.7755	3.7755	2265.300
02ene2014	0:40	3.7098	3.7098	2225.880
TOTAL				93509.100
FUENTE: CONTRERAS, et al. (2017)				



El volumen por desplazarse en un retorno de 100 años es 93509,100 m³.

Con los datos propuestos para un periodo de retorno de 100 años de modeló y se realizó la simulación en HEC-RAS v.6.7 (2D) (Fig. 29).

Proceso de modelado en HEC – RAS:

Métodos y parámetros No Newtonianos

Método No Newtoniano: **Bingham**

Concentración volumétrica $C_v = 45\%$

Parámetros de límite elástico para suelo:

$$a = 0,50 Pa$$

$$b = 9,00$$

Coefficiente para el multiplicador exponencial de la viscosidad dinámica:

$$B = 28,00$$

Realizada la modelación y el proceso de simulación, el área afectada por el fenómeno (huaico) con retorno de 100 años es de 54,33 ha (Fig. 29), con una longitud de recorrido de 5925,50 m. En su recorrido cuesta abajo, el huaico afecta diversas zonas (agrícola, rural, expansión urbana y urbana) ubicadas a lo largo de su trayectoria. Afectando ambos márgenes de su cauce, desde el estadio Maucacalle afecta considerablemente las viviendas asentadas adyacentes al cauce de la quebrada Sahuanay y el Olivo. El desborde de su cauce se debe a obstáculos producidos por la vegetación existente en el eje de la quebrada y la construcción de viviendas sin respetar la faja marginal. En varios puntos de su trayecto hay casas construidas directamente sobre el cauce de la quebrada. Los casos más evidentes están frente al estadio Maucacalle, cerca del Arco, así como entre el puente Cuatro de Noviembre y el puente Chinchichaca, y de este último hacia el puente El Olivo, que es la parte más delicada. Además,

se han registrado desbordamientos en calles como Real y Chile, así como en avenidas cercanas, entre ellas Seoane, Venezuela y Brasil.

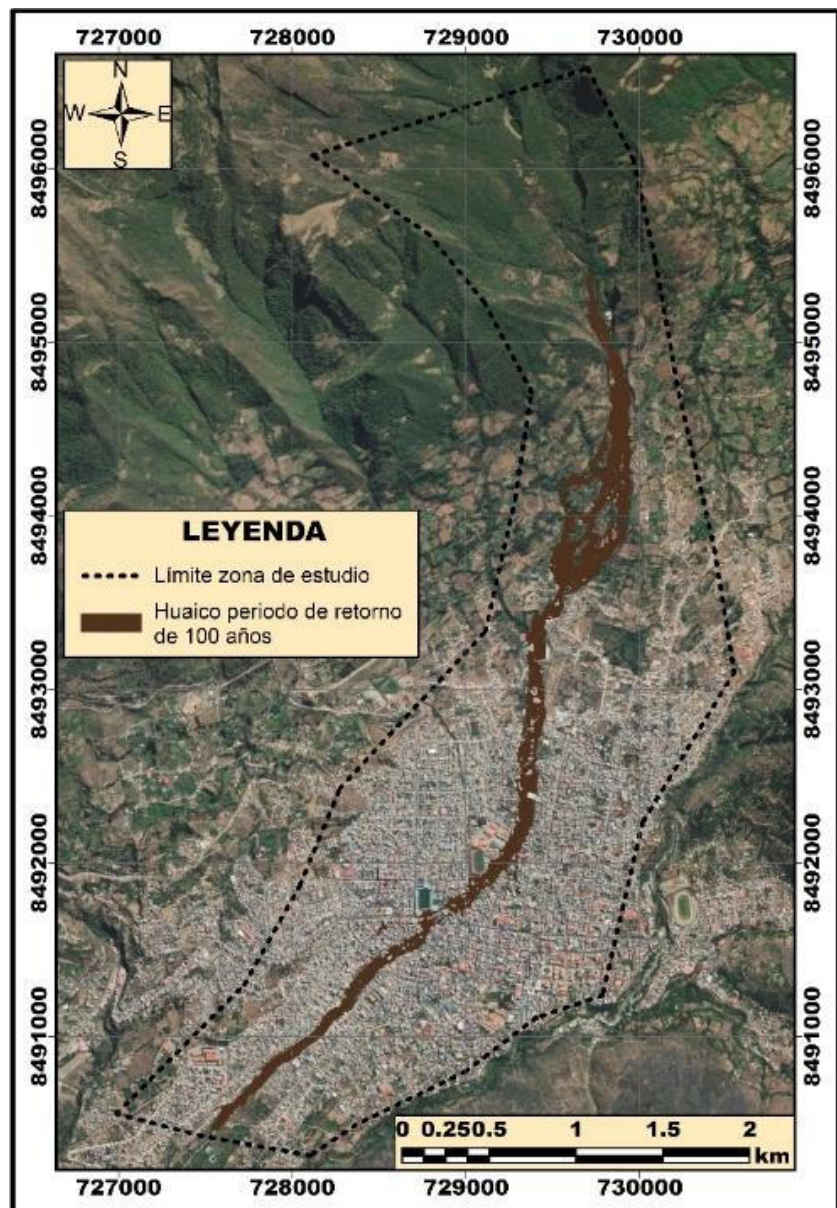


Figura 29 – Huella de inundación del hualca simulados en periodo de retorno de 100 años

A continuación, se presenta el flujograma de modelamiento del hualca producido por el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata.

Flujograma del proceso de modelamiento del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata en HEC-RAS v.6.7

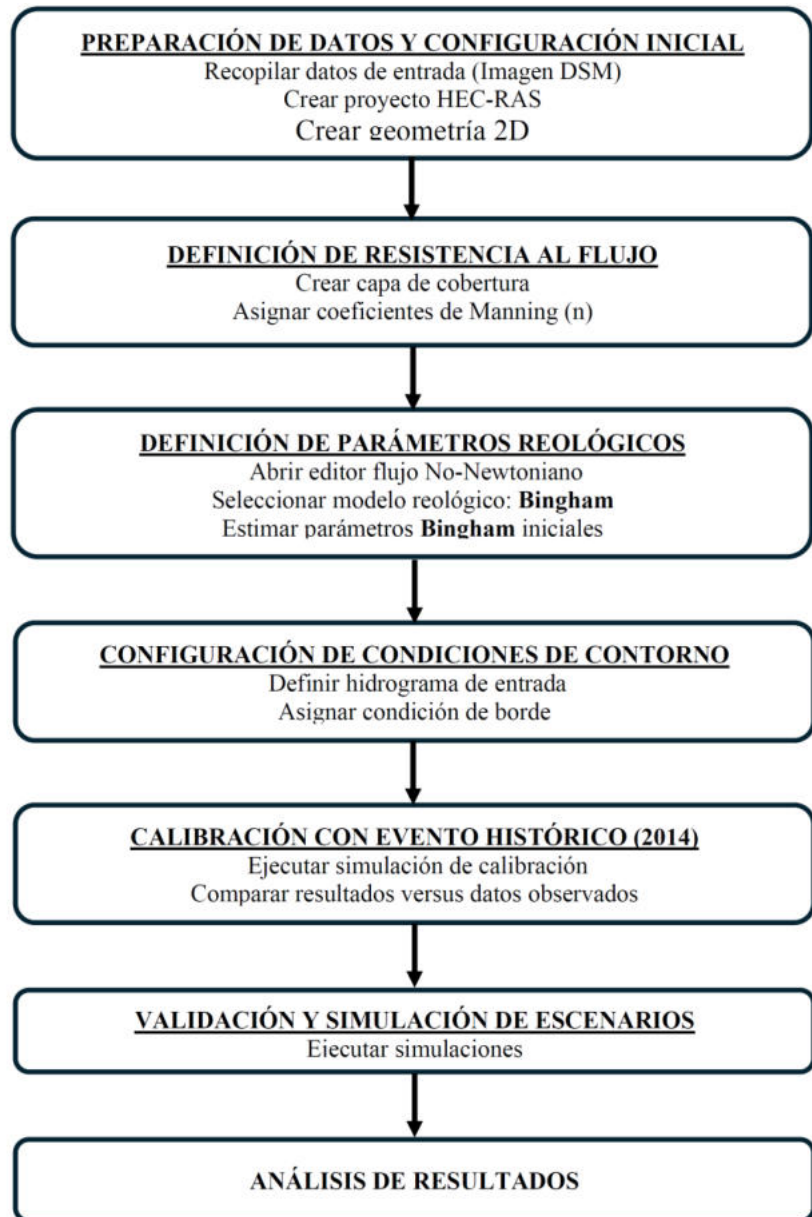


Figura 30 – Flujograma del modelamiento y el proceso de simulación de un huaico

Área del potencial de desplazamiento del cerro Chuyllurpata 27,196 ha con una potencia promedio de 10 m y volumen de 3216233,045 m³ de material sólido.

Concentración volumétrica 45 %

$$C_V = \frac{V_S}{V_S + V_L} \quad \text{Ec. 16}$$



Donde:

C_V : Concentración volumétrica (%)

V_S : Volumen de sólido (m^3)

V_L : Volumen de líquido (m^3)

$$V_L = \frac{V_S - C_V * V_S}{C_V} \quad \text{Ec. 17}$$

$$V_L = \frac{3216233,0451 \text{ m}^3 - 0,45 * 3216233,0451 \text{ m}^3}{0,45} = 3930951,50 \text{ m}^3$$

$$V_T = 3216233,0451 \text{ m}^3 + 3930951,50 \text{ m}^3 = 7147184,545 \text{ m}^3$$

Hidrogramas unitarios sintéticos

PONCE (2017) “indica que la función de hidrograma unitario es predecir la forma del hidrograma, particularmente la descarga pico (Q_p) y el tiempo pico (t_p), es decir el tiempo transcurrido desde el inicio del hidrograma hasta la ocurrencia de la descarga pico.” “Si se asume un hidrograma triangular, se logra encontrar el caudal máximo o pico con la ecuación 19” (ALFARO, 2018).

$$V = \frac{Q_p * T_{bt}}{2} \quad \text{Ec. 18}$$

$$Q_p = \frac{2V}{T_{bt}} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

V : volumen (m^3)

Q_p : caudal pico o descarga pico (m^3/s)

T_{bt} : tiempo de base del hidrograma unitario triangular (s)

La pendiente de la rama ascendente está dada por:

$$m = \frac{\text{Caudal final} - \text{Caudal inicial}}{\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial}} \quad \text{Ec. 20}$$

Remplazando valores:

$$m = \frac{82,72 \frac{m^3}{s} - 0}{30 h - 0 h} = 2,75733 \frac{m^3}{h}$$

La ecuación del caudal ascendente en cualquier momento (t) donde $0 \leq t \leq T_p$ es:

$$Q(t) = m * t \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

m: pendiente $\left(\frac{m^3}{h}\right)$

t: tiempo (h)

Ejemplo como varía el caudal transcurrido 2 h

$$Q(2) = 2,75733 \frac{m^3}{h} * 2 h = 5,51 \frac{m^3}{s}$$

La pendiente de la rama descendente se calcula de la siguiente manera:

$$m = \frac{\text{Caudal final} - \text{Caudal inicial}}{\text{Tiempo final} - \text{Tiempo inicial}} \quad \text{Ec.22}$$

La pendiente es negativa, lo que indica que el caudal está disminuyendo.

La forma punto - pendiente de la ecuación de una línea recta:

$$Q(t) - Q_p = m(t - T_p) \quad \text{Ec.23}$$

Esta ecuación es válida para el rango de tiempo de la rama descendente, es decir para $30 h \leq t \leq 48 h$

Ejemplo como varía el caudal transcurrido 32 h



Ejemplo como varía el caudal transcurrido 32 h

$$Q(32) = 82,72 \frac{m^3}{s} - 4,59555 \frac{m^3}{s} (32 h - 30 h) = 73,53 \frac{m^3}{s}$$

Tabla 9 – Evolución del caudal del huaico en el potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata

Fecha	h	Tiempo Transcurrido (min)	Fase	Caudal (m ³ /min)	Caudal (m ³ /s)	Volumen (m ³)
1/3/2030	0:0	0	Ascenso	0.000	0.000	0.000
1/3/2030	1:0	60	Ascenso	165.444	2.757	9926.640
1/3/2030	2:0	120	Ascenso	330.888	5.515	19853.280
1/3/2030	3:0	180	Ascenso	496.332	8.272	29779.920
1/3/2030	4:0	240	Ascenso	661.776	11.030	39706.560
1/3/2030	5:0	300	Ascenso	827.220	13.787	49633.200
1/3/2030	6:0	360	Ascenso	992.664	16.544	59559.840
1/3/2030	7:0	420	Ascenso	1158.108	19.302	69486.480
1/3/2030	8:0	480	Ascenso	1323.552	22.059	79413.120
1/3/2030	9:0	540	Ascenso	1488.997	24.817	89339.820
1/3/2030	10:0	600	Ascenso	1654.441	27.574	99266.460
1/3/2030	11:0	660	Ascenso	1819.885	30.331	109193.10
1/3/2030	12:0	720	Ascenso	1985.329	33.089	119119.74
1/3/2030	13:0	780	Ascenso	2150.773	35.846	129046.38
1/3/2030	14:0	840	Ascenso	2316.217	38.604	138973.02
1/3/2030	15:0	900	Ascenso	2481.661	41.361	148899.66
1/3/2030	16:0	960	Ascenso	2647.105	44.118	158826.30
1/3/2030	17:0	1020	Ascenso	2812.549	46.876	168752.94
1/3/2030	18:0	1080	Ascenso	2977.993	49.633	178679.58
1/3/2030	19:0	1140	Ascenso	3143.437	52.391	188606.22
1/3/2030	20:0	1200	Ascenso	3308.881	55.148	198532.86
1/3/2030	21:0	1260	Ascenso	3474.325	57.905	208459.50
1/3/2030	22:0	1320	Ascenso	3639.769	60.663	218386.14
1/3/2030	23:0	1380	Ascenso	3805.213	63.420	228312.78
2/3/2030	0:0	1440	Ascenso	3970.657	66.178	238239.42
2/3/2030	1:0	1500	Ascenso	4136.102	68.935	248166.12
2/3/2030	2:0	1560	Ascenso	4301.546	71.692	258092.76
2/3/2030	3:0	1620	Ascenso	4466.990	74.450	268019.40
2/3/2030	4:0	1680	Ascenso	4632.434	77.207	277946.04
2/3/2030	5:0	1740	Ascenso	4797.878	79.965	287872.68
2/3/2030	6:0	1800	Ascenso	4963.322	82.722	297799.32
2/3/2030	7:0	1860	Descenso	4687.582	78.126	281254.92
2/3/2030	8:0	1920	Descenso	4411.842	73.531	264710.52
2/3/2030	9:0	1980	Descenso	4136.102	68.935	248166.12
2/3/2030	10:0	2040	Descenso	3860.362	64.339	231621.72
2/3/2030	11:0	2100	Descenso	3584.622	59.744	215077.32



2/3/2030	12:0	2160	Descenso	3308.882	55.148	198532.92
2/3/2030	13:0	2220	Descenso	3033.142	50.552	181988.52
2/3/2030	14:0	2280	Descenso	2757.401	45.957	165444.06
2/3/2030	15:0	2340	Descenso	2481.661	41.361	148899.66
2/3/2030	16:0	2400	Descenso	2205.921	36.765	132355.26
2/3/2030	17:0	2460	Descenso	1930.181	32.170	115810.86
2/3/2030	18:0	2520	Descenso	1654.441	27.574	99266.46
2/3/2030	19:0	2580	Descenso	1378.701	22.978	82722.06
2/3/2030	20:0	2640	Descenso	1102.961	18.383	66177.66
2/3/2030	21:0	2700	Descenso	827.221	13.787	49633.26
2/3/2030	22:0	2760	Descenso	551.480	9.191	33088.80
2/3/2030	23:0	2820	Descenso	275.740	4.596	16544.40
2/3/2030	0:0	2880	Descenso	0.000	0.000	0.000
TOTAL						7147183.8

Proceso de modelado en HEC – RAS:

Métodos y parámetros No Newtonianos

Método No Newtoniano: **Bingham**

Concentración volumétrica $C_v = 45\%$

Parámetros de límite elástico para suelo:

$$a = 0,50 Pa$$

$$b = 9,00$$

Coefficiente para el multiplicador exponencial de la viscosidad dinámica:

$$B = 28,00$$

Luego de realizar el modelado y la simulación del posible deslizamiento en el cerro Chuyllurpata, se determinó que el área afectada abarcaría en la zona de estudio, aproximadamente 204,31 ha, en un recorrido total de 5954,50 m. En su trayecto inicial, de unos 998,70 m cuesta abajo, el huaico es contenido parcialmente por una quebrada estrecha. Sin embargo, más adelante, el cauce se ensancha a lo largo de 866,7 m, afectando zonas agrícolas y viviendas rurales en Sahuanay, en una superficie estimada de 42,29 ha (ver Fig. 31).

