



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

**SUSCEPTIBILIDAD DE LOS PELIGROS DE GEODINÁMICA EXTERNA
ENTRE OLLANTAYTAMBO Y PISAQ, CUSCO-PERÚ**

PRESENTADA POR:

JOSÉ DIONICIO CÁRDENAS ROQUE

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y
MEDIO AMBIENTE**

PUNO, PERÚ

2023

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**SUSCEPTIBILIDAD DE LOS PELIGROS DE
GEODINÁMICA EXTERNA ENTRE OLLA
NTAYTAMBO Y PISAQ, CUSCO-PERÚ**

AUTOR

JOSÉ DIONICIO CÁRDENAS ROQUE



Firmado digitalmente por ROQUE
HUANCA Bernardo FAU
20145496170 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.12.2023 19:53:33 -05:00

RECuento DE PALABRAS

45357 Words

RECuento DE CARACTERES

239521 Characters

RECuento DE PÁGINAS

172 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.5MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 1, 2023 8:43 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 1, 2023 8:45 AM GMT-5

● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Cross

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


PhD Bernardo Roque Huanca
DOCENTE PRINCIPAL





UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

TESIS

**SUSCEPTIBILIDAD DE LOS PELIGROS DE GEODINÁMICA EXTERNA
ENTRE OLLANTAYTAMBO Y PISAQ, CUSCO-PUNO**



PRESENTADA POR:

JOSÉ DIONICIO CÁRDENAS ROQUE

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE


.....
Dr. JOSÉ DANTE GUTIÉRREZ ALBERONI

PRIMER MIEMBRO


.....
Dr. ÁNGEL CANALES GUTIÉRREZ

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Dr. FRANZ ZIRENA VILCA

ASESOR DE TESIS


.....
Ph.D. BERNARDO ROQUE HUANCA

Puno, 13 de enero de 2023

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería

TEMA: Susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa

LÍNEA: Geología, Minas y Metalurgia



DEDICATORIA

A la memoria de mis padres, por sus consejos y apoyo incondicional, a lo largo de mi vida.

A mi esposa y a mis hijos por su cariño y motivación.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi asesor de tesis PhD Bernardo Roque Huanca por su orientación, apoyo y revisión en la elaboración de la tesis.

Agradecimiento especial al Dr. Víctor Santiago Carlotto Caillaux, por ser mi maestro y amigo, el que me inicio en el fascinante mundo de la geología, además por las sugerencias y revisión de la presente tesis.

Agradezco a los docentes de la plana doctoral de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, por las sabias enseñanzas que me impartieron.

Finalmente, agradezco a todas las personas que contribuyeron y brindaron su apoyo incondicional durante mi formación doctoral.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Contexto y marco teórico	3
1.1.1. Gestión de riesgo de desastres	3
1.1.2. Movimientos en masa	5
1.1.3. Geodinámica	6
1.2. Antecedentes	7
1.2.1. Antecedentes geológicos e históricos	11
1.2.2. Antecedentes geológicos	11
1.2.3. Antecedentes históricos	14
1.2.4. Resumen de los principales desastres	17

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	27
2.2. Definición del problema	28
2.3. Intención de la investigación	28
2.4. Justificación	29
2.5. Objetivos	31
2.5.1. Objetivo general	31
2.5.2. Objetivos específicos	31

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	32
3.2. Población y muestra	33
	iii



3.2.1.	Población	33
3.2.2.	Muestra	33
3.3.	Metodología por objetivos	33
3.3.1.	Determinación de la geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal	33
3.3.2.	Determinación de la susceptibilidad por movimientos en masa e inundación	35
3.3.2.1.	Ponderaciones a los factores condicionantes a movimientos en masa	37
3.3.2.2.	Ponderaciones a los factores condicionantes por inundación del río Vilcanota	44
3.3.3.	Determinación de los niveles de peligro de geodinámica externa que afectan en la seguridad física de las poblaciones	49
3.4.	Análisis de datos y categorías	50

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal	51
4.1.1.	Geología	51
4.1.1.1.	Unidades litoestratigráficas	53
1)	Formación Ollantaytambo (O-o)	53
4.1.1.2.	Rocas ígneas (P-gr)	61
4.1.2.	Pendiente	64
4.1.3.	Geomorfología	64
4.1.3.1.	Unidades geomorfológicas	66
4.1.4.	Cobertura vegetal	82
4.1.4.1.	Unidades de cobertura vegetal	82
4.2.	Susceptibilidad por movimientos en masa e inundación	90
4.2.1.	Susceptibilidad por movimientos en masa	90
4.2.2.	Susceptibilidad por inundación del río Vilcanota	97
4.3.	Niveles de peligro de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las poblaciones	101
4.3.1.	Mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota	102
4.3.2.	Mapa de niveles de peligro por aluvión	105
4.3.3.	Mapa de niveles de peligro por deslizamiento	113
CONCLUSIONES		125
RECOMENDACIONES		127
BIBLIOGRAFÍA		128



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Tipos de movimiento en masa	5
2. Tipos de factores condicionantes	36
3. Pesos asignados a los factores condicionantes para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa	37
4. Ponderación del factor geológico, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa	38
5. Ponderación del factor geomorfología, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa	40
6. Ponderación del factor pendiente, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa.	42
7. Ponderación del factor cobertura vegetal, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa	43
8. Rango de ponderación de susceptibilidad a movimientos en masa	44
9. Pesos asignados a los factores condicionantes para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota	45
10. Rango de ponderación de susceptibilidad a inundación del río Vilcanota	45
11. Ponderación del factor geomorfología, para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota	46
12. Ponderación del factor pendiente, para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota	47
13. Unidades litoestratigráficas y rocas ígneas intrusivas de la zona de estudio	52
14. Parámetro de pendientes	64
15. Unidades geomorfológicas	65
	v



16. Unidades de cobertura vegetal	83
17. Criterios de susceptibilidad por movimientos en masa	91
18. Área de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa	92
19. Área de zonificación de susceptibilidad a inundación del río Vilcanota	98
20. Área de los peligros de geodinámica externa del área de estudio	102
21. Niveles de peligro por inundación del río Vilcanota	103
22. Área de niveles de peligro por aluvión	108
23. Área del nivel de peligro por deslizamiento	114