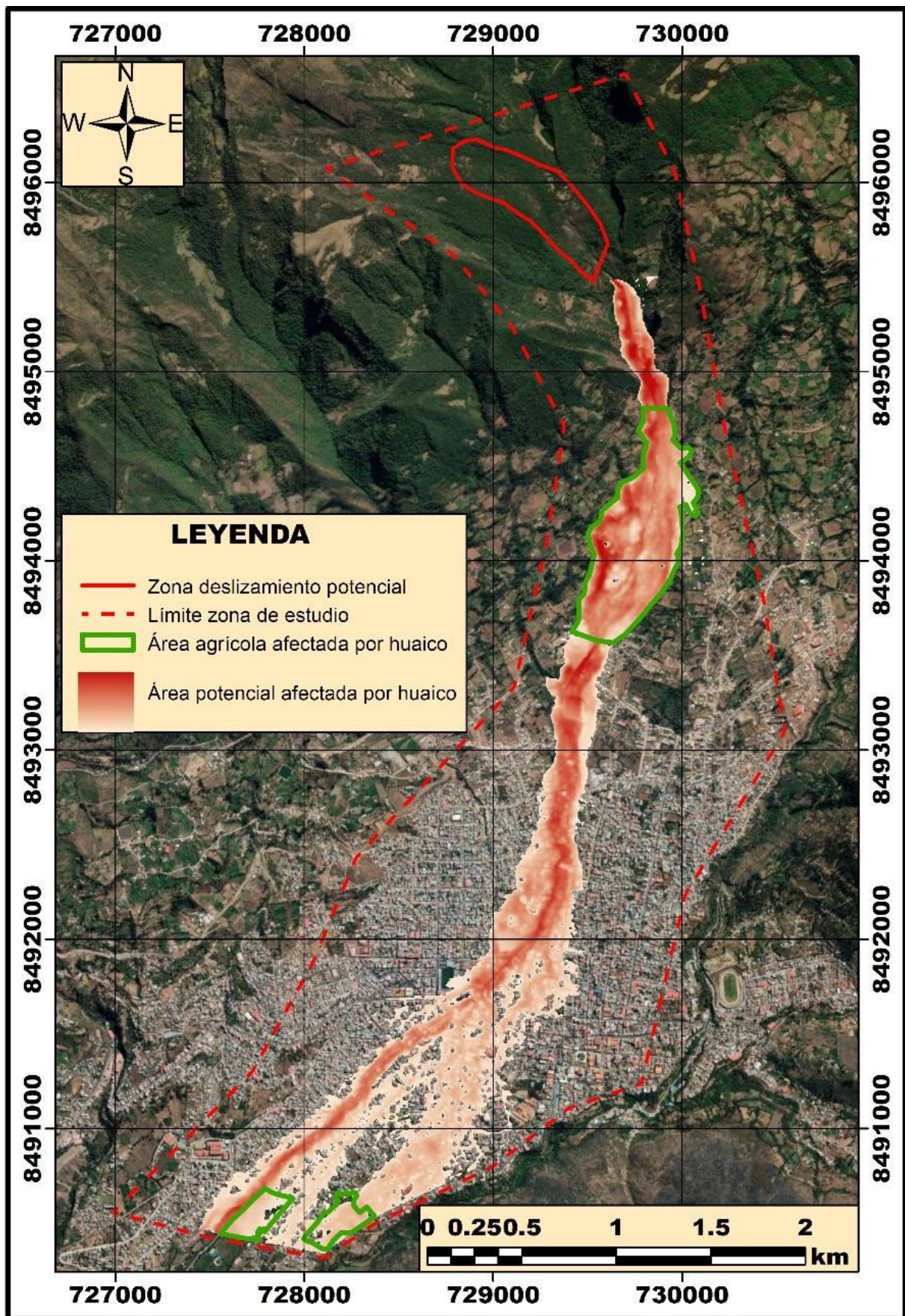


Figura 31 — Huella de inundación del huaico simulado, del potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata – Sahuanay

Conforme continúa su desplazamiento, el cauce vuelve a estrecharse, alcanzando finalmente la zona urbana, donde se estima que podría impactar un área de 152,32 hectáreas y afectar a una población aproximada de 306 habitantes, según una densidad promedio de 200,58 habitantes por kilómetro cuadrado (dato referencial para el distrito de Abancay), además de causar daños materiales significativos. Es importante mencionar que esta estimación poblacional es teórica, basada en promedios. El número real de personas afectadas dependerá de varios factores, como la distribución real de los habitantes (algunas áreas pueden estar más densamente pobladas que otras), el tipo de construcciones en la zona y el momento en que ocurra el fenómeno ya sea durante el día o en la noche. Al pie de la zona de estudio afecta 9,70 ha de áreas agrícolas.

En la figura 32 el mapa permite observar con claridad el trayecto que seguiría un evento de este tipo, el cual tendría su origen en una zona de alta inestabilidad geológica al norte del área de estudio.

El punto de inicio del flujo se localiza en el cerro Chuyllurpata, ubicado en la parte alta de la quebrada Sahuanay. Desde ahí, el material se desplazaría pendiente abajo siguiendo una dirección predominante de noreste a suroeste.

Durante su descenso, el flujo atravesaría primero áreas con menor ocupación urbana; sin embargo, conforme avanza, se canaliza y penetra directamente en la zona urbana consolidada de Tamburco y Abancay, incrementando considerablemente su nivel de peligro.

El recorrido total del flujo en la zona de estudio supera los 4 km, desde su origen hasta las partes más bajas de la ciudad de Abancay. Asimismo, se observa que se ensancha en zonas relativamente planas y se estrecha al seguir quebradas naturales

o vías principales, lo que evidencia que tanto la topografía como la traza urbana condicionan su comportamiento y velocidad.

El flujo cortaría de manera transversal las principales vías de conexión, lo que podría dejar sectores incomunicados y complicar las labores de evacuación, atención de emergencias y rescate.

La zona marcada como de alto potencial de deslizamiento cubre manzanas completas en áreas céntricas y del sector sur del mapa, lo que sugiere daños severos o incluso la destrucción total de viviendas e infraestructura pública.

El recorrido del flujo coincide con sectores donde se concentran redes de agua potable, alcantarillado y tendido eléctrico, lo que podría provocar el colapso de los servicios esenciales a nivel urbano, afectando incluso áreas no impactadas directamente.

El plano evidencia que el flujo no pierde energía en la zona alta; por el contrario, se intensifica y se expande al alcanzar las coordenadas aproximadas 8492000 N y 728000 E, comprometiendo sectores estratégicos de la ciudad de Abancay.

En la zona de Tamburco el flujo es más estrecho, pero lleva mayor velocidad y energía.

El análisis del plano (Fig. 32) evidencia que el recorrido del flujo interseca áreas donde se localizan instituciones educativas, incrementando el riesgo para la población escolar, como es el caso de la institución educativa Miguel Grau que es afectado por el trayecto descendente del flujo que afecta el entorno inmediato de este colegio. La cercanía del flujo supone una amenaza significativa tanto para la infraestructura como para la comunidad educativa.



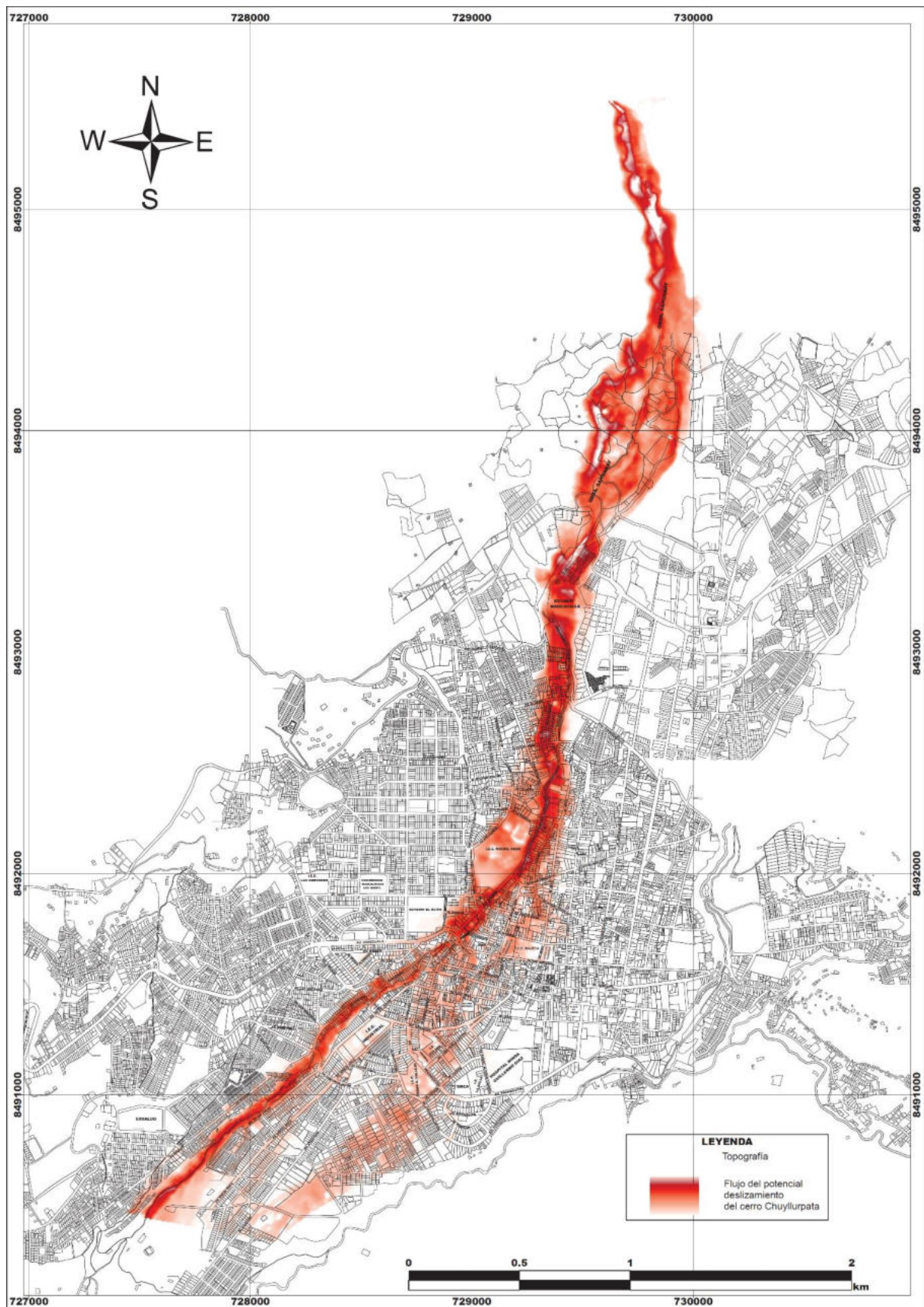


Figura 32 – Simulación del flujo de masa por deslizamiento del cerro Chuyllurpata sobre las ciudades de Tamburco y Abancay

5.1.4 Resultados del potencial deslizamiento en el cerro Chuyllurpata y sus implicaciones

5.1.4.1 Causas que podrían generar un deslizamiento en cerro Chuyllurpata

El cerro Chuyllurpata presenta un riesgo constante de deslizamiento debido a una combinación de factores que actúan de forma conjunta: condiciones del terreno, presencia de agua, geología, y en menor medida, la intervención humana y la cobertura vegetal.

5.1.4.1.1 Factores geológicos

En las laderas del cerro Chuyllurpata y en la quebrada Sahuanay se encuentran diversos tipos de sedimentos aluviales, fluviales, proluviales, coluviales y deluviales que, al ser poco consolidados, tienen escasa cohesión y son fácilmente arrastrados por la lluvia. Además, la estructura geológica del cerro está compuesta por lutitas, calizas, areniscas y arcillas rojas, cubiertas por una capa de material suelto. Cuando esta mezcla se satura con agua, pierde resistencia, lo que incrementa considerablemente el riesgo de deslizamiento. Por si fuera poco, esta zona ha estado marcada por fuertes procesos tectónicos durante el cuaternario, lo que ha dejado una base naturalmente inestable y propensa a los movimientos en masa (INGEMMET, 2019; Villacorta, et al. 2013; INGEMMET, 1997).

5.1.4.1.2 Factores hidrológicos

Existen antecedentes claros que muestran cómo las lluvias intensas pueden detonar deslizamientos en la zona, como ocurrió en los años 1951 y 2012. Cuando el agua penetra los depósitos coluviales y morrénicos, puede transformar un movimiento lento en un huaico o avalancha. Además, la quebrada Sahuanay tiene tramos con pendientes muy pronunciadas, lo que favorece flujos rápidos con gran capacidad de arrastre, que erosionan con fuerza el terreno. También se han identificado fuentes de agua que podrían



estar conectadas a antiguas fallas geológicas, lo que añadiría un factor adicional de inestabilidad. A esto se suma que la infraestructura de canalización es limitada o deficiente; varias de las obras existentes en la quebrada parecen no estar preparadas para resistir lluvias extremas, lo cual aumenta aún más el riesgo (INGEMMET, 2009; INGEMMET, 2019; Villacorta, et al. 2013).

5.1.4.1.3 Factores topográficos

El terreno en esta zona es bastante accidentado, con inclinaciones que en muchas áreas superan el 50 %, especialmente en los puntos donde suelen iniciarse los deslizamientos. La abrupta variación de altura en el lecho de la quebrada y las laderas que la rodean facilita la erosión y el debilitamiento de las pendientes, favoreciendo desprendimientos (INGEMMET, 2023; INGEMMET, 2019).

5.1.4.1.4 Influencia humana y vegetación

Aunque las actividades humanas no son la causa directa del problema, el crecimiento urbano desordenado, sobre todo en zonas frágiles de Tamburco y Abancay, aumenta el nivel de exposición y vulnerabilidad. Además, si llegara a producirse un deslizamiento, los bosques de coníferas que crecen en el cauce podrían actuar como una barrera natural, reteniendo parte del material. Sin embargo, esta retención también podría provocar una acumulación peligrosa, incrementando el volumen del flujo y, con ello, la magnitud del daño (VOLONTÉ, et al., 2018; INGEMMET, 2012).

5.1.4.2 Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata ocasionaría daños en la quebrada Sahuanay - Tamburco – Abancay

El cerro Chuyllurpata representa un riesgo real de deslizamiento. Esta amenaza no es nueva: ya se han registrado eventos en los años 1951 y 2012. Las condiciones del terreno, la composición del suelo y las intensas



lluvias que suelen caer en la zona aumentan la posibilidad de que un nuevo deslizamiento ocurra. A través de modelaciones digitales y simulaciones especializadas, se ha podido estimar el comportamiento de este fenómeno si se repitiera hoy, considerando un periodo de retorno de 100 años.

El volumen de material que podría deslizarse supera los 7 millones de metros cúbicos, cubriendo un área de más de 142 hectáreas a lo largo de casi 6 kilómetros de recorrido cuesta abajo. El flujo empezaría con fuerza desde las partes altas del cerro Chuyllurpata y descendería por la quebrada Sahuanay, ganando velocidad y volumen.

El huaico no solo arrastraría tierra, piedras, lodo y agua, además afectaría directamente a viviendas, cultivos, vías y personas.

En el distrito de Tamburco, se verían afectados los sectores rurales como Antabamba Baja, Sahuanay, Maucacalle, Juan Pablo II y Miraflores. Muchas de estas zonas están construidas sobre terrenos frágiles, cerca y sobre el cauce (Fig. 15).

En el distrito de Abancay, el deslizamiento impactaría, barrios tradicionales y zonas urbanas como el Arco, Ampay, Las Torres, Las Américas, Patibamba (en todas sus zonas), Vallecito El Olivo, Pueblo Libre, entre otras. Instituciones educativas, calles, avenidas principales (como Brasil, Venezuela, Chile, Cuatro de Noviembre) y redes básicas de infraestructura.

Se ha detectado muchas viviendas construidas sobre el cauce de la quebrada, lo cual no solo incrementa el riesgo para quienes bien allí, sino que el huaico se desborde y afecte zonas aún más amplias.

La simulación también mostró que las zonas más críticas se encuentran cerca del estadio Maucacalle, entre los puentes Cuatro de Noviembre, Chinchichaca y El Olivo, hasta alcanzar zonas urbanas de Abancay. En todos estos tramos, el agua se desbordaría por ambos lados del cauce, arrastrando todo a su paso.



El cerro Chuyllurpata guarda en su geografía una amenaza latente. Con base en los estudios realizados, se ha podido identificar con claridad las zonas de mayor riesgo. Ahora, más que nunca, es clave que esta información sea tomada en cuenta por las autoridades y la población, para prevenir una tragedia como las que ya se vivieron en el pasado.

5.2 Discusión

Los deslizamientos registrados en el cerro Chuyllurpata durante la década de 1950 y en el 2012 no fueron eventos aislados. Más bien son señales claras de un problema complejo donde interactúan factores geológicos, hidrológicos, topográficos y humanos. Entender cómo se combinan estos elementos es clave para anticipar riesgos y planear un uso responsable del territorio en la región.

La lluvia se perfila como el principal factor desencadenante de estos deslizamientos. En investigaciones como la de ARISTIZÁBAL, et al. (2011), “se destaca que la acumulación sostenida de precipitaciones puede activar estos procesos”. De hecho, LUGO-HUBP, et al. (2005) y REN (2024) “coinciden en que cerca del 90 % de estos eventos se deben a la lluvia”.

Uno de los procesos más críticos es la infiltración del agua en el suelo. Según ZHIPENG, et al. (2018), esto depende de la profundidad del terreno y su forma. Cuando el agua penetra al subsuelo, genera presiones internas que desequilibran la resistencia del material, especialmente en pendientes pronunciadas. Al mismo tiempo, reduce la succión del suelo, una fuerza vital para su estabilidad, lo que deja al talud más propenso a ceder.

MÉNDEZ, et al. (2011) identificaron un “punto crítico” en el cual la concentración de agua disminuye bruscamente la capacidad del terreno para resistir, creando condiciones ideales para flujos intensos de detritos”.

La cohesión del suelo su capacidad para mantenerse unido también juega un papel determinante. Cuando esta cohesión se ve afectada por la saturación o cambios estructurales, la ladera pierde estabilidad.

Otros elementos decisivos son las aguas subterráneas. Según VILLACORTA, et al.



(2016), “tanto el agua superficial como la subterránea influyen directamente en la dinámica hidrogeológica de Abancay. La recarga de acuíferos alimentada por las lluvias y su interacción con estructuras urbanas requiere especial atención”.

La geología del cerro Chuyllurpata y la quebrada Sahuanay está conformada por materiales muy inestables. DÍAZ (2013) “señala que las zonas más frágiles corresponden a depósitos cuaternarios, generados por movimientos tectónicos y eventos pasados”. VILLACORTA, et al. (2019) “especifican que estos depósitos incluyen materiales aluviales, fluviales, coluviales y proluviales, siendo estos últimos especialmente susceptibles a reactivarse”.

La mezcla de grava, arena, limo y arcilla en el suelo también marca la diferencia. Bajo saturación, esta composición pierde resistencia, facilitando el inicio de deslizamientos.

A esto se suma la topografía abrupta del área, con alturas que van desde los 2600 hasta los 3350 m y pendientes que superan el 50 % en varios sectores. Según MARCANO y CARTAYA (2013), “la inclinación y la cubierta superficial del terreno son factores clave para estos eventos”. SEPÚLVEDA, et al. (2016) “además indican que, en laderas cóncavas, el agua tiende a acumularse, saturando aún más el suelo”.

El crecimiento urbano desordenado en Abancay ha ampliado la exposición de la población. Casas levantadas sin considerar las condiciones del terreno se transforman en puntos de vulnerabilidad.

SÁNCHEZ (2011) “recuerda que los desastres por remociones en masa no provienen solo de eventos naturales como la lluvia, sino también de la presión sobre territorios frágiles”. O’CONNOR (2008) “va más allá, afirmando que los desastres no son completamente “naturales”: las decisiones humanas y las condiciones sociales ignoradas amplifican el riesgo. La verdadera prevención debe apuntar a reducir esa vulnerabilidad social”.

Un caso ilustrativo es la microcuenca del río Mariño, en la quebrada Sahuanay. En 2012, un gran flujo de masa activado por lluvias intensas afectó gravemente Sahuanay, Tamburco y Abancay. Según RODRÍGUEZ, et al. (2019), “esas precipitaciones anómalas del verano austral 2011–2012 desencadenaron escombros con impactos severos en infraestructura y población”.



Los deslizamientos en Chuyllurpata, especialmente en los años 1951 y 2012, han dejado huellas visibles: el primero causó un movimiento vertical, mientras el segundo generó un desplazamiento horizontal con una grieta, de unos 530 m de longitud.

El posible desprendimiento futuro del cerro Chuyllurpata representa un serio riesgo para Sahuanay y las comunidades de Tamburco y Abancay. Este análisis se sustenta en observaciones de campo, registros históricos y fundamentos geológicos e hidrológicos. Se estima una zona potencial de riesgo de aproximadamente 27,20 ha, con un volumen potencial deslizable de 3 216 233 m³. Con modelos en HEC-RAS v.6.7, se proyectó un escenario de periodo de retorno de 100 años con 93 509 m³ y un caudal pico de 8,81 m³/s. En condiciones actuales, un flujo con concentración volumétrica del 45 % podría recorrer casi 6 km y afectar cerca de 142,29 ha.

Las áreas posiblemente afectadas en Tamburco incluyen: Sahuanay, Maucacalle, Juan Pablo II, Antabamba Baja, Tinyarumi y Miraflores; en Abancay: Maucacalle, El Arco, Las Torres, Ampay, Chinchichaca, Patibamba y Las Américas. INDECI (2007) advierte que el crecimiento urbano desordenado ha situado a estas zonas en mayor peligro.

Abancay recibe en promedio 598 mm de lluvia anual, concentrada entre octubre y marzo. SAMPAIO DE ALMEIDA, et al. (2018) “explican que la infiltración y la presión hídrica profunda disminuye la resistencia del suelo. Modelos reológicos como Bingham, O’Brien o Herschel-Bulkley permiten entender cómo varía la viscosidad de lodos y escombros”. Según MATTHIAS y HUNGR (2005), “los flujos de detritos son los más peligrosos por su rapidez, fuerza e imprevisibilidad”.

En resumen, comprender el riesgo en Chuyllurpata requiere integrar conocimientos geológicos, hidrológicos, geomorfológicos, geográficos, sociales y reológicos. Estos fundamentos, respaldados por estudios, son esenciales para diseñar estrategias de mitigación eficaces en Tamburco y Abancay.



CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A partir del análisis integral desarrollado en el informe de investigación: potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, se establecen las siguientes conclusiones, las cuales responden de manera directa a los objetivos y a las hipótesis planteadas en la investigación.

1. La investigación confirma que el cerro Chuyllurpata presenta un alto riesgo de deslizamiento, lo que respalda plenamente la hipótesis general planteada. Se determinó que existen condiciones geológicas y geomorfológicas específicas que favorecen la ocurrencia de este fenómeno, con la posibilidad de generar impactos severos en la quebrada Sahuanay. La presencia de una zona de inestabilidad geodinámica activa, evidenciada por una grieta continua de aproximadamente 530 metros de longitud, así como los antecedentes históricos de movimientos registrados en los años 1951 y 2012, refuerzan la probabilidad de que se produzca un nuevo evento de gran magnitud.
2. El potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata responde a una combinación de factores naturales y antrópicos, lo que confirma la hipótesis específica correspondiente. Entre los factores naturales más relevantes se encuentran la inestabilidad geológica del terreno, caracterizada por la presencia de materiales inconsolidados, la fuerte pendiente del cerro, que supera el 50 % en las zonas de inicio del movimiento, y las precipitaciones intensas propias de la región, las cuales incrementan la saturación del suelo y disminuyen su capacidad de resistencia. A estos factores se suma la acción humana, principalmente el crecimiento urbano desordenado en los distritos de Tamburco y Abancay, que ha incrementado de manera significativa la exposición y la vulnerabilidad de la población frente a este tipo de peligros naturales.



3. En caso de producirse un deslizamiento en el cerro Chuyllurpata, las consecuencias serían de alta gravedad, tal como lo confirma la evaluación de impacto realizada. Se estima que el evento movilizaría un volumen aproximado de 3,2 millones de metros cúbicos de material sólido. Los resultados del modelamiento hidráulico mediante el software HEC-RAS indican que el flujo resultante afectaría directamente áreas urbanas consolidadas, alcanzando una superficie aproximada de 204.31 ha. Asimismo, se identificaría un riesgo directo para una población estimada de 306 habitantes, además de daños severos en viviendas de adobe y material noble, así como en la infraestructura vial y los servicios básicos existentes en la quebrada Sahuanay.

6.2 Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos en el estudio y considerando los objetivos de evaluación y mitigación del riesgo asociados al posible deslizamiento del cerro Chuyllurpata, se proponen las siguientes recomendaciones, orientadas a reducir la vulnerabilidad de la población y minimizar los impactos ante un eventual evento de gran magnitud.

1. Se recomienda la implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) complementado con un monitoreo geológico permanente en el cerro Chuyllurpata. La identificación de una grieta de aproximadamente 530 metros de longitud, junto con la evidencia de inestabilidad activa en el área, hace indispensable que las municipalidades de Tamburco y Abancay adopten mecanismos técnicos de vigilancia continua. Este sistema debe incorporar sensores de movimiento en las zonas con pendientes superiores al 50 %, permitiendo detectar desplazamientos del terreno en tiempo real. La aplicación de esta medida contribuirá directamente al cumplimiento del objetivo general del estudio, ya que facilitará la toma de decisiones oportunas, como la evacuación preventiva de la población, reduciendo así los posibles daños planteados en la hipótesis general.
2. Se aconseja restringir de manera estricta el crecimiento urbano en las áreas identificadas como de alto potencial de deslizamiento, las cuales abarcan sectores completos de los distritos de Tamburco y Abancay. En concordancia con el objetivo específico de analizar los factores que influyen en el riesgo y con la hipótesis relacionada con la intervención humana, resulta prioritario formalizar la delimitación de la faja marginal de la quebrada Sahuanay. Asimismo, se debe promover la



reubicación progresiva de las familias que se encuentran en mayor situación de riesgo, considerando que el crecimiento urbano desordenado ha incrementado considerablemente la vulnerabilidad frente a un evento que podría movilizar hasta 32 millones de metros cúbicos de material.