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Tipos de peligros generados por fenómenos de origen natural	4
2. Mapa de ubicación del Valle del Vilcanota, entre Ollantaytambo y Písaq, Cusco	32
3. Mapa geológico	55
4. Mapa geomorfológico	69
5. Mapa de cobertura vegetal	85
6. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa	95
7. Mapa de susceptibilidad a inundación	100
8. Mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota	107
9. Mapa de niveles de peligro por aluvión	111
10. Mapa de niveles de peligro por deslizamiento	122
11. Mapa de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa versus mapa de niveles de peligros por deslizamiento y aluvión	123
12. Mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación versus mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota	124



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
13. Descripción del anexo 01	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El Valle Sagrado de los Incas, entre Ollantaytambo y Pisaq, presenta movimientos en masa, así como inundaciones que afectan a las ciudades, las construcciones y la población. La investigación tuvo como objetivo determinar la susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa entre Ollantaytambo y Pisaq, Cusco-Perú. La metodología estuvo basada en el método heurístico de análisis jerárquico de procesos de los factores condicionantes, tales como la geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal, obteniéndose el mapa de susceptibilidad y el mapa de peligros de geodinámica externa. La superposición del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa con los mapas de peligros por aluvión y deslizamiento, así como la superposición del mapa de susceptibilidad por inundación con el mapa de peligros por inundación, muestra grandes coincidencias, validando los mapas de susceptibilidad. El trabajo concluye que todas las ciudades del Valle Sagrado muestran áreas de susceptibilidad alta a muy alta, al igual que las zonas de expansión urbana, terrenos de cultivo, vías de acceso a las ciudades y sitios arqueológicos como Machupicchu, Ollantaytambo y Pisaq. Las conclusiones y recomendaciones son aplicables en la gestión de riesgos de desastres, en los planes de ordenamiento territorial y los planes de mitigación de las ciudades y conservación de centros arqueológicos. Esto permitirá proteger las ciudades, salvando vidas, preservando las inversiones en vivienda, agricultura, ganadería, transporte y turismo, que son las fuentes económicas más importantes.

Palabras clave: geodinámica, inundación, movimientos en masa, Ollantaytambo, peligros, Pisaq, susceptibilidad



ABSTRACT

The Incas' Sacred Valley, between Ollantaytambo and Pisaq, presents mass movements, as well as floods that affect cities, buildings and the population. The research objective was to determine the susceptibility of external geodynamic hazards between Ollantaytambo and Pisaq, Cusco-Peru. The methodology was based on the heuristic method of hierarchical analysis of conditioning factor processes, such as geology, geomorphology, slope and vegetation cover, obtaining the susceptibility map and the external geodynamic hazard map. The overlay of the landslide susceptibility map with the alluvium and landslide hazard maps, as well as the overlay of the flood susceptibility map with the flood hazard map, show great coincidences, validating the susceptibility maps. The work concludes that all the cities of the Sacred Valley show areas of high to very high susceptibility, as well as the areas of urban expansion, cultivated land, access roads to the cities and archaeological sites such as Machupicchu, Ollantaytambo and Pisaq. The conclusions and recommendations are applicable to disaster risk management, territorial planning plans and mitigation plans for cities and conservation of archaeological centers. This will make it possible to protect cities, saving lives, preserving investments in housing, agriculture, livestock, transportation and tourism, which are the most important economic sources.

Keywords: dangers, flood, geodynamics, mass movements, Ollantaytambo, Pisaq, susceptibility

INTRODUCCIÓN

El Valle del Vilcanota o Valle Sagrado de los Incas acoge un conjunto de pueblos unidos por vías, donde el tramo comprendido entre Ollantaytambo y Pisaq tiene un relieve accidentado y abrupto, en ambas márgenes, con una altitud que varía desde los 2,500 m hasta los 5,800 m, con presencia de nevados como el Chicón y Pumahuanca que llegan hasta los 5,450 m, donde las laderas de las montañas de ambas márgenes del río Vilcanota presentan movimientos en masa principalmente de aluviones, deslizamientos y además inundaciones, debido a la litología, presencia de estructuras geológicas, circulación e infiltración de aguas superficiales y subterráneas en rocas y sedimentos. En la margen derecha del valle sobre abanicos aluviales, se ubican los principales poblados de Pisaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo, que presentan problemas de fenómenos de geodinámica externa especialmente en la época de lluvias anuales o lluvias excepcionales. Las principales actividades en estos poblados es la agricultura y luego el turismo. El caudal del río aumenta en la época de lluvias anuales o excepcionales, por lo que está expuesta a peligros por inundación en ambas márgenes del Valle del Vilcanota. El año 2010 ocurrieron fenómenos de geodinámica externa que demuestran la inestabilidad de las laderas e inundaciones, por lo que es importante y necesario garantizar la seguridad física de los habitantes y turistas que habitan en los poblados.

La zona de estudio abarca una superficie de 1,386.60 km² y una longitud de 96.23 km a lo largo del río Vilcanota, que sigue una dirección promedio de sureste a noroeste. El río tiene un caudal promedio de 66.2 m³/s en la estación de Pisaq, y recibe aportes secundarios de las quebradas transversales y ríos de menor orden. El valle capta una precipitación total anual que varía de 700 a 950 mm, y precipitaciones excepcionales que llegan hasta los 1,500 mm, como el registrado el año 2010. La temperatura promedio anual en la zona de estudio varía de 10 a 23 °C (SIAR, 2014).

La investigación se enmarca en el área de Ingeniería, línea de investigación Geología, Minas y Metalurgia, y sub línea Geología Regional. El trabajo es fundamentalmente geológico, desarrollado en las etapas de pre-campo, campo y post-campo, con el propósito de obtener mapas temáticos de geodinámica externa, con el fin de considerar este estudio en los planes de ordenamiento territorial del Valle Sagrado de los Incas, para



prevenir y mitigar los problemas geodinámicos a partir de la elaboración de los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones, así como la elaboración de los mapas de peligros por deslizamiento, aluvión e inundación del río Vilcanota.

La aplicación de las recomendaciones de este trabajo, en los planes de ordenamiento territorial permitirá además de salvar vidas, proteger las inversiones en vivienda, agricultura, transporte, turismo, entre otros, por tanto, se plantea los métodos de investigación relacionadas a 1) la determinación de la geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal, que son la base de los mapas de susceptibilidad y de peligros; luego 2) Determinar la susceptibilidad a movimientos en masa e inundación, entre Ollantaytambo y Písaq y; 3) Determinar los niveles de peligro de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las principales poblaciones ubicadas entre Ollantaytambo y Písaq.

El informe está organizado en cuatro capítulos. El capítulo I se refiere a la revisión de la literatura; el capítulo II, el planteamiento del problema; el capítulo III, los materiales y métodos; y el capítulo IV incluye los resultados y discusión. Finalmente, en la última parte están las conclusiones, recomendaciones y la bibliografía.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Contexto y marco teórico

1.1.1. Gestión de riesgo de desastres

El Acuerdo Nacional aprobó la Política 32 sobre Gestión del Riesgo de Desastres, con la finalidad de proteger la vida, la salud y la integridad de la población, y el Estado de Perú ha dado la Ley N° 29664 - Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), así como el patrimonio público y privado, promoviendo y velando por la ubicación de la población y sus equipamientos en las zonas de mayor seguridad, reduciendo las vulnerabilidades con equidad e inclusión, bajo un enfoque de procesos que comprenda: la estimación y reducción del riesgo, la respuesta ante emergencias y desastres y la reconstrucción (El Peruano, 2011), que está a cargo del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), que tiene la finalidad de identificar y reducir los riesgos asociados a peligros o minimizar sus efectos; evitar la generación de nuevos riesgos; así como la preparación y atención ante situaciones de desastres.

Los integrantes del SINAGERD son el Instituto de Defensa Civil (INDECI) que realiza las labores de preparación, respuesta y rehabilitación ante desastres, y el Centro Nacional de Estimación, Prevención, y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2014).

El concepto de peligro es la probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos (El Peruano, 2011).

En la clasificación de peligros generados por fenómenos de origen natural, se distinguen el peligro geológico generados por fenómenos de geodinámica externa que corresponden a los movimientos en masa, y peligro hidrometeorológico que son las inundaciones (CENEPRED, 2014), y que serán tratados de esta manera en el presente trabajo de investigación (Figura 1).

Ayala-Carcedo (2002) define la susceptibilidad, como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada o hallarse bajo la influencia de un proceso determinado, en este caso movimientos en masa. Los mapas de susceptibilidad se realizan a partir de datos cartográficos de tipo topográfico, geomorfológico, litológico, estructural, vegetación, usos de suelos y otros.

Moldes (1995) indica que el Sistema de Información Geográfica (SIG), es un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas.

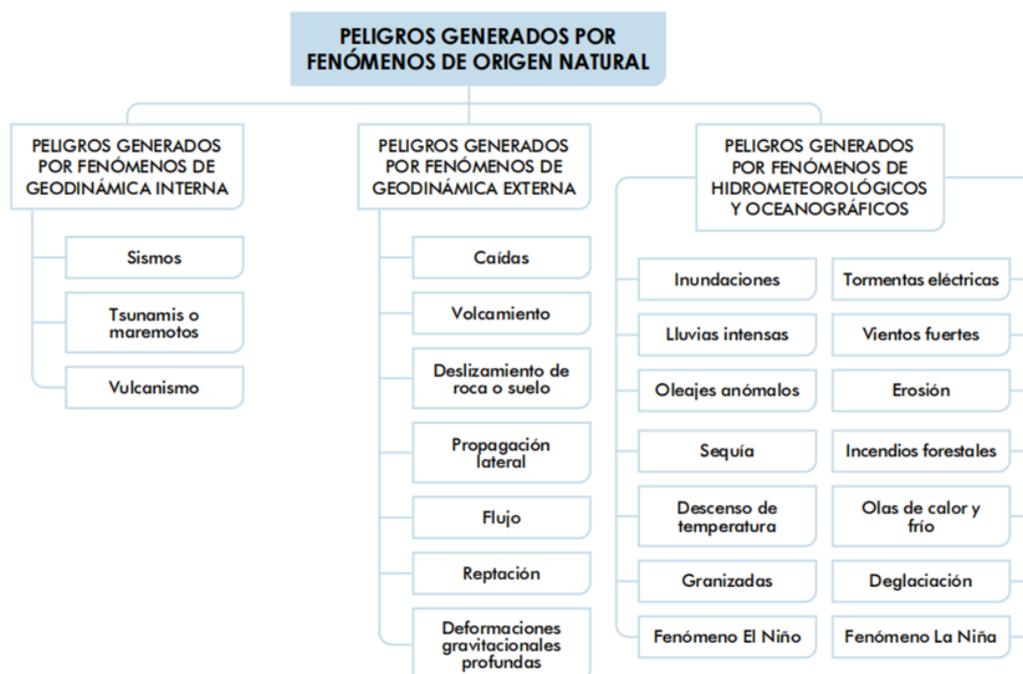


Figura 1. Tipos de peligros generados por fenómenos de origen natural

Fuente: CENEPRED, 2014

1.1.2. Movimientos en masa

El Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (CENEPRED, 2014), y Movimientos en masa en la región Andina, que es una guía para la evaluación de amenazas, desarrollado por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas (PMA:GCA, 2007).

En el “Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales”, editado por el (CENEPRED, 2014) se dan los conceptos, el análisis y evaluación de la peligrosidad, el análisis de vulnerabilidad y la estimación del riesgo.

En la guía “Movimientos en masa en la región Andina, Una guía para la evaluación de amenazas” (PMA:GCA, 2007) trata de los tipos, clasificación, evaluación de amenazas o peligros, inventario y simbología cartográfica de movimientos en masa. Los tipos de movimientos en masa se presentan en la Tabla 1 (GEMMA, 2007).

Tabla 1

Tipos de movimiento en masa

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamientos de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (Rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodos Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Fuente: Movimientos en masa en la región Andina, Una guía para la evaluación de amenazas del Proyecto Multinacional Andina (GEMMA, 2007)

1.1.3. Geodinámica

Amorós (1996) define la geodinámica, como el estudio del conjunto de procesos terrestres y sus resultados. Se divide en geodinámica externa e interna. La geodinámica externa, son los procesos que ocurren en la superficie de la corteza, como son los movimientos en masa e inundaciones.