3. Se propone el fortalecimiento y la ampliación de la infraestructura de canalización y defensa ribereña en la quebrada Sahuanay, dado que las obras existentes resultan insuficientes para enfrentar escenarios de lluvias intensas. Es necesario diseñar y construir diques de retención de sedimentos, así como ampliar la capacidad de los canales actuales, con el fin de controlar el flujo de material sólido y reducir el riesgo de desbordes. Esta recomendación responde al objetivo de evaluar y mitigar las consecuencias del posible deslizamiento y se sustenta en la hipótesis de que las precipitaciones intensas actúan como el principal detonante de huaicos destructivos. La infraestructura proyectada debe considerar los caudales obtenidos en la modelación realizada con HEC-RAS, especialmente en sectores críticos como el entorno de la institución educativa Miguel Grau, con el propósito de garantizar una mayor protección a la población y a la infraestructura existente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIYE, T., MASINDI, K., MENGISTU, H. y DEMLIE, M., 2018. Understanding the groundwater-level fluctuations for better management of groundwater resource: a case in the Johannesburg region. *Groundwater for Sustainable Development*, ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2018.02.004.
- AGUIRRE PE, J., MONCADA, A.T. y OLIVERO, N.M.L., 2000. Flujo y Deposición de Barros y Escombros. *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 15, no. 3, ISSN 01864076.
- ALFARO LOPEZ, I., 2018. Parametrización de Cálculos de Caudales por Métodos de Relación Precipitación - Ecorrentía. [en línea], Disponible en: https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_356.pdf.
- ANCEY, C., 2013. Debris Flows. *Flash Floods*, DOI 10.1007/978-94-007-5164-4_9.
- ARISTIZÁBAL, É., 2008. Características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio El Socorro (31 de mayo de 2008) en Medellín. *Revista EIA*, vol. 10, ISSN 17941237.
- ARISTIZÁBAL, E., RIAÑO, F. y JIMÉNEZ ORTIZ, J., 2022. Umbrales de lluvia como detonante de movimientos en masa en el piedemonte de la cordillera Central en los Andes colombianos. *Boletín de Geología*, vol. 44, no. 2, ISSN 0120-0283. DOI 10.18273/revbol.v44n2-2022009.
- BAHSAN, E., LIAO, H.J., CHING, J. y LEE, S.W., 2014. Statistics for the calculated safety factors of undrained failure slopes. *Engineering Geology*, vol. 172, ISSN 00137952. DOI 10.1016/j.enggeo.2014.01.005.
- BECERRA YOMA, N. y MENDOZA INZUNZA, L., 2021. Inteligencia artificial aplicada a la medicina respiratoria. *Revista chilena de enfermedades respiratorias* [en línea], vol. 37, no. 271-274, ISSN 0717-7348. DOI <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-73482021000300271>. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73482021000400271.
- BHANDARI, B.P. y DHAKAL, S., 2020. Compositional analysis and phase relations of soil mass from the active landslides of Babai River watershed, Siwalik zone of Nepal. *Engineering Geology* [en línea], vol. 278, ISSN 00137952. DOI 10.1016/j.enggeo.2020.105851. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105851>.
- BRAKENSIEK, D.L. y RAWLS, W.J., 1994. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, vol. 23, no. 1-2, ISSN 03418162. DOI 10.1016/0341-8162(94)90056-6.
- BRICKER, S.H., BANKS, V.J., GALIK, G., TAPETE, D. y JONES, R., 2017. Accounting for groundwater in future city visions. *Land Use Policy*, vol. 69, no. July, ISSN 02648377. DOI 10.1016/j.landusepol.2017.09.018.
- CANARIA, A.G., [sin fecha]. Tipos de lluvia Lluvia convectiva. ,
- CAPRA, L., LUGO-HUBP, J. y D??VILA-HERN??NDEZ, N., 2003. Fen??menos de remoci??n en masa en el poblado de Zapotitl??n de M??ndez, Puebla: Relaci??n entre litolog??a y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 20, no. 1, ISSN 10268774.
- CARMENATES, Y.A. y GUARDADO-LACABA, R., 2006. EL TERRITORIO DE MOA , CUBA Type of the landslide developed in the territory of Moa , Cuba. ,
- CASTILLO, G.B., 2011. La Zonificación de amenaza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el Valle del Río Sixaola. ,
- CHANG, F.J., HUANG, C.W., CHENG, S.T. y CHANG, L.C., 2017. Conservation of groundwater from over-exploitation—Scientific analyses for groundwater resources management. *Science of the Total Environment*, vol. 598, no. 1, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.04.142.
- CHAVERRA, F., ARISTIZ, H. y DANIEL, J., 2025. Analisis Con HEC-RAS 2d de Eventos



- Torrenciales , Caso Quebrada la Liboriana del Municipio de Salgar Analysis With HEC-RAS 2d Of Torrential Events , Case La Liboriana Creek Of The Municipality Of Salgar. [en línea], DOI <https://doi.org/10.3390/w11102048>. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/10/2048>.
- COLOMBIANA CRUZ ROJA, [sin fecha]. Boletín de Socorros. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://201.130.16.43/bitstream/handle/20.500.11762/18979/1517.pdf?sequence=1&is>.
- COMPAÑIA MINERA PODEROSA, S.A.C.M.P., 2019. Deslizamientos o derrumbes. [en línea], Disponible en: <https://www.poderosa.com.pe/Content/descargas/coleccionables/coleccionable-04-deslizamientos.pdf>.
- CONDORI, E. y PEÑA, F., 2016. El Agua subterránea del Manantial Marcamarca - Abancay, Estado Actual y Propuesta de Mejora. *Sociedad Geológica del Perú*,
- CONTRERAS FLORES, C.A., DUEÑAS GUEVARA, Y. y SEGUNDO MARCELIANO, J., 2017. Estudio hidrológico de maximas avenidas: Delimitación de la faja marginal de las quebradas afluente al río Mariño, en el ámbito del distrito de Abancay. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3821>.
- DARVELL, B.W., 2018. Rheology. *Woodhead Publishing Series in Biomaterials* [en línea], DOI 10.1016/B978-0-08-101035-8.50004-3. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081010358500043>.
- DASALLAS, L., KIM, Y. y AN, H., 2019. Case Study of HEC-RAS 1D-2D Coupling Simulation: 2002 Baeksan Flood Event in Korea. ,
- DAVID, J. y IGNACIO, J., 2011. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149222633009> . ,
- DAVILA B., S. y ZAVALA C., B., 1997. Inspección de riesgo geológico en el área de ccocha y Pumarana. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - Dirección General de Geología* [en línea], Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4026>.
- DI MAIO, R., SALONE, R., DE PAOLA, C., CARBONARI, R., CUSANO, D. y DE VITA, P., 2024. Geotechnical and geophysical property models of soil-covered slopes prone to landsliding. The case study of the Ischia Island (southern Italy). *Catena* [en línea], vol. 247, no. October, ISSN 03418162. DOI 10.1016/j.catena.2024.108509. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108509>.
- DIKAU, R., 2013. Mass-Movement Causes: Water. *Treatise on Geomorphology*, vol. 7, DOI 10.1016/B978-0-12-374739-6.00166-4.
- EL DIARIO COMERCIO, P., 2023. ¿Qué es una quebrada y cuáles se activaron en Lima por las intensas lluvias? [en línea]. Disponible en: <https://elcomercio.pe/respuestas/que-es-una-quebrada-y-cuales-se-activaron-en-lima-por-las-intensas-lluvias-lluvias-en-lima-senamhi-coen-revtli-noticia/>.
- ESPÍNDOLA CASTRO, V.H. y PÉREZ CAMPOS, X., 2018. Que Son Los Sismos. *Ciencia* [en línea], vol. 69, no. 3, Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/69_3/PDF/QueSonSismos.pdf.
- FRANQUET BERNIS, J.M., 2003. *Cinco temas de hidrología e hidráulica* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 84-9724-016-2. Disponible en: https://www.mendeley.com/catalogue/78628aa1-aa05-30be-8169-1a9032d7db3a/?utm_source=desktop&utm_medium=1.19.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B948c56e3-f6a4-491e-a209-fe0b69c588a3%7D.
- FUENTES, J.E., BOLAÑOS, J.A. y ROZO, D.M., 2012. Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite Ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* [en línea], vol. 41, no. 2, Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v41n2/v41n2a01.pdf>.
- GALINDO SERRANO, J.A. y ALCÁNTARA AYALA, I., 2015. Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: Análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, vol. 2015, no. 88, ISSN 01884611. DOI 10.14350/ig.43790.



- GÁMEZ MORALES, W.R., 2015. *Texto Básico Autoformativo de Topografía General* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional Agraria Managua, Nicaragua. ISBN 9789992410363. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/3179/1/NP31G192t.pdf>.
- GARATE-QUISPE, J., BEJAR CHURA, N., PILLCO SARDON, N., HERRERA-MACHACA, M. y DUEÑAS LINARES, H., 2022. Differences in Soil Infiltration Capacity in Two Vegetation Cover Types in the Peruvian Amazon. *Folia Amazonica* [en línea], vol. 31, no. 2, ISSN 24101184. DOI 10.24841/fa.v31i2.578. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/fa/v31n2/1018-5674-fa-31-02-227.pdf>.
- GARCÍA, B., AGUILAR, R., HUANCA, J. y ALBINEZ, L., 2018. *Evaluación Geológica-Geodinámica al Deslizamiento de Campanayocpata*. 2018. S.l.: s.n.
- GARGANTILLA VÁSQUEZ, A. y PÉREZ ÜBEDA, M., 2025. El papel del cirujano ortopédico en los desastres naturales. *Revista Española de Cirugía y Traumatología* [en línea], ISSN 0927-7757. DOI 10.1016/j.recot.2025.11.011. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127120>.
- GHODDOUSI, P. y SALEHI, A.M., 2017. The Evaluation of Self Compacting Concrete Robustness Based on the Rheology Parameters. *International Journal of Civil Engineering*, vol. 15, no. 8, ISSN 23833874. DOI 10.1007/s40999-017-0239-y.
- GIRALDO RAMÍREZ, W., ORDÓÑEZ CARMONA, O. y CLAVE, P., 2013. Problema Geotécnico Del Km 6 De La Autopista Medellín-Bogotá: Antecedentes, Causas Y Soluciones Alternativas Geotechnical Problem of the Km 6 on the Medellín-Bogotá Highway: Background, Causes and Alternative Solutions. , vol. 34,
- GOB.PE, [sin fecha]. Recomendaciones para prepararte de huaicos y aluviones. [en línea], Disponible en: <https://www.gob.pe/37566-recomendaciones-para-prepararte-de-huaicos-y-aluviones>.
- GONZÁLES, M.A., GIL, V. y GENTILI, J.O., 2023. Determinación de inicios de cauces a partir de modelos digitales de superficie. Cuenca alta del arroyo la Ventana (Buenos Aires, Argentina). *GeoFocus*, DOI <http://dx.doi.org/10.21138/GF.811>.
- GONZÁLEZ DÍAZ, E.F. y FOLGUERA, A., 2009. Los deslizamientos de la cordillera neuquina al sur de los 38° S: Su inducción. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 64, no. 4, ISSN 00044822.
- GRAZIA, S. y VIZOSO, T., [sin fecha]. Reflexiones sobre la inteligencia artificial y la bibliotecología Reflections on artificial intelligence and librarianship. [en línea], ISSN 1853-9912. DOI 10.24215/18539912e159. Disponible en: <https://doi.org/10.24215/18539912e159>.
- GUTHRIE, R.H., 2013. *Mass-Movement Style , Activity State , and Distribution*. S.l.: Elsevier Ltd. vol. 7. ISBN 9780123747396.
- HEC-RAS, 2019. Introduction (Taxonomy and Rheology of Debris Flows) I. [en línea], Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasmuddebris/non-newtonian-user-s-manual/introduction-taxonomy-and-rheology-of-debris-flows>.
- HEC-RAS, 2023. HEC-RAS Mud and Debris Flow. *Hydrologic Engineering Centre* [en línea], no. October, Disponible en: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS Mud and Debris Flow-v6.4.1.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%20Mud%20and%20Debris%20Flow-v6.4.1.pdf).
- HEC, 2025. River Analysis System HEC-RAS Mapper User Manual. *US Army Corps of Engineers*, no. February,
- HINOJOSA-CORONA, A., RODRÍGUEZ-MORENO, V.M., MUNGUÍA-OROZCO, L. y MEILLÓN-MENCHACA, O., 2011. El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 63, no. 1, ISSN 14053322.
- INAMHI, 1999. Lluvias Intensas Máximas. [en línea], Disponible en: <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-de-riesgos/meteorologicos/lluvias-intensas>.
- INGEMMET, 1997. Inspección de riesgo geológico en el área de Ccocha y Pumarana. . S.l.:

- INGEMMET, 2009. Inspección Técnica de Peligros Geológicos por Movimientos en Masa Provincias de Sanchez Carrión y Pataz, Región La Libertad. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3272>.
- INGEMMET, 2012. Evaluación del Flujo de Detritos de Tamburco. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1567>.
- INGEMMET, 2019. Evaluación Integral de la Cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico. *Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*. S.l.:
- INGEMMET, 2023. Evaluación de zonas críticas por peligros geológicos ante fenómeno el Niño 2023-2024 en el departamento de Lima Tomo II: Lima provincias. [en línea]. S.l.: Disponible en: https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//16932_informe-tecnico-n0-a7463-evaluacion-de-zonas-criticas-por-peligros-geologicos-ante-fenomeno-el-nino-2023-2024-en-el-departamento-de-lima-tomo-ii-lima-.pdf.
- INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL (INDECI), 2020. Recomendaciones Ante Peligros. *Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI* [en línea], Disponible en: <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2018/09/RECOMENDACIONES-PELIGROS-LLUVIA-INTENSA.pdf>.
- IVERSON, R.M., 1997. The Physics of Debris Flows. *Review of Geophysics*, vol. 35, no. 97,
- IVERSON, R.M., 2003. The debris-flow rheology myth. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings*, vol. 1,
- KROGULEC, E., 2017. Evaluating the risk of groundwater drought in groundwater-dependent ecosystems in the central part of the Vistula River Valley, Poland. *Ecohydrology and Hydrobiology*, vol. 18, no. 1, ISSN 20803397. DOI 10.1016/j.ecohyd.2017.11.003.
- LAIGLE, D. y BARDOU, E., 2022. *Mass-Movement Types and Processes: Flow-Like Mass Movements, Debris Flows and Earth Flows*. S.l.: s.n. ISBN 9780128182352.
- LAURA QUISPE, R., PINO VARGAS, E. y AVENDAÑO JIHUALLANGA, C., 2018. Nivel de riesgo por desborde e inundación aplicando un Modelo de Flujo de escombros en la quebrada Lluta para la Mina Karla en Tacna. *Ciencia & Desarrollo* [en línea], vol. 17, no. 2, ISSN 2617-6033. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/1332>.
- LAVROV, A., 2023. Flow of non-Newtonian fluids in single fractures and fracture networks: Current status, challenges, and knowledge gaps. *Engineering Geology* [en línea], vol. 321, no. May 2022, ISSN 00137952. DOI 10.1016/j.enggeo.2023.107166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107166>.
- LEON, A.S. y GOODELL, C., 2016. Environmental Modelling & Software Controlling HEC-RAS using MATLAB. *Environmental Modelling and Software* [en línea], vol. 84, ISSN 1364-8152. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.026>.
- LEÓN, L.I., RAVIOLO, M. y CATTANEO, D., 2020. *Procesos de transporte de las partículas. Comportamiento de los fluidos* [en línea]. 2020. S.l.: s.n. Disponible en: <https://fcen.uncuyo.edu.ar/catedras/procesos-de-transporte1.pdf>.
- LEYVA-DE-LA-CRUZ, B., GUILLEN-CAMPO, Y. y LAURENCIO-ALFONSO, L.H., 2016. Caracterización reológica de un lodo que se genera en el lavado de árido. *Ingeniería Mecánica* [en línea], vol. 19, no. 3, ISSN 1815-5944. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>.
- LI, K., YANG, J., WANG, J., WANG, Z., ZENG, Y., BORRELLI, P., HUBACEK, K., HU, Y., XU, B., FANG, N., ZENG, C., ZHOU, Z. y SHI, Z., 2024. Human-altered soil loss dominates nearly half of the water erosion in China but surges in agriculture-intensive areas. *One Earth* [en línea], vol. 7, no. 11, ISSN 25903322. DOI 10.1016/j.oneear.2024.09.001. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.09.001>.
- LIU, R.Z., NI, J.R., BORTHWICK, A.G.L., LI, Z.S. y WAI, O.W.H., 2006. Rapid zonation of abrupt mass movement hazard. Part II: Applications. *Geomorphology*, vol. 80, no. 3-4,



- ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2006.02.010.
- LUGO-HUBP, J., ZAMORANO-OROZCO, J., CAPRA, L., INBAR, M. y ALCÁNTARA-AYALA, I., 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: causas y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 22, no. 2, ISSN 10268774.
- LUQUE PINTO, R.C. y ALVA HURTADO, J.E., [sin fecha]. ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DE FLUJO DE ESCOMBROS. [en línea], no. 1, Disponible en: https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo35_a.pdf.
- MACHADO JÚNIOR, J., 2022. *Topografía básica en español* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9786500286755. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/359344028_TOPOGRAFIA_BASICA_EN_ESPANOL.
- MAINSANT, G., CHAMBON, G., JONGMANS, D., LAROSE, E. y BAILLET, L., 2015. Shear-wave-velocity drop prior to clayey mass movement in laboratory flume experiments. *Engineering Geology*, vol. 192, ISSN 00137952. DOI 10.1016/j.enggeo.2015.03.019.
- MARCANO MONTILLA, A. y CARTAYA, S., 2013. Zonificación de la amenaza por procesos de remoción en masa originados por las precipitaciones entre Camurí Chico y Punta Tigrillo, estado Vargas, Venezuela. , vol. 37,
- MARTÍNEZ OLMEDO, V.A., 2022. *Aplicación y comparación modelos de flujos detríticos, FLO-2D y HEC-RAS a quebradas Acerilla y la Mesilla, cuenca del río Huasco, eventos marzo 2015*. S.l.: s.n.
- MAULA, B.H. y ZHANG, L., 2011. Assessment of embankment factor safety using two commercially available programs in slope stability analysis. *Procedia Engineering*, vol. 14, ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2011.07.070.
- MÉNDEZ-SÁNCHEZ, A.F., PÉREZ-TREJO, L., SÉNCHER-CRUZ, P. y MERCADO, A.M.P., 2011. Determinación del esfuerzo de cedencia para suelos vulnerables a movimientos de remoción de masa originados por las lluvias. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 63, no. 2, ISSN 14053322.
- MENDIZÁBAL BERMÚDEZ, G., 2015. La seguridad social ante los retos del cambio climático. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado* [en línea], vol. 2015, no. 143, ISSN 00418633. DOI 10.22201/ijj.24484873e.2015.143.4943. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2015.143.4943>.
- MILLAN-ARANCIBIA, C. y LAVADO CASIMIRO, W., 2023. Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 23, no. 3, ISSN 16849981. DOI 10.5194/nhess-23-1191-2023.
- MIRZOYAN, N., AVETISYAN, N., MNATSAKANYAN, H. y TADEVOSYAN, L., 2018. Groundwater use and efficiency in small- and medium-sized aquaculture farms in Ararat Valley, Armenia. *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 6, no. July 2017, ISSN 2352801X. DOI 10.1016/j.gsd.2017.09.001.
- MORA C., S. y VAHRSON, W.G., 1994. Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. xxxi, no. 1, ISSN 1078-7275. DOI 10.2113/gseegeosci.xxxi.1.49.
- MORA ORTIZ, R.S. y ROJAS GONZÁLES, E., 2012. The Effect of Saturation on the Slope Sliding in the San Juan de Grijalva Community, Chiapas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XIII, no. 1, ISSN 1405-7743.
- MORBIDELLI, R., SALTALIPPI, C., FLAMMINI, A. y GOVINDARAJU, R.S., 2018. Role of slope on infiltration: A review. *Journal of Hydrology*, vol. 557, no. January, ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2018.01.019.
- MORENO ALCIVAR, L.C., 2022. Identification of Landslide types in cliffs between Ancon and Anconcito, Santa Elena, Ecuador. *Manglar* [en línea], vol. 19, no. 3, ISSN 18167667. DOI 10.17268/manglar.2022.031. Disponible en:



- http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2414-10462022000300247&lng=es&nrm=iso.
- MORENO, E., 2014. *Elementos finitos mixtos estabilizados para flujos viscoplásticos*. S.l.: Universidad Politécnica de Catalunya - Barcelona.
- MORENO, E. y CERVERA, M., 2016. Elementos finitos mixtos estabilizados para flujos confinados de Bingham y de Herschel-Bulkley. Parte I: Formulación. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria* [en línea], vol. 32, no. 2, ISSN 1886158X. DOI 10.1016/j.rimni.2015.02.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2015.02.004>.
- NACIONAL, I.G., 2015. Geomorfología. [en línea]. Disponible en: <https://atlasnacional.ign.es/wane/Geomorfología>.
- NAIDU, S., SAJINKUMAR, K.S., OOMMEN, T., ANUJA, V.J., SAMUEL, R.A. y MURALEEDHARAN, C., 2017. Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. *Geoscience Frontiers*, ISSN 16749871. DOI 10.1016/j.gsf.2017.10.008.
- NÚÑES RAMOS, C.A., 2018. *Un método combinado de Newton Semi-smooth y conjuntos de nivel para la simulación numérica de fluidos tipo Bingham con frontera libre*. S.l.: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - QUITO.
- O'BRIEN, J.S., 2003. FLO2D User's Manual. , no. July,
- OROPEZA, F. y SANTANDER, D., 2014. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347733745007> ,
- PARRA VÁSQUEZ, C.J., 2024. *Análisis comparativo de la modelación hidráulica de flujos newtonianos y no-newtonianos en HEC-RAS para el modelamiento de avenidas torrenciales. Caso de estudio: Quebrada Botijas (Santander)* [en línea]. S.l.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/87e42e0b-44d0-4b2a-9bd3-f8fe0163d6eb>.
- PONCE, V.M., 2017. *Drenaje de carreteras* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: https://ion.sdsu.edu/drenaje_de_carreteras_c.html.
- PORTILLO, G., 2024. Lluvia: qué es, cómo se forma, tipos y como se mide. *Ecología verde* [en línea], Disponible en: <https://web.archive.org/web/20240331110837/https://www.ecologiaverde.com/termoclin-a-que-es-tipos-y-como-se-forma-4760.html> <https://www.ecologiaverde.com/termoclina-que-es-tipos-y-como-se-forma-4760.html>.
- PRATAMA, F., WULANDARI, S. y ROHMAT, F.I.W., 2025. Modeling sediment accumulation in Pare Reservoir using HEC-RAS 2D: Assessing storage capacity over a 10-year period. *Results in Engineering* [en línea], vol. 25, no. November 2024, ISSN 25901230. DOI 10.1016/j.rineng.2025.104333. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104333>.
- QUIROZ, W., VILLEGAS-LANZA, J., MOROCCOIRE, K., BALLADARES, O. y BERDUZCO, M., 2024. Evaluación de la cinemática del deslizamiento de Cuenca en los Andes de Perú central mediante técnicas fotogramétricas y geodésicas. *Revista de teledetección* [en línea], DOI <https://doi.org/10.4995/raet.2024.21785>. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5600>.
- QUIROZ, W., VILLEGAS, J.C., GOMEZ, J.C. y VIVANCO, P., 2018. Propuesta de aplicación de métodos geodésicos y geofísicos para el estudio de deslizamientos de tierra: Caso Cuancabamba. *Boletín de la Sociedad Geologica del Perú* [en línea], Disponible en: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091.
- RABIE, M., 2014. Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *HBRC Journal*, vol. 10, no. 2, ISSN 16874048. DOI 10.1016/j.hbrj.2013.10.002.



- RAMOS-CAÑÓN, A.M., TRUJILLO-VELA, M.G. y PRADA-SARMIENTO, L.F., 2015. Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y Proyectos*, vol. 18, ISSN 0718-2813. DOI 10.4067/S0718-28132015000200006.
- REN, Y., CHEN, X. y SHANG, Y., 2024. Study on the influence of rainfall infiltration on the stability of dump slope. *Desalination and Water Treatment* [en línea], vol. 319, no. March, ISSN 19443986. DOI 10.1016/j.dwt.2024.100492. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100492>.
- RODRIGUEZ ROBLES, J., [sin fecha]. Lluvias intensas:¿Qué son huaicos, desbordes, inundaciones y otros peligros asociados? [en línea]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-lluvias-intensas-¿que-son-huaicos-desbordes-inundaciones-y-otros-peligros-asociados-1020097.aspx>.
- RUSSELL, S. y NORVING, P., 2008. *Inteligencia Artificial Un Enfoque Moderno* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN ISBN: 978-84-205-4003-0. Disponible en: <https://luismejias21.files.wordpress.com/2017/09/inteligencia-artificial-un-enfoque-moderno-stuart-j-russell.pdf>.
- RUT JAIME, P., DANIEL SPALLETI, P. y DANIEL BREA, J., [sin fecha]. Simulación de flujo de barro: caso de estudio del río Iruya. [en línea], Disponible en: http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index_archivos/B/6.pdf.
- SALAS PASCUAL, M., FERNÁNDEZ NEGRÍN, E., QUINTANA VEGA, G. y DEL ARCO AGUILAR, M.J., 2017. Efecto de la inclinación y pedregosidad sobre el reparto del agua de lluvia, su cuantificación y aplicación al estudio de la vegetación en zonas áridas. *Investigaciones Geograficas* [en línea], vol. 2017, no. 92, ISSN 01884611. DOI 10.14350/rig.55204. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.55204>.
- SALGADO, G., 2007. Flujo de lodos y debris. [en línea], no. 4, Disponible en: <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1332>.
- SAMPAIO DE ALMEIDA, W., PANACHUKI, E., SANCHES DE OLIVEIRA, P., MENEZES, R. da S., ALVES, T. y FONSECA DE CARVALHO, D., 2018. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, vol. 175, no. June 2017, ISSN 01671987. DOI 10.1016/j.still.2017.07.009.
- SIERRA LOPINTA, H.W., 2022. *Modelamiento Hidráulico Bidimensional de un tramo del río Pativilca, en flujo no permanente* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: https://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/187/3/2017_Puicon_Evaluacion-resistencia-natural.pdf.
- SNET, SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES, E.S., [sin fecha]. SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL AREA DE GEOLOGIA Generalidades acerca de los deslizamientos de tierra . Deslizamientos de Tierra. [en línea], Disponible en: <https://www.snet.gob.sv/Geologia/Deslizamientos/Info-basica/3-generalidades.htm>.
- SONCCO CALSINA, Y.H., 2015. Evaluación de peligros geológicos por flujos en el asentamiento humano Isidoro Berrocal Coronado. [en línea], Disponible en: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/4261/5/A7317-Evaluacion_peligros_A.H.Isidoro_Berrocal-Arequipa.pdf.
- SOUSA FREIRE DE MELO, M.L., 2022. *Sensibilidad a parámetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de Rejeitos de Mineracao* [en línea]. S.l.: Universidad Federal de Minas Gerais. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1843/55006>.
- STAHN, H. y TOMINI, A., 2017. On conjunctive management of groundwater and rainwater. *Resource and Energy Economics*, vol. 49, ISSN 09287655. DOI 10.1016/j.reseneeco.2017.05.002.
- TANNER, R.I., 2009. The changing face of rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 157, no. 3, ISSN 03770257. DOI 10.1016/j.jnnfm.2008.11.007.
- TARBUCK, E.J. y FREDERICK, K.L., 2005. *Ciencias de la Tierra Una introducción a la geología física* [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9788483226902. Disponible en:



- <https://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>.
- TUÑOQUE ZELA, W.A., 2023. Riesgo cuantitativo por flujo de detritos desencadenados por precipitaciones pluviales en la microcuenca Sahuanay, distrito de Tamburco-Abancay-Apurímac, 2023. . S.l.:
- TURNBULL, B., BOWMAN, E.T. y MCELWAIN, J.N., 2015. Debris flows: Experiments and modelling. *Comptes Rendus Physique* [en línea], vol. 16, no. 1, ISSN 16310705. DOI 10.1016/j.crhy.2014.11.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2014.11.006>.
- ÚBIDA RIVERA, JOSÉ SATURNINO; DELGADO DALLATORRE, Y., 2018. La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *AgEcon Search* [en línea], vol. 4, no. 7, DOI <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>. Disponible en: [url: http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/394/3941754001/index.html](http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/394/3941754001/index.html).
- VALDERRAMA, P., VILLACORTA, S., MADUEÑO, M. y CHUMBE, R., 2012. Origen y dinámica de los flujos de detritos del cerro Chuyllurpata y su implicancia en la seguridad física de la ciudad de Abancay - Apurímac. *Repositorio Institucional INGEMMET* [en línea], Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3252>.
- VALDIVIA, R., TOSETTI, T., ESPINOZA, A., SUSCEPTIBILIDAD MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE SOCOROMA, C. DE y ANDINA ARICA Y PARINACOTA, P. DE, 2014. Redalyc.SUSCEPTIBILIDAD DE MOVIMIENTOS EN MASA EN EL VALLE DE SOCOROMA, PRECORDILLERA ANDINA DE ARICA Y PARINACOTA. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371333937004>.
- VERDEGAY, J.L., LAMATA, M. T., PELTA, D. y CRUZ, C., 2021. Inteligencia artificial y problemas de decisión: la necesidad de un contexto ético. *Suma de Negocios* [en línea], vol. 12, no. 27, ISSN 2215910X. DOI 10.14349/sumneg/2021.V12.N27.A2. Disponible en: <http://revistasumadenegocios.konradlorenz.edu.co/vol12-num-27-2021-inteligencia-artificial-y-problemas-de-decision-la-necesidad-de-un-contexto-etico/>.
- VILLACORTA CHAMBI, S.P., PEÑA LAUREANO, F., JAIMES SALCEDO, F., SOSA SENTICALA, N.L., CONDORI QUISPE, E., PARI PINTO, W., LUZA HUILLCA, C.A. y RODRIGUEZ MORATA, C., 2019. Evaluación Integral de la Cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geohidrológico. *INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N°71* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2409>.
- VILLACORTA, S., PEÑA, F., JAIMES, F., RODRIGUEZ, C., LUZA, C. y PARI, W., 2016. ESTUDIO INTEGRAL DIRIGIDO A LA EVALUACIÓN DE EVENTOS GEOHIDROLÓGICOS Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE ABANCAY (PERÚ). *Sociedad Geológica del Perú* [en línea], Disponible en: https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG18-39.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- VILLACORTA, S., RODRIGUEZ, C., PEÑA, F., JAIMES, F. y LUZA, C., 2016. Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú). [en línea], vol. 32, ISSN 1666-9479. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/scg/v32n1/v32n1a02.pdf>.
- VILLACORTA, S., RODRÍGUEZ, C., PEÑA, F., JAIMES, F. y LUZA, C., 2016. Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú). *Serie Correlación Geológica*, vol. 32, ISSN 1666-9479.
- VILLACORTA, S. y VALDERRAMA, P., 2012. Informe Técnico: Evaluación del Flujo de Detritos de Tamburco, Provincia de Abancay, Región Apurímac. *INGEMMET, Informe Técnico N° A6595*,
- VOLONTÉ, A., GIL, V. y CAMPO, A.M., 2018. Estudio de la vegetación y sus efectos en la dinámica fluvial en cuencas serranas , Argentina Study of the vegetation and its effects



- on the fluvial dynamics in mountain basins , Argentina. *Revista Geográfica Venezolana* [en línea], vol. 59, no. 2, Disponible en:
<https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473009/html/>.
- WILSON, D.I., 2018. What is rheology? *Eye (Basingstoke)* [en línea], vol. 32, no. 2, ISSN 14765454. DOI 10.1038/eye.2017.267. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.1038/eye.2017.267>.
- YOKOTA, S. y V, Á.M., 2008. Edier Aristizábal. ,
- ZHANG, J., ZHU, D. y ZHANG, S., 2020. Shallow slope stability evolution during rainwater infiltration considering soil cracking state. *Computers and Geotechnics*, vol. 117, no. July 2018, ISSN 18737633. DOI 10.1016/j.compgeo.2019.103285.
- ZHAO, W., ABHISHEK, KINOCHI, T., ANG, R. y ZHUANG, Q., 2022. A framework for quantifying climate-informed heavy rainfall change: Implications for adaptation strategies. *Science of the Total Environment*, vol. 835, ISSN 18791026.
DOI 10.1016/j.scitotenv.2022.155553.
- ZHIPENG, L., DONGHAO, M., WEI, H. y XUELIN, L., 2018. Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls. *Soil and Tillage Research*, vol. 178, no. January, ISSN 01671987. DOI 10.1016/j.still.2018.01.001.
- ZHU, P., ZHANG, G., WANG, H. y XING, S., 2020. Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, vol. 590, no. May, ISSN 00221694. DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.125535.



ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Adquisición imagen EOSDA	122
Anexo 2. Gestiones realizadas ante el Instituto Geográfico Nacional (IGN)	125
Anexo 3. Gestiones realizadas ante la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA).	126
Anexo 4. Acta de entrega de productos de imágenes satelitales	127
Anexo 5. Procesos para el modelado y simulación	130
Anexo 6. Resultados del proceso del modelado y simulación	133
Anexo 7. Fotografías	135
Anexo 8. Cursos de especialización	138



1. Adquisición de imagen EOSDA.

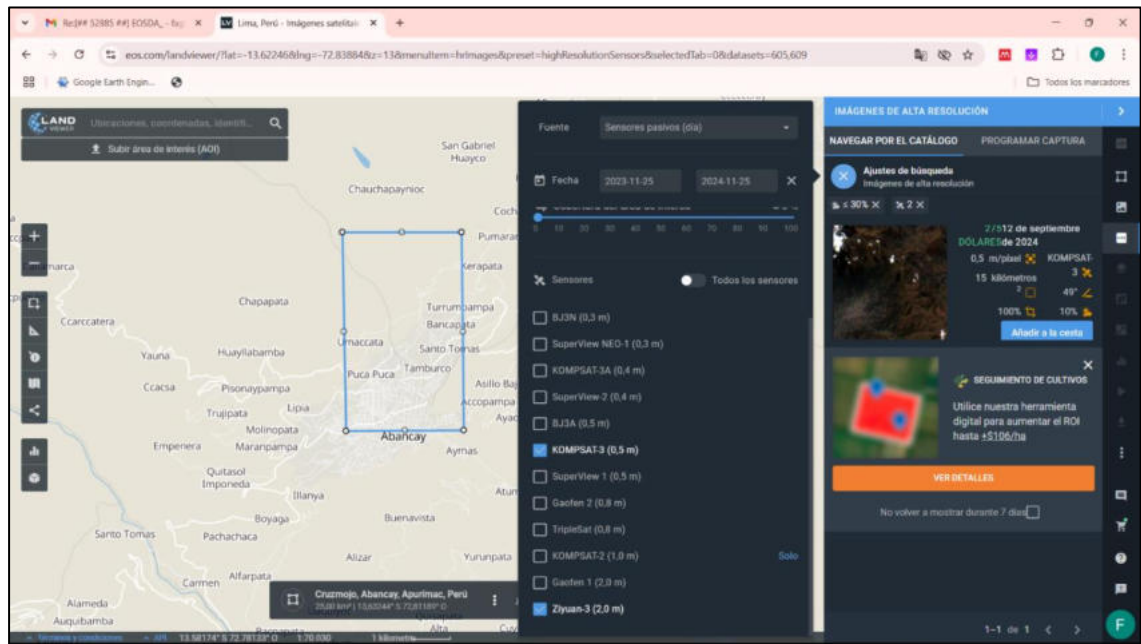


Figura 1 — Delimitación del área de interés de la investigación.

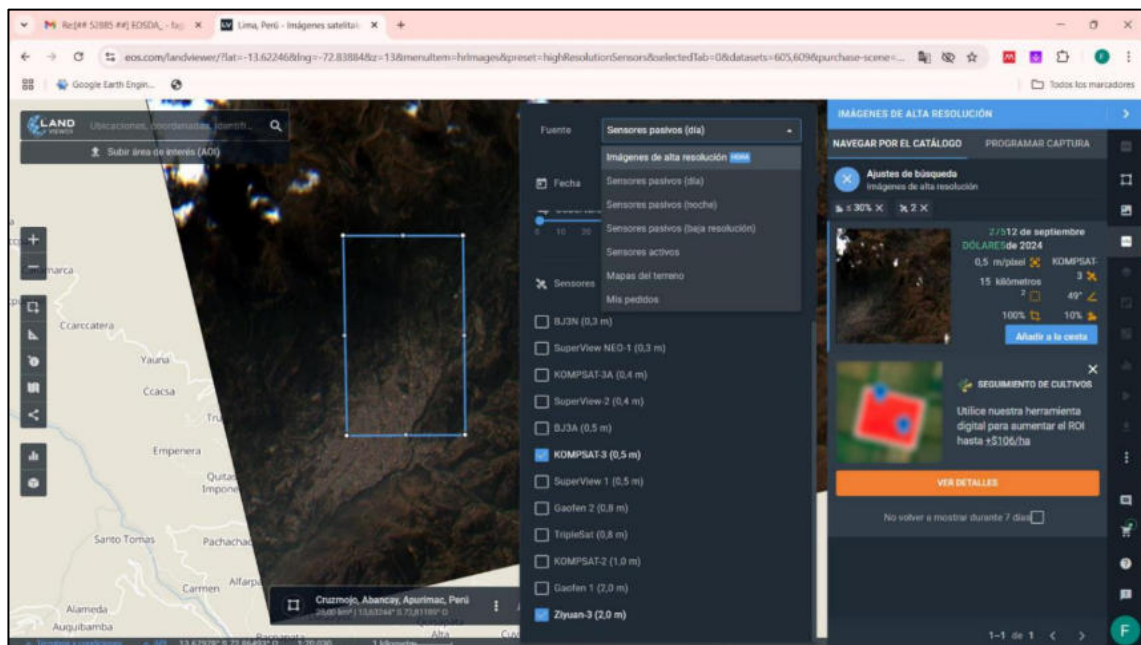


Figura 2 — Selección de imagen satelital.

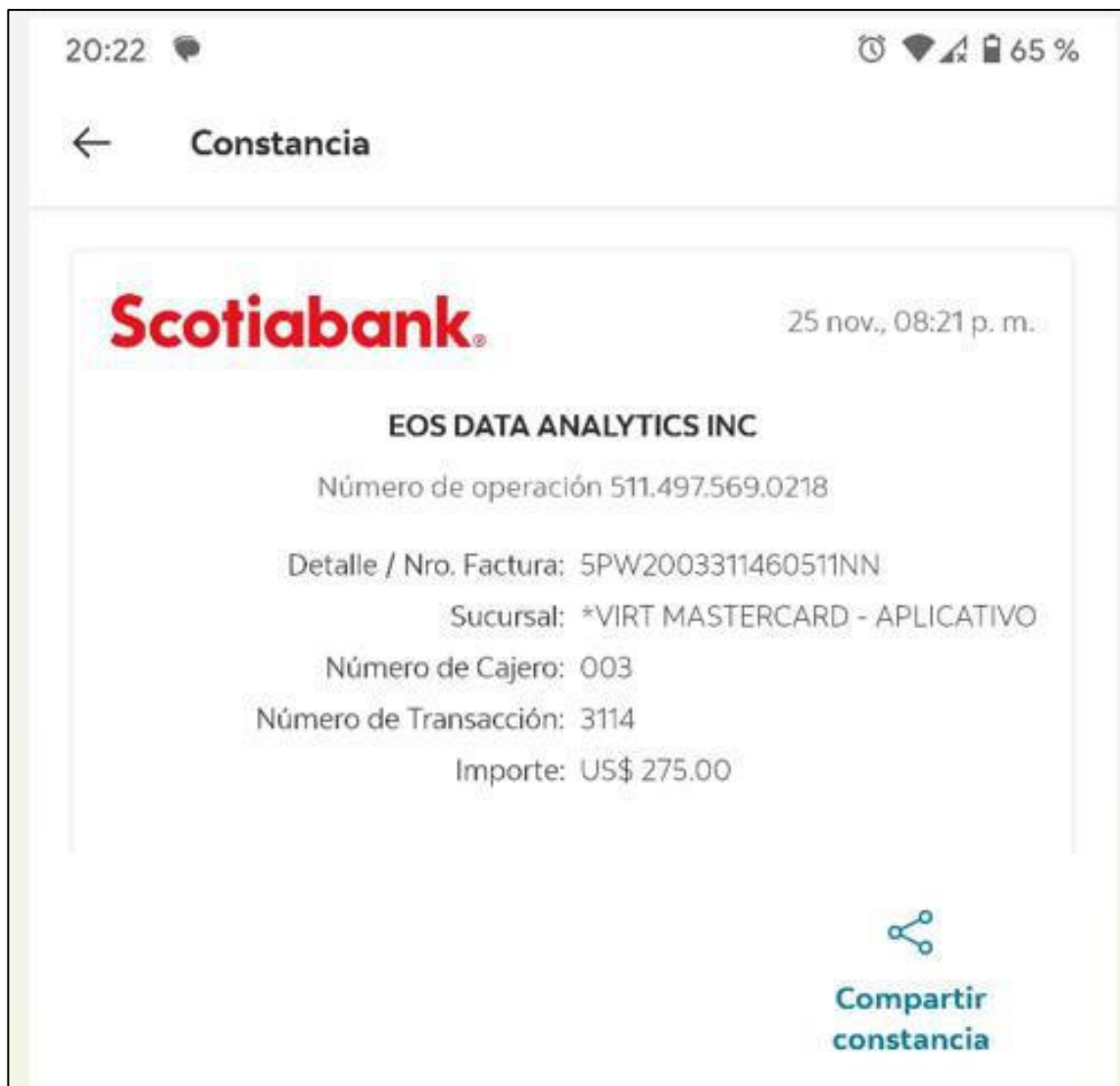


Figura 3 — Costo de adquisición de la imagen satelital



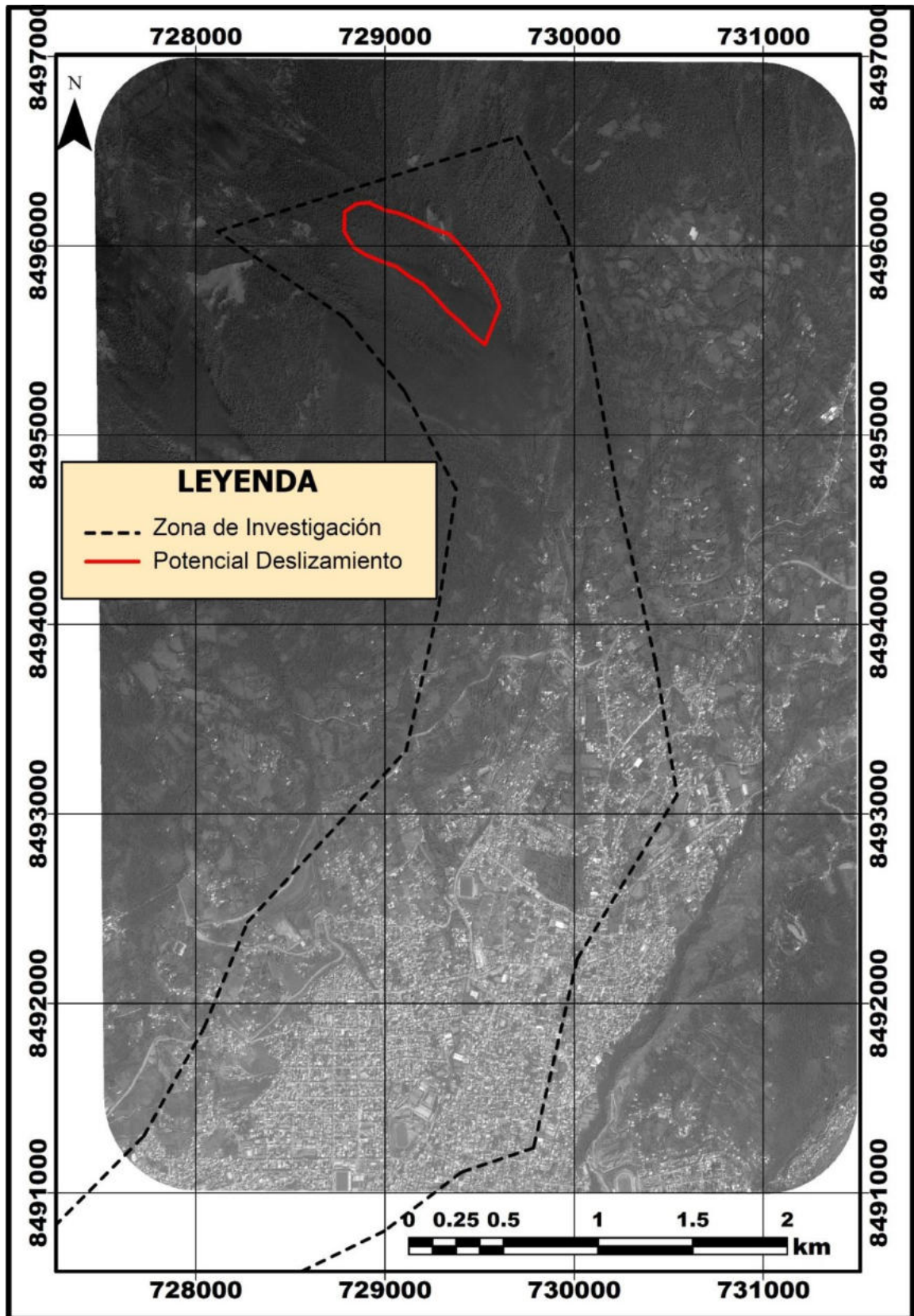


Figura 4 – Imagen satelital EOSDA.

2. Gestiones realizadas ante el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

SOLICITO: Imagen Raster en Modelo Digital de Superficie (DSM) de ≤ 0.5 m/pxl

Señor General de Brigada Robert Heli Valles Angulo, Jefe del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Yo, Franklin Aguirre Huillcas identificado con DNI N° 23803215, domiciliado en el Pasaje Simón Bolívar N°108 de la urbanización Bellavista, del distrito de Abancay, provincia Abancay del departamento de Apurímac, con móvil (celular) N° 983676060, ante usted con el debido respecto me presento y expongo:

Que, teniendo la necesidad de contar con la imagen ráster en Modelo Digital de Superficie (DSM) de la siguiente zona:

Distritos: Abancay – Tamburco

Provincia: Abancay

Departamento: Apurímac

Limitada por las siguientes coordenadas:

Puntos	Coordenadas UTM Datum WGS84. Zona 18 sur	
	Este	Norte
1	728000	8496500
2	731000	8496500
3	731000	8491500
4	728000	8491500

El propósito de tener esta imagen DSM de 0.5 m/pxl sin presencia de nubes (Preferentemente debe haber sido tomada el año 2010 al año 2020). Es para desarrollar un trabajo de investigación sobre el Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, en el distrito de Tamburco – Abancay. La indicada imagen DSM permite procesar la simulación en el software HEC – RAS v. 6.5. Debo de indicar que el deslizamiento en el cerro Chuyllurpata se genera como consecuencia de la infiltración de las aguas pluviales, las constantes lluvias, en algunos casos extremos generan diversos fenómenos geohidrológicos que afectan la ciudad de Tamburco – Abancay y poblados aledaños.

Por tal motivo, solicito el apoyo del IGN, para poder desarrollar la investigación propuesta.

Por lo expuesto:

Ruego a usted acceder a lo solicitado por ser de justicia.

Abancay, 03 de enero del 2025.



3. **Gestiones realizadas ante la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA).**

SOLICITO: Imagen Raster en Modelo Digital de Superficie (DSM) de ≤ 0.5 m/pxl

Señor MINISTRO DE DEFENSA DEL PERÚ

Yo, Franklin Aguirre Huillcas identificado con DNI N° 23803215, domiciliado en el Pasaje Simón Bolívar N°108 de la urbanización Bellavista, del distrito de Abancay, provincia Abancay del departamento de Apurímac, con móvil (celular) N° 983676060, ante usted con el debido respecto me presento y expongo:

Que, teniendo la necesidad de contar con la imagen ráster en Modelo Digital de Superficie (DSM) en formato TIFF, de la siguiente zona:

Distritos: Abancay – Tamburco

Provincia: Abancay

Departamento: Apurímac

Limitada por las siguientes coordenadas:

Puntos	Coordenadas UTM Datum WGS84. Zona 18 sur	
	Este	Norte
1	728000	8496500
2	731000	8496500
3	731000	8491500
4	728000	8491500

El propósito de tener esta imagen DSM de 0.5 m/pxl sin presencia de nubes (Preferentemente debe haber sido tomada el año 2010 al año 2020). Es para desarrollar un trabajo de investigación sobre el Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, en el distrito de Tamburco – Abancay. La indicada imagen DSM permite procesar la simulación en el software HEC – RAS v. 6.5. Debo de indicar que el deslizamiento en el cerro Chuyllurpata se genera como consecuencia de la infiltración de las aguas pluviales, las constantes lluvias, en algunos casos extremos generan diversos fenómenos geohidrológicos que afectan la ciudad de Tamburco – Abancay y poblados aledaños.

Por tal motivo, solicito el apoyo del **IGN**, para poder desarrollar la investigación propuesta.


Por lo expuesto:

Ruego a usted acceder a lo solicitado por ser de justicia.


Abancay, 04 de enero del 2025.



4. Acta de entrega de productos de imágenes satelitales



"Año del Bicentenario de José Faustino Sánchez Carrión"



AGENCIA ESPACIAL DEL PERÚ - CONIDA

ACTA DE ENTREGA DE PRODUCTOS DE IMÁGENES SATELITALES N° 002-2025

Lima, 21 de enero del 2025

Por medio de la presente, la Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática (DIAPG), hace entrega de las siguientes Imágenes / Productos, solicitados por:

Entidad: Universidad Nacional Micaela Bastidas - Apurímac

Representante: Aguirre Huillcas Franklin **DNI:** 23803215

Area/Dirección: Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Cargo: Docente

Correo: faguirre@unamba.edu.pe **Telefono:** 983 676 060

Los productos imagen solicitados, que se describen a continuación no serán utilizados nunca en contra de los intereses del Estado o en intereses que pongan en peligro la seguridad y/o los intereses nacionales. Así mismo, de corresponderme me comprometo a administrar y controlar el adecuado uso, el destino y la custodia de las imágenes recibidas.

Detalle del Producto	Fecha		Zona	Sensor	Fecha Inicio	Fecha Fin	Formato	Formato Entrega
	Elaboración	Cantidad						
Generación de DSM con Pleiades	2025-01-15	1	Abancay - Tamburco	PLEIADES	2016-11-24	2016-11-24	Digital	TIF
Generación de DSM con SPOT6	2025-01-21	1	Abancay - Tamburco	SPOT	2020-10-19	2020-10-19	Digital	TIF

Motivo:
 Proyecto de investigación "Potencial deslizamiento del cerro Chuyllurpata y sus consecuencias, Tamburgo - Abancay"

a.- El costo referencial está basado al costo promedio por kilómetro cuadrado en el mercado internacional de imágenes satelitales.

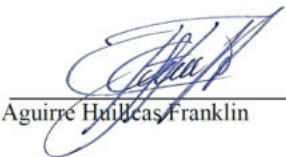
b.- Las imágenes satelitales entregadas no generaron un gasto para la institución solicitante, representando un ahorro para el estado peruano.

c.- Todo tipo de información cartográfica y temática que se desarrolle con las imágenes procedentes del satélite PeruSAT-1 e imágenes obtenidas de la constelación Pleiades 1A/B, SPOT 6/7, TerraSAR-X, TanDEM-X a través del Offset 3, deben ser declarados como datos fuente.

d.- Las imágenes satelitales entregadas serán empleadas para los fines que fueron solicitadas.

Link de Encuesta: <https://forms.gle/M6tfk58fatxvPSM38>


 José Jesús Pasapera Gonzales


 Aguirre Huillcas Franklin

Calle Luis Felipe Villarán N° 1069 San Isidro-Lima-Perú
 Central Telefónica +511 576 - 3920 Page 1/1
<https://www.gob.pe/conida>



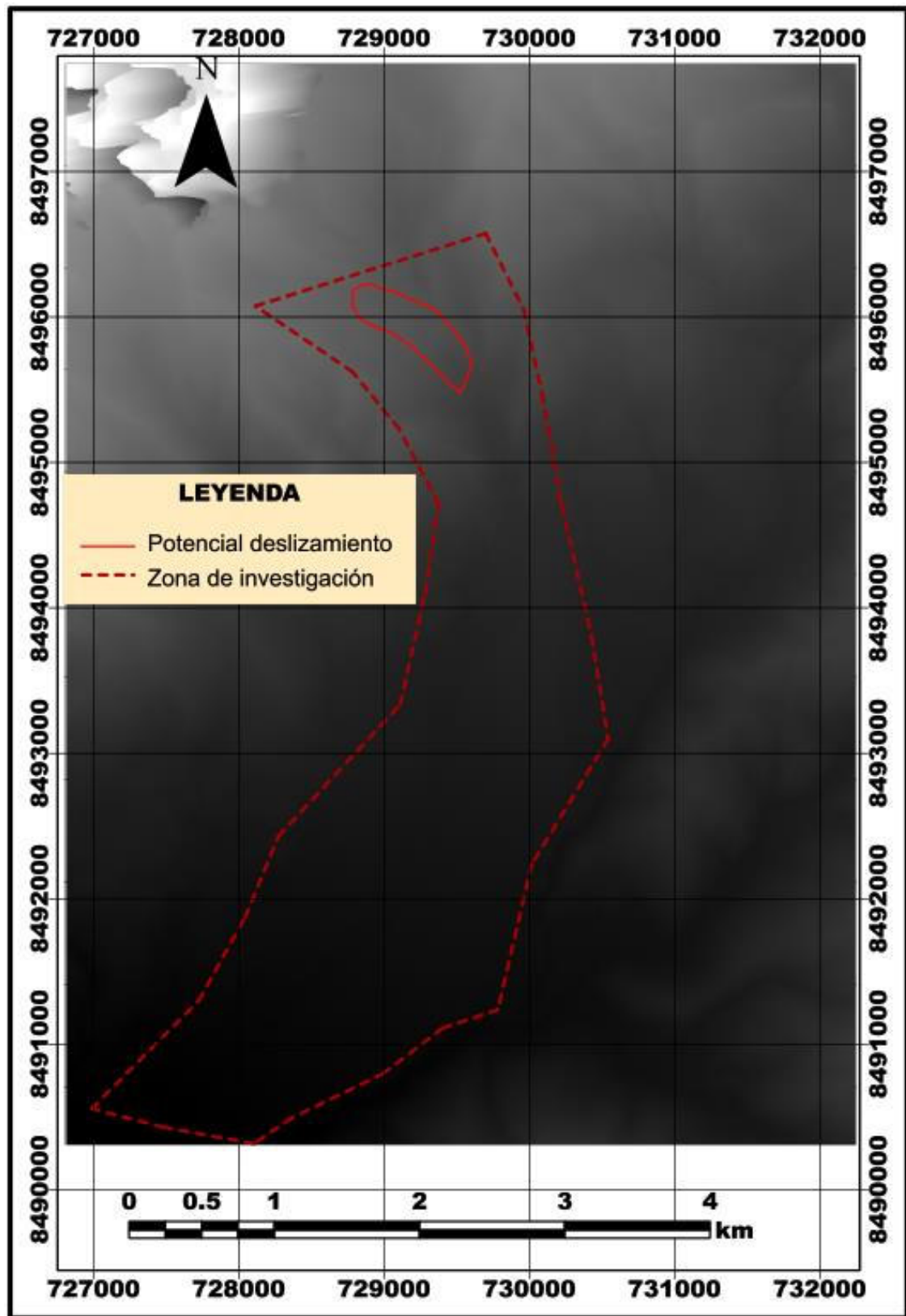


Figura 5 – Imagen ráster en DSM de \leq m/pxl, Sensor PLEIDADES.

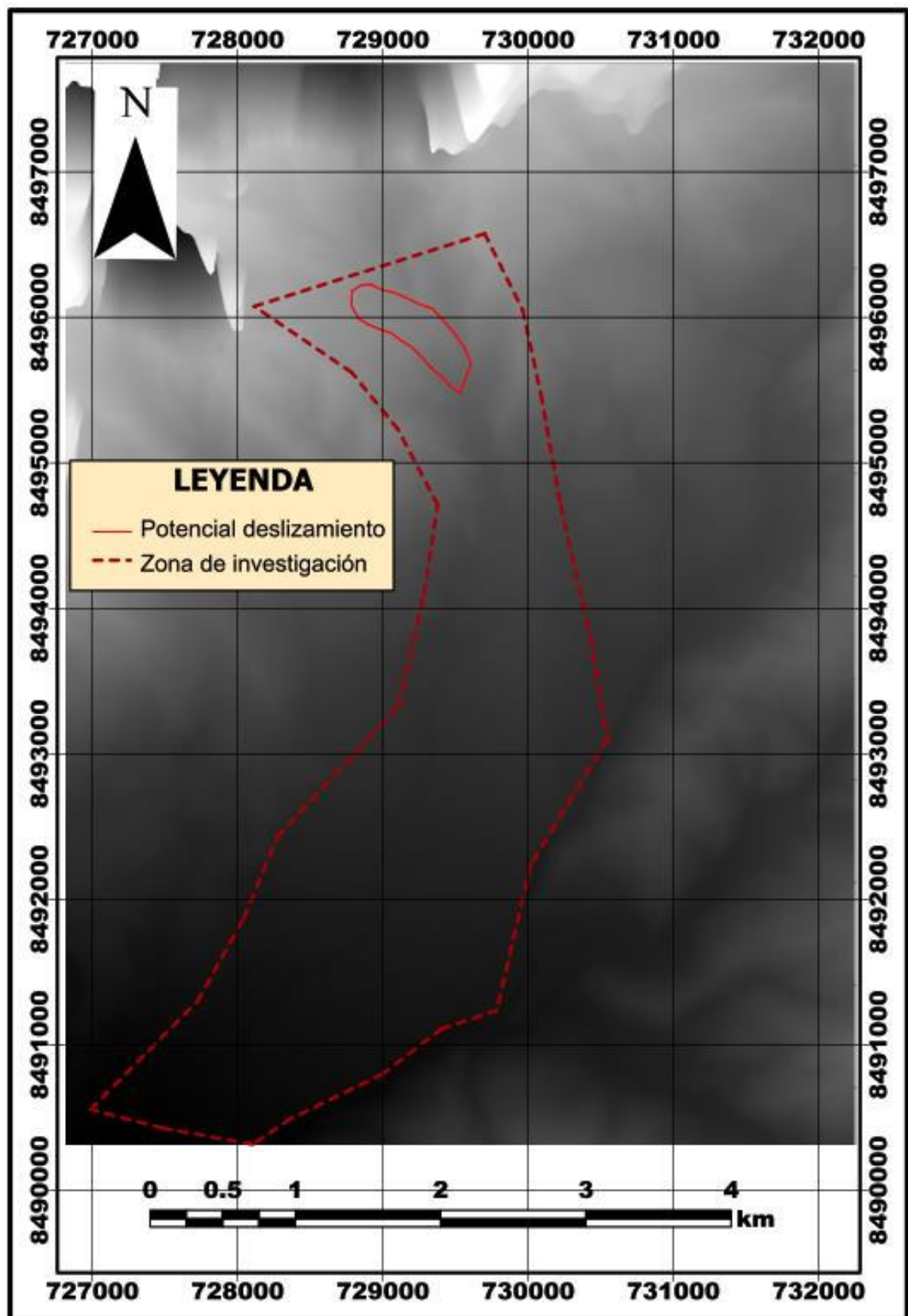


Figura 6 – Imagen ráster en DSM de ≤ 1.50 m/pxl, sensor SPOT.



5. Procesos para el modelado y la simulación.

Flow Hydrograph

2D: Perimetro BCLine: CCE Entrada

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 01MAR.2030 Time: 00:00

Fixed Start Time: Date: 01MAR.2030 Time: 00:00

No. Ordinates

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	28Feb2030 2400	0:00:00	0
2	01Mar2030 0100	1:00:00	2.757
3	01Mar2030 0200	2:00:00	5.515
4	01Mar2030 0300	3:00:00	8.272
5	01Mar2030 0400	4:00:00	11.03
6	01Mar2030 0500	5:00:00	13.787
7	01Mar2030 0600	6:00:00	16.544
8	01Mar2030 0700	7:00:00	19.302
9	01Mar2030 0800	8:00:00	22.059
10	01Mar2030 0900	9:00:00	24.817
11	01Mar2030 1000	10:00:00	27.574
12	01Mar2030 1100	11:00:00	30.331
13	01Mar2030 1200	12:00:00	33.089
14	01Mar2030 1300	13:00:00	35.846
15	01Mar2030 1400	14:00:00	38.604
16	01Mar2030 1500	15:00:00	41.361
17	01Mar2030 1600	16:00:00	44.118
18	01Mar2030 1700	17:00:00	46.876
19	01Mar2030 1800	18:00:00	49.633
20	01Mar2030 1900	19:00:00	52.391
21	01Mar2030 2000	20:00:00	55.148
22	01Mar2030 2100	21:00:00	57.905
23	01Mar2030 2200	22:00:00	60.663
24	01Mar2030 2300	23:00:00	63.42
25	01Mar2030 2400	24:00:00	66.178
26	02Mar2030 0100	25:00:00	68.935
27	02Mar2030 0200	26:00:00	71.692

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.304 TW C

Figura — Configuración del hidrograma de flujo.