La geodinámica es la parte de las ciencias de la tierra en la que se intenta explicar los hechos observados sobre nuestro globo en términos de principios mecánicos (dinámicos) fundamentales. En aquellos días, el término designaba más específicamente la interrelación de la dinámica de la Tierra con los efectos cósmicos, es decir, fenómenos como las mareas de la Tierra sólida. Ahora, sin embargo, el término se ha ampliado para incluir la discusión de todos los procesos dinámicos que ocurren dentro y sobre la Tierra sólida (Scheidegger, 1987).

Un deslizamiento es un movimiento pendiente abajo de una masa de suelo o roca, con desplazamiento de material a lo largo de una superficie de falla rotacional o traslacional. El desplazamiento de los flujos puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Los más importantes son los flujos de detritos y flujo de lodo, que son denominados como aluviones en el presente trabajo de investigación.

Los deslizamientos de tierra se clasifican por su tipo de movimiento. Los cuatro tipos principales de movimiento son: caídas, derrumbes, deslizamientos (rotacionales y traslacionales) y flujos. Los flujos presentan forma de embudo invertido donde el material del deslizamiento ha dejado de moverse. Hay diferentes tipos de flujos: lodo, escombros y rocas (avalanchas de rocas). Los flujos de lodo y los flujos de escombros tienen una alta concentración de partículas sólidas, que se producen en las zonas montañosas de todo el mundo (Volgina & Sergeev, 2021).

Las características básicas de profundidad, ancho, concentración media de partículas y diámetro de un flujo de lodo cambian en el tiempo y espacio, por lo que se considera como un sistema dinámico. El flujo de escombros destruye tierras,

viviendas, objetos de infraestructura de ingeniería como carreteras, puentes, túneles, líneas eléctricas, estructuras hidroeléctricas en varias partes del mundo, Europa y Rusia. Si el territorio está poco poblado, no necesita protección de ingeniería. Pero hay un gran número de áreas, donde el flujo de escombros puede destruir (Volgina & Sergeev, 2021).

La clasificación de los deslizamientos de tierra es inconsistente, ambiguo, confuso y contradictorio, por lo que se ha tomado como referencia el sistema unificado de clasificación de deslizamientos de tierra para pendientes de loess (Li & Mo, 2019).

Amorós (1996) define la geomorfología como el estudio del relieve de la superficie terrestre bajo el punto de vista de sus mecanismos genéticos, las condiciones en que estos se ejercen, los agentes externos que los determinan y las formas topográficas que de ellos resultan. Las acciones erosivas que originan las formas del relieve constituyen las manifestaciones de la dinámica superficial de la litósfera.

1.2. Antecedentes

Los reportes sobre los desastres naturales con inundaciones y deslizamientos de tierra son diversas y abundantes en el mundo, cuyos eventos más cercanos en América se contextualiza en Chile y Cuba. El 16 de diciembre de 2017, 7 millones de m³ de rocas y tierra cayeron sobre el glaciar Yelcho, depositando 2 millones de m³, con un flujo de lodo río abajo a una velocidad de 72 km/h, arrasando la villa Santa Lucía en la Patagonia de Chile, donde murieron 22 personas (Somos-Valenzuela et al., 2020). Luego de 24 horas de lluvias torrenciales con una descarga de 122 mm, el 35% de la villa de 300 habitantes fue invadido por el barro, arrasando la vegetación, cubriendo carreteras, destruyendo viviendas, infraestructura y depositando barro entre 3 y 8 metros de altura en 90 ha de superficie cercana al río Burritos (Ochoa, 2022).

El desierto de Atacama al norte de Chile fue escenario de lluvias inusuales de 68 mm en 48 h que causó una de las inundaciones más catastróficas ocurrida el año 2015, con una descarga máxima de inundación de 1000 m³/s en el río Salado (Wilcox et al., 2016), una crecida de la profundidad mayor a 4,5 m y una erosión costera que causó altas cargas de sedimentos derivados de la erosión del valle,

depositando metros de espesor de lodo en edificios y calles de la ciudad de Chañaral; sin embargo, las laderas permanecieron intactas a pesar de su falta de vegetación (González, 2018). La inundación de esta región, una de las más secas de la Tierra, ha causado cambios, dándole al desierto un estado terrestre análogo de Marte (Dávila, 2017).

La isla de Cuba fue uno de los escenarios de la geodinámica, con un total de 28 deslizamientos en el municipio Bartolomé Masó de la provincia Granma, cuyas tipologías y la peligrosidad fueron expresadas en mapas de peligrosidad (Batista & Montecelos, 2011). Los deslizamientos en los yacimientos lateríticos de cortezas de intemperismo en el yacimiento Punta Gorda, Moa, mediante criterios geomorfológicos de fotointerpretación con sus características morfológicas, direcciones preferenciales y litologías, es otro tipo de la geodinámica, resultando en el movimiento rotacional la tipología predominante (Rodríguez-Catalá & Rodríguez-Infante, 2021). La susceptibilidad del terreno a la rotura se clasificó en cuatro clases: baja, media, alta y muy alta, donde el 25 % del área total estudiada clasificó como de susceptibilidad muy alta, lo que significa un elevado grado de propensión de los suelos lateríticos a los deslizamientos (Almaguer-Carmenates et al., 2014).

El inventario de los deslizamientos en las carreteras de la provincia de Pinar del Río en Cuba, a través de la fotointerpretación, métodos de modelación de la susceptibilidad en SIG como proceso analítico jerárquico (AHP), evidencia que un 40% del territorio es susceptible a la ocurrencia de los deslizamientos (Cueto, 2015).

En la región de Cusco, en la quebrada Ccochoc de la provincia de Calca se evidenció una alta actividad geodinámica, registrado desde el año 1950, con deslizamientos, caída de rocas, flujos de detritos y/o avalanchas (Benavente & Delgado, 2011); así mismo, la provincia de Calca registró 163 procesos geológicos entre deslizamientos activos, deslizamientos antiguos, caída de detritos, flujos de detritos, inundación, movimientos complejos y cárcavas, consignándose la tipología del evento, su georreferencia en coordenadas UTM, las causas, características geomorfológicas, litológicas del substrato y los daños ocasionados,

y una estimación de su peligro potencial y grado de riesgo (Tavera, 2008), habiéndose identificado 6 zonas críticas, según el grado de peligro potencial individual y/o el análisis de densidad de ocurrencias de peligros potenciales, donde se exponen infraestructura y poblaciones que son vulnerables a uno o más peligros geológicos, siendo los sectores de Accha Baja, la ciudad de Calca, quebrada Huamanchoque, quebrada Totorá, el sector Pampacocha, la quebrada Pallqay-quebrada Llanccaycaje, todas consideradas en peligro inminente (Benavente & Delgado, 2011).