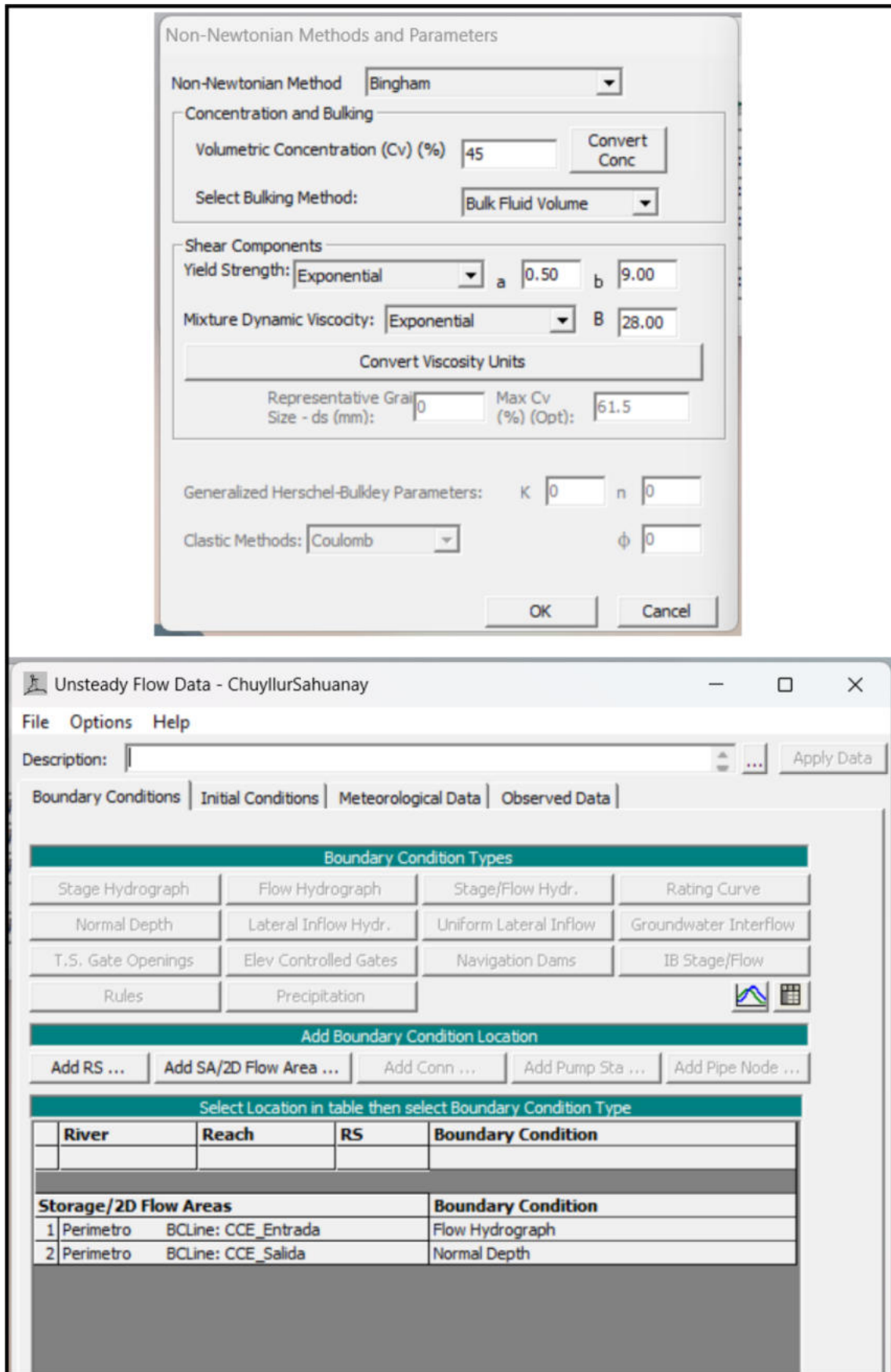


Figura — Configuración métodos y parámetros No Newtonianos, y dato de flujo inestable.



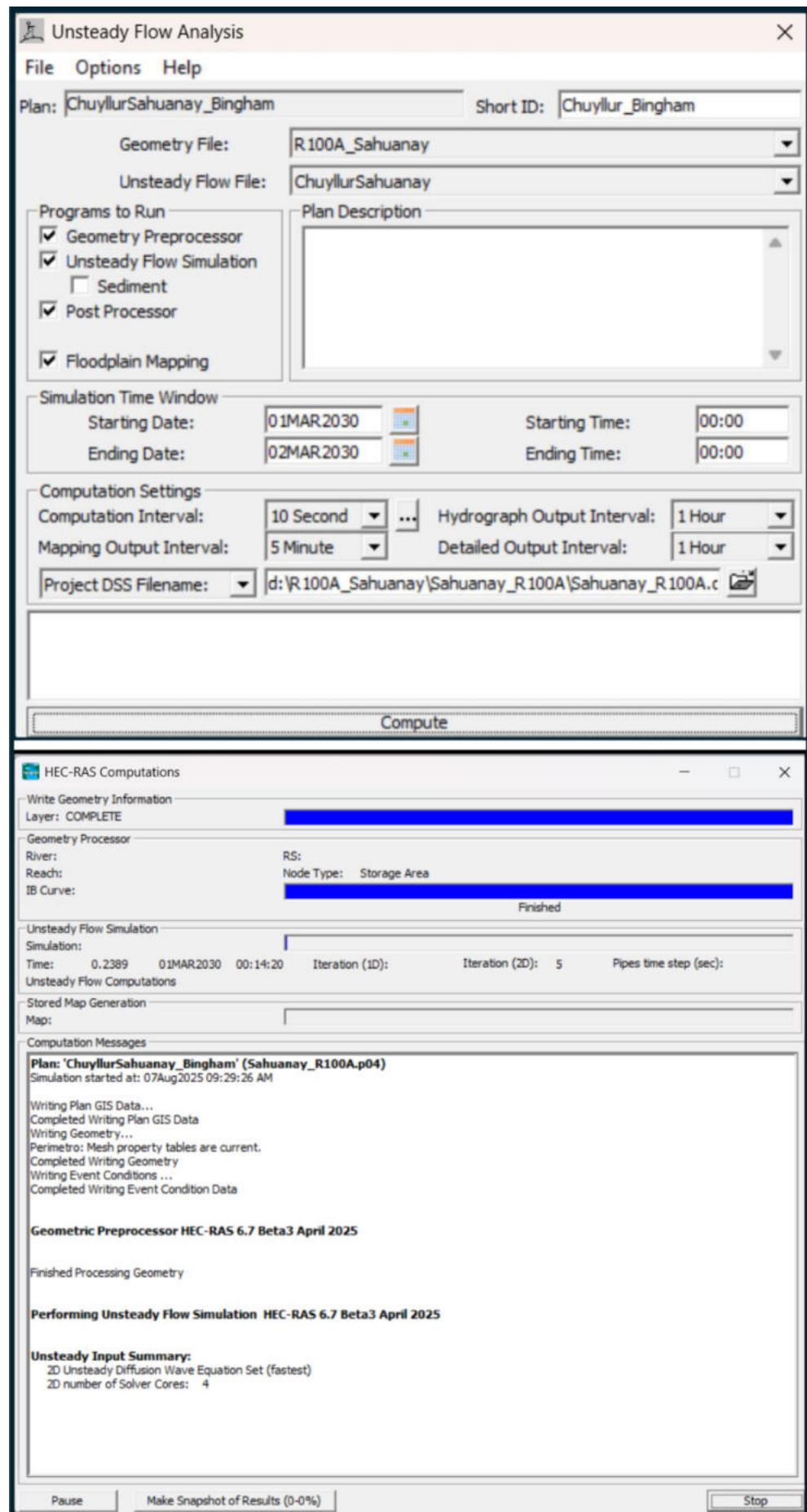


Figura 9 – Configuración para análisis de flujo inestable y computación.



6. Resultados del proceso del modelado y simulación.

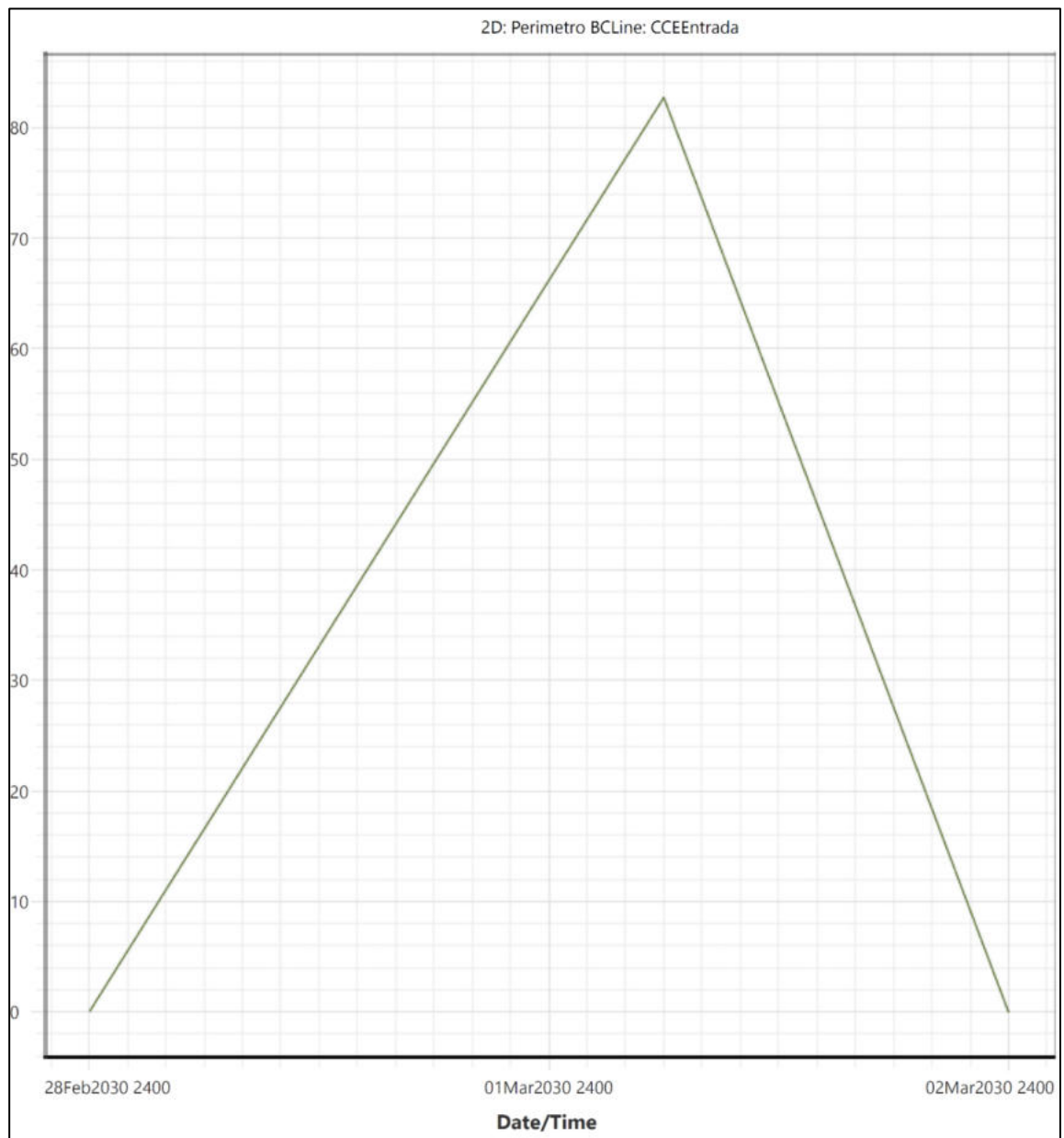


Figura 10 — Caudal versus tiempo.

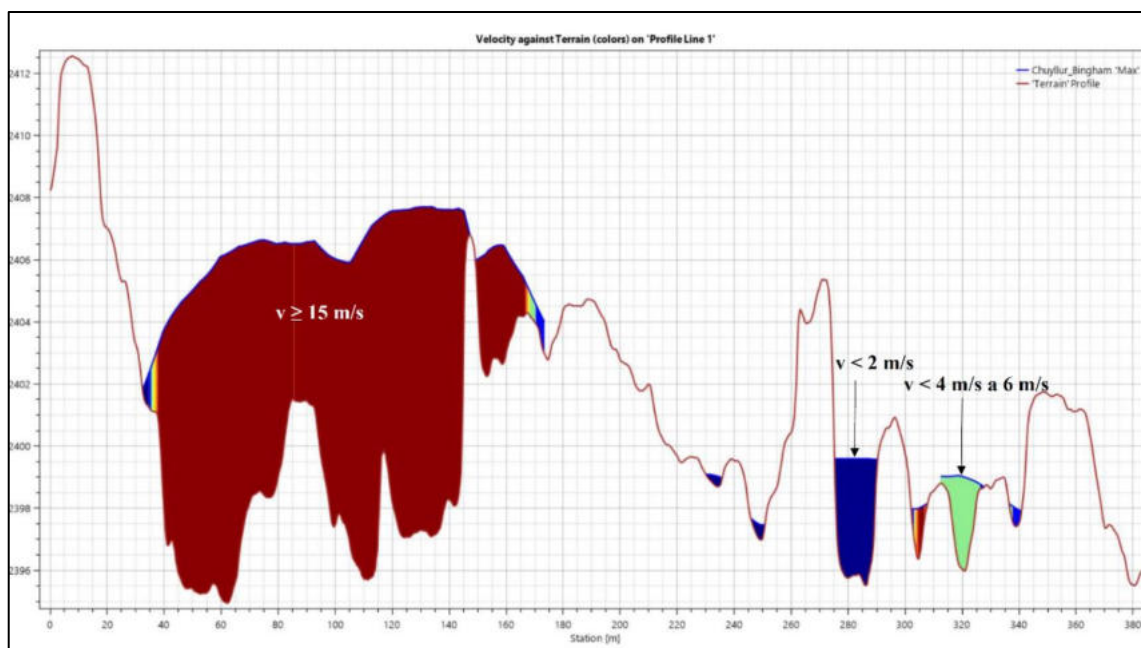


Figura 11 — Velocidad contra el terreno (corte transversal).

La figura muestra la sección transversal del flujo de detritos (movimiento en masa) a lo ancho de la quebrada Sahuanay, obtenido mediante el modelamiento en el software HEC – RAS. Permite analizar con mayor detalle el comportamiento dinámico del flujo y su interacción con la topografía del terreno.

En el modelamiento hidráulico, la escala cromática representa la magnitud de la velocidad del flujo:

Rojo oscuro/marrón: corresponde a velocidades extremas, superiores a 15 m/s, asociadas a flujos altamente erosivos y con gran capacidad destructiva, capaces de movilizar bloques de roca de gran tamaño.

Verde claro: indica velocidades intermedias, menores de 4 m/s a 6 m/s que representan zonas de tránsito donde el flujo comienza a disipar energía.

Azul oscuro: corresponde a velocidades bajas, menores a 2 m/s, típicas de áreas de remanso, acumulación de sedimentos o inundación lenta.



7. Fotografías.



Figura 12 — Canal sin mantenimiento.



Figura 13 — Canal cubierto de vegetación



Figura 14 — Construcción de vivienda sobre el cauce de la quebrada.



Figura 15 — Construcción de vivienda sobre el cauce.



Figura 16 — Encausamiento estrecho.



Figura 17 — infraestructura vial y viviendas sobre el cauce de la quebrada El Olivo.

8. Cursos de especialización.