Así mismo, en la geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca (hojas 27-r y 27-s), se describen la geología, geomorfología, tectónica, y algunos fenómenos de geodinámica externa como los deslizamientos de Písaq, Calca y Urubamba, a escala regional, además de presentar mapas de la geología, geomorfología, tectónica a escala 1:100,000 (Carlotto et al., 1996).

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) ha elaborado los Mapas de Peligros de origen geológico-geotécnico, climático, geológico-climático y de origen antrópico, a fin de que permitan la reducción del riesgo en áreas evaluadas como de Peligro Alto y Muy Alto de las diferentes ciudades del departamento de Cusco, tales como Calca (Carlotto et al., 2005a), Ollantaytambo (Carlotto et al., 2005b), Písaq (Carlotto et al., 2005c), Urubamba (Carlotto et al., 2005d), en los que se describen la geología, geomorfología, hidrología, geotecnia, los fenómenos de geodinámica externa de la quebrada Chicón, la evaluación geológica y geodinámica del aluvión del 17 de octubre del 2010 que afectó la ciudad de Urubamba, así como los aluviones de Taray-Cusco el 2010 (Carlotto et al., 2010); los peligros por aluvión, inundación y deslizamiento, y el plan de acondicionamiento territorial de la cuenca media del Vilcanota (GRC, 2011); sin embargo, falta información sobre el tramo comprendido entre Ollantaytambo y Písaq.

El Gobierno Regional de Cusco elaboró el Plan de acondicionamiento territorial 1ra etapa provincias de Calca y Urubamba, donde evidencia el diagnóstico de los subsistemas natural, económico productivo, físico construido, patrimonio cultural y natural, sociocultural, y los subsistemas, donde en el subsistema natural describe la geología y peligros por aluvión, inundación y deslizamiento (GRC, 2011).

El Valle del Vilcanota es un espacio de deslizamientos, sobre todo en la margen izquierda del río Vilcanota, particularmente en la ladera norte del cerro Yahuarmaqui (Kalafatovich, 1977), con los mayores deslizamientos con pendientes altas que las bajas, siendo la lluvia la desencadenante más importante (Dechkamfoo et al., 2022), por lo que, el mapa de susceptibilidad a deslizamientos es esencial para una adecuada gestión del uso del suelo y la evaluación de riesgos, así como para la implementación de estrategias de mitigación de riesgos para una mejor planificación del uso del suelo (Roccati et al., 2021).

El Valle Sagrado de los Incas, es un rico corredor cultural de acceso al Santuario Histórico de Machu Picchu (Knight et al., 2017), con evidentes peligros geológicos de deslizamientos, inundación y flujos de detritos (Valderrama & Roa, 2011). El análisis del inventario y la cartografía de peligros a escala 1:50,000, a través de fotografías aéreas de la década de 1960, y las imágenes satelitales de Google Earth de alta resolución (Mohammed et al., 2013), evidenciaron 1682 ocurrencias de peligros, con mayor frecuencia de derrumbes, seguido de deslizamientos, flujos, erosión de laderas, erosión fluvial, reptación de suelos, inundación fluvial y caída de rocas (Vilchez et al., 2020).

La susceptibilidad a movimientos en masa a escala regional suele ser evaluada mediante métodos heurísticos y estadísticos (Corominas et al., 2014). Los métodos heurísticos son enfoques directos en los que un experto evalúa la susceptibilidad por movimientos en masa directamente en campo, o enfoques indirectos cuando con base en el juicio de expertos, se asigna un peso a cada parámetro considerado significativo para la ocurrencia por movimientos en masa (Stanley & Kirschbaum, 2017), mientras que los métodos estadísticos cuantifican la susceptibilidad con base en el inventario de deslizamientos y los factores condicionantes, los mismos que pueden ser en modelos estadísticos bivariados que relacionan el peso de la evidencia y la relación de frecuencia (Ram et al., 2020), o en modelos multivariados como la regresión logística (Sun et al., 2018).

En la región de Cusco, los movimientos en masa fueron evaluados a través del modelo de susceptibilidad heurístico multivariado, que implica el análisis cruzado de mapas y geoprocésamiento (Villacorta et al., 2012), y el método de ponderación

de mapas de factores o método heurístico (indirecto-cualitativo), clasificando la susceptibilidad a los movimientos en masa en 5 categorías muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (Vilchez et al., 2020).

1.2.1. Antecedentes geológicos e históricos

Los datos que se presentan a continuación, además de los estudios realizados sobre el tema, son los antecedentes históricos y geológicos, como referentes de algunos peligros de geodinámica externa ocurridos en la zona de estudio, durante los años previos, evidenciando la peligrosidad de esta parte del planeta.

1.2.2. Antecedentes geológicos

Las rocas y suelos que afloran en la zona de estudio, abarcan desde la era Paleozoica inferior hasta el Cuaternario, fueron modelados por procesos geológicos a través de los agentes geológicos como las corrientes de agua, vientos y glaciares principalmente, que han determinado la morfología actual, con la formación de quebradas, planicies y abanicos aluviales (Caminos et al., 1982).

En las laderas de las montañas se observan escarpas que corresponden a deslizamientos antiguos y recientes. Los deslizamientos antiguos se encuentran estables aparentemente con su ángulo de reposo inactivo. Los abanicos aluviales antiguos se caracterizan por la superposición de varios flujos aluviales con sus características propias de dinámica. Las terrazas antiguas fluviales están compuestas por sedimentos finos que corresponden a la llanura de inundación y sedimentos gruesos que corresponden a los canales fluviales (Terrizzano et al., 2012).

A continuación, se describe los principales peligros que ocurren en el Valle Sagrado de los Incas:

- a) **Deslizamiento de Písaq:** ubicado a 2 km al noreste de Písaq, con un ancho promedio de 1.00 km y una longitud promedio entre Cuyo Chico y Cotataqui de 5.50 km, donde hubo un deslizamiento pendiente abajo de una masa de configuración compleja, con la parte superior vertical, para luego pasar a ser curva. La masa deslizada está compuesta por materiales sueltos provenientes de la erosión de las pizarras del Paleozoico inferior, al ser saturados de agua

conforman una masa fluida de gran densidad que se desplaza lentamente. Este comportamiento es debido a los factores físico-geográficos, en especial al relieve del terreno y a las condiciones hidrológicas, como climáticas de la región, lo que implica sistemáticamente la vulneración de la estabilidad del talud (SIAR, 2014). Una gran importancia tiene las precipitaciones pluviales y el uso del agua en los cultivos. Al pie de este deslizamiento se localiza una población, donde las construcciones y la carretera que conduce al sitio arqueológico de Písaq, muestran agrietamientos y desplazamientos (Carlotto et al., 1996).

- b) **Deslizamiento de Calca:** Deslizamiento muy antiguo se ubica en el sector de Unuraqui en Calca, en la margen izquierda del río Vilcanota, produjo un gran represamiento del río Vilcanota formando una laguna que posiblemente alcanzó hasta Písaq. La actual ex-hacienda Urco, se halla sobre material del frente de este deslizamiento en la margen derecha del río Vilcanota. La escarpa de este deslizamiento, se ubica a 3,900 metros y se ha desarrollado sobre las rocas volcánicas de Grupo Mitu que se hallan fuertemente fracturados (Carlotto et al., 1996).
- c) **Deslizamiento de Urubamba:** Varios deslizamientos antiguos y recientes de yesos y lutitas rojas, con alturas que oscilaron entre 150 y 450 metros se observaron en la margen izquierda del río Vilcanota entre Huayllabamba y Pachar. El deslizamiento del cerro Yawarmaqui de Urubamba, dejó en la margen derecha del río Vilcanota, una zona de depósito de montículos de lodo, bloques de yeso, calizas, grava y lutitas de la Formación Maras, a causa del exceso de humedad durante la temporada de lluvias, cuya infiltración hidrata las capas de anhidrita, aumenta su volumen, ocasiona presiones enormes sobre las rocas adyacentes y debilita la resistencia al esfuerzo cortante del material que componen los cerros (Kalafatovich, 1977).

Por el contrario, la pérdida de humedad durante la época seca deseca los bloques de yeso y sobre todo las rocas arcillosas causando contracciones, por lo que los sedimentos pierden estabilidad y se deslizan súbitamente ladera abajo, por el impulso de fuerzas de gravedad. El deslizamiento del cerro Yawarmaqui ocurrido en agosto de 1678, pudo haber tenido este origen, cuya carga represó el río Vilcanota, inundando hasta el poblado de Yucay, con la consiguiente

destrucción de varias poblaciones y pérdida de vidas humanas (Núñez & Chacaltana, 2020).

- d) Aluvión en Urubamba:** El día 17 de octubre del 2010 ocurrió un aluvión en la ciudad de Urubamba, producto de un desprendimiento de una pequeña masa (100 x 30m) del glaciar del Chicón, que llegó a la ciudad de Urubamba alrededor de las 23.35 h. El desprendimiento de este bloque de hielo provocó el rebalse de una pequeña laguna (100 x 100m) a 4870 msnm. El rebalse incrementó el caudal de un pequeño riachuelo, lo que a su vez provocó el rebalse de la laguna Pucacocha (100 x 60m), que se halla al borde de una planicie de retroceso glaciar y al inicio de un talud de fuerte pendiente. Las aguas rebalsadas erosionaron el material morrénico compuesto de bloques y gravas de rocas, arcillas, limos y arenas, que se halla colgado en la ladera de pendiente muy alta ($> 60^\circ$) (Carlotto et al., 2010) .

La erosión de este material, por la gran cantidad de agua, originó un flujo de detritos (aluvión) que descendió hasta la quebrada Occororuyoc donde se depositó gran parte del volumen aluviónico y dejando pasar la parte líquida con sedimentos finos (flujos de lodo) (Cárdenas et al., 2013). El fenómeno afectó unas 300 viviendas con más de 1,200 damnificados, inundando tierras de cultivo (Carlotto et al., 2012).

- e) Inundación en Písaq, Calca, Yucay, Ollantaytambo:** Las inundaciones en la llanura de inundación, en estas ciudades, están relacionadas al incremento de aguas superficiales en la temporada de lluvias anuales o extraordinarias.

El incremento de caudal de las aguas en las quebradas que llegan a estas ciudades y el río Vilcanota, ocasionó la inundación de las márgenes de los pequeños ríos de la quebrada y terrazas bajas del río Vilcanota. En estas márgenes no se respetó la faja marginal, por lo que las viviendas y terrenos de cultivo fueron inundadas y afectadas (Carlotto et al., 2005a). Las inundaciones también pueden estar acompañados por deslizamientos, incrementándose el peligro, con el represamiento y posterior desembalse como aluviones, y ocasionar daños en las viviendas y terrenos de cultivo, como ocurrió el año 2010 en algunas quebradas del valle sagrado, pero de pequeñas dimensiones.

Los peligros de geodinámica externa están relacionados con las precipitaciones pluviales anuales y extraordinarias, al tipo de rocas y suelo, pendiente, fracturamiento de rocas, circulación de aguas superficiales y subterráneas, que inciden en la inestabilidad de rocas y suelos, que afectan en la seguridad física de las poblaciones con destrucción de viviendas e infraestructura escolar y sanitaria, en algunos casos con pérdidas de vidas humanas y afectación de terrenos de cultivo.

1.2.3. Antecedentes históricos

Los antecedentes históricos datan de la época preinca hasta el reciente. La historia de los desastres y eventos geológicos ocurridos en la zona de estudio, nos ayuda a percibir los antecedentes de la vulnerabilidad de las poblaciones que se asentaron en el valle sagrado, con la transformación del paisaje natural y cultural hasta la actualidad a través de la evaluación de los daños de los peligros geológicos (GRC, 2011).

a) Época prehistórica

En esta época los primeros habitantes ocuparon las laderas de las quebradas. En el intermedio tardío se dan ocupaciones más importantes por el volumen de población como las Etnias de Amaru Mayu, Pillahuatas, Antis, etc., dedicadas a la domesticación de animales como camélidos y que utilizan por primera vez la tecnología de andenes rudimentarios como obras de mitigación de importancia para estabilizar las laderas (SIAR, 2014). Inicialmente se ubicaron en la margen derecha del río Vilcanota en Coya, Lamay, Calca, y Urubamba.

En el horizonte medio (600 D.C.) se empieza a transformar el valle acondicionándolo por su vocación al uso productivo intensivo del maíz y por la influencia de la cultura Wari se da un salto cualitativo tecnológico con las construcciones monumentales y de llactas (SIAR, 2014).

Las llactas o centros ceremoniales y administrativos en el valle sagrado fueron localizados en su gran mayoría en laderas de formaciones rocosas y estabilizadas artificialmente de tal modo que garantizaban su seguridad física, es por ello que hasta la actualidad no han sufrido daños frente a fenómenos extremos, evidencia de la baja vulnerabilidad global por exposición, resiliencia

y resistencia de los materiales empleados (Mampostería de piedra con características sísmicas) (Combey et al., 2021).

b) Época Inca

En esta época los incas ocupan los abanicos aluviales, áreas con pendientes suaves y clima templado, con abundante agua producto de los deshielos de los nevados, aguas superficiales producto de las precipitaciones pluviales anuales y aguas subterráneas. La ocupación de los abanicos aluviales fue intensa habiéndose construido aproximadamente 55 sitios arqueológicos en Calca, 21 sitios arqueológicos en Urubamba, y otros centros urbanos en Písaq, Huchuy Qosqo, Calca, Ancasmarcha, Urco, Chinchero y Ollantaytambo (Ponce, 2015). Todos estos sitios arqueológicos se ubicaban en ambos márgenes, así como otros de menor jerarquía como las grandes obras de ingeniería productiva (Andenes, reservorios y canales de riego) se ubican en las zonas altas y en las laderas bajas de las montañas.

Las andenerías cumplían la función de dar estabilidad a los terrenos como muros de contención, productiva, preventiva y de mitigación (Posthumus, 2005). Los andenes incas se adecuan a la forma de los terrenos en Písaq, Urubamba, Yucay y Ollantaytambo y siguen cumpliendo las funciones preventiva y productiva, evitando los procesos geodinámicos (Camino & Zapata, 2020).

Actualmente en el abanico aluvial de Ollantaytambo y laderas de la quebrada Patacancha se tiene la mayor cantidad de andenes, también se presentan en los abanicos aluviales y piso de valle de las localidades de Písaq, Urubamba y Yucay. En el valle sagrado desde Ollantaytambo hasta Písaq en ambos márgenes los andenes fueron utilizadas como áreas de cultivo y como defensa ribereña (Camino & Zapata, 2020). Otros sitios con andenes productivos se ubican en Urco, Unuraqui y Ccochoc en Calca. Al respecto se menciona: *“El Estado Inka ha promovido la construcción de grandes infraestructuras, encausa el río Vilcanota recuperando espacios agrícolas, se construyen andenes y sistemas hidráulicos para la producción intensa en gran escala, asimismo se edifican cantidad de qolccas, caminos y asentamientos con*

funciones administrativas, económicas e ideológicas” (Beresford-Jones et al., 2018).

Con respecto a las obras de defensa ribereña inca en el río Vilcanota que tuvieron el fin de reducir la vulnerabilidad de las áreas productivas frente a inundaciones, estuvieron encauzados en las localidades de Urubamba, Calca y Ollantaytambo, donde se conservan vestigios de estas estructuras, aunque en muchos otros lugares se destruyeron por eventos extremos, erosión fluvial, el paso del tiempo y nulo mantenimiento actual (SIAR, 2014).

El historiador José Tamayo Herrera menciona, *“hubo grandes inundaciones en la época prehispánica, es por ello que existen numerosos muros que demuestran que los incas canalizaron en parte el río Vilcanota y evitar desastres”* (Tamayo, 2016).

c) **Época colonial**

En el valle sagrado, los principales asentamientos humanos se ubicaron en el piso de valle como poblados, villas, reducciones de indios o como casas de haciendas (SIAR, 2014). El valle de Yucay es una mención constante en las crónicas de la Conquista, ubicado a cuatro leguas de Cuzco, muy hermoso por su clima acogedor que ni hace demasiado ni calor, donde los conquistadores pensaron fundar la capital del Cusco colonial (Cieza de León, 1553). En esta época los asentamientos humanos se ubicaron en las partes bajas, en las riberas de los ríos y el piso de valle de las quebradas, que aumentó la vulnerabilidad a los peligros por inundaciones y aluviones (Cornejo, 2014).

Las casas de hacienda por su economía feudal posteriormente fueron rodeadas de viviendas conformando en la actualidad, en algunos casos, centros poblados mayores o ciudades como Calca y Urubamba (SIAR, 2014).

El Virrey La Serna, desde Yucay dominaba sus dependencias, se crearon las “Reducciones de Indios” en los que se concentraban a las poblaciones dispersas en poblados a fin de poderlos dominar y tener el control (SIAR, 2014). Así se concentraron los pobladores en Urubamba, Písaq, Ollantaytambo, Calca, Huayllabamba y Taray, que se encuentran en zonas de peligros por inundación

y aluvi3n. En conclusi3n, la vulnerabilidad f3sica, social e institucional aument3 considerablemente (GRC, 2011).

La destrucci3n de las redes sociales, del sistema pol3tico religioso, institucional y econ3mico prehisp3nico y la implantaci3n de un nuevo sistema represivo y de explotaci3n de recursos desvirtu3 totalmente el significado del territorio y de su cuidado y protecci3n. No se valoraba el capital humano produci3ndose una merma considerable de poblaci3n nativa hacia fines del siglo XVIII (GRC, 2011).

d) 3poca republicana y actual

En la 3poca republicana hasta la actualidad el crecimiento de las poblaciones sigui3 el patr3n de los asentamientos prehisp3nico y colonial, por lo tanto, se incrementaron los peligros geol3gicos en los poblados. Los poblados de Ollantaytambo y Calca consolidaron su crecimiento desde la 3poca prehisp3nica. El crecimiento de los poblados de Pisaq, Taray Urubamba, Lamay, Coya y Huayllabamba aument3 en funci3n a las haciendas de la colonia. El valle sagrado es un lugar estrat3gico por ser el punto de intercambio articulado de transporte desde Cusco a Machu Picchu y viceversa para el turismo (SIAR, 2014).

En la actualidad, los patrones de asentamiento es a lo largo de la carretera interprovincial que va paralela al r3o, han orientado la ocupaci3n de asentamientos humanos hacia el r3o Vilcanota y afluentes haci3ndolos m3s vulnerables a inundaciones y aluviones por ocupar suelos de origen fluvial propensos a fen3menos de licuaci3n de suelos caso Coya, Lamay, Calca, parte de Huayllabamba, Yucay y parte este de Urubamba (SIAR, 2014).

1.2.4. Resumen de los principales desastres

A continuaci3n se describe un resumen de la cronolog3a de los principales desastres ocurridos en la zona de estudio, reportadas por distintas fuentes (Predes, 2008; SIAR, 2014; Vilchez et al., 2020; INDECI, 2020).

A3o 1572: La historia inicia con una f3bula, probablemente cierta, donde el Cronista Crist3bal de Molina narra un evento importante de inundaci3n ocurrida en

la provincia de indios de Ancasmарca, a cinco leguas de Cuzco: dicen que cuando quiso venir el diluvio, un mes antes, los carneros que tenían, mostraron gran tristeza, y que de día no comían y de noche estaban mirando las estrellas, hasta tanto que el pastor que a cargo los tenía les preguntó qué habían visto a lo cual respondieron que mirase esa junta de estrellas las cuales estaban en aquel ayuntamiento, en acuerdo de que el mundo se había de acabar con aguas (SIAR, 2014). Y así oído esto, el pastor lo trató con sus hijos e hijas, los cuales eran seis y acordó con ellas que recogiesen comida y ganado lo más que pudiesen, y subieron a un cerro muy alto llamado Ancasmарca y dicen como las aguas iban creciendo y cubriendo la tierra, iba creciendo el cerro de tal manera que jamás los sobrepujaron, y que después como se iban recogiendo las aguas, se iba bajando el cerro, y así de estos seis hijos de aquel pastor que allí escaparon, se volvió a poblar la provincia de los Cuyos (de Molina, 1573). El relato, similar al del deslizamiento del Yawarmaqui en Urubamba, alude a fenómenos muy grandes ocurridos en una época de estío, lo que evidencia que los desastres no siempre pueden suceder en época de lluvia (Kalafatovich, 1977).

Año 1678: El gran deslizamiento del cerro Yawarmaqui en Urubamba ocurrido el 19 de agosto, en un día soleado y seco, que represó el río Vilcanota formando un dique natural. En 6 días las aguas represadas llegaron hasta Yucay. Contradictoriamente la población se albergó en áreas de la quebrada del Chicón, que es una zona de peligro alto por aluvión (SIAR, 2014).

Año 1679: En mayo, a los once meses de la inundación de Yucay, ocurrido una gran avenida de cieno en el pueblo de Ollantaytambo, que los naturales llaman Ancaypahua (Pucrucancha), cuyas vertientes se originaron de una represa de un pedazo de tierra, que poco antes había caído sobre el lago Avisccochoa, tres leguas distantes de dicho pueblo. Pasó por la misma plaza, derribando casas y arrancando árboles, aunque sin detrimento personal por haber sido de día (SIAR, 2014).

Año 1942: Aluvión del nevado Chicón-Urubamba ocurrido el 28 de febrero, con daños considerables, 19 muertos, 34 heridos y destruyó casi todas las construcciones situadas entre el cementerio y el río Vilcanota a todo lo largo del río Tullumayo. Se menciona que el colegio de varones quedó totalmente destruido reconstruyéndose en el mismo lugar, así mismo se construyó paradójicamente en el

curso del aluvión en la margen izquierda de la desembocadura del aluvión el nuevo hotel de turistas de Urubamba (SIAR, 2014).

Año 1950: Aluvión en la quebrada Kitamayo-Pisac, destruyó la parte central del poblado de origen colonial, incluido la mitad del templo, contradictoriamente se construyó una nave nueva en el mismo sentido del curso del aluvión conocido por la población como “El buque”. El fenómeno se ha reeditado el 2010 con otras características con un saldo de 7 muertos (SIAR, 2014).

Año 1950: Aluvión en la ciudad de Calca, que afectó la Plaza de Armas, las calles Espinar y Miguel Grau (SIAR, 2014).

Año 1950: Aluvión en el poblado de Taray, que afectó grandemente el mismo, el 2010 se reeditó igualmente el fenómeno con un saldo de 7 muertos (SIAR, 2014).

Año 1989. Deslizamiento en la quebrada Ccochoc-Calca. El evento represó el río Ccochoc, cuyo desembalse afectó terrenos de cultivo, viviendas, las calles Espinar, Miguel Grau, Plaza de Armas y la carretera a Urubamba (Predes, 2008).

Año 1997: Inundación fluvial en Pisac ocurrido el 16 de febrero. Desbordes del río Vilcanota dejaron 60 personas damnificadas y 60 afectadas; 12 viviendas afectadas; 200 ha de cultivo perdidos, el puente Pisac a punto de colapsar (Predes, 2008).

Año 1997: Aluvión e inundación en Coya-Calca, ocurrido el 16 de marzo. Desbordes del río Vilcanota dejaron 80 personas damnificadas y 305 afectadas; 16 viviendas destruidas y 61 afectadas; 12 ha de cultivo perdido; y un centro educativo afectado (Predes, 2008).

Año 1998: Aluvión en Calca ocurrido el 11 de diciembre. El evento dejó un saldo de 90 damnificadas, 15 viviendas afectadas y 35 ha de cultivos perdidos (Predes, 2008).

Año 1997: Aluvión en Calca ocurrido el 12 de diciembre. El flujo dejó 75 personas y 15 viviendas afectadas (Predes, 2008).

Año 1998: Inundación fluvial en Chilca ocurrido el 8 de enero. Los desbordes del río Patacancha dejó 115 personas damnificadas, 20 viviendas afectadas y 3 viviendas destruidas (Predes, 2008).

Año 1999: Aluvión en Ollantaytambo ocurrido el 25 de enero. El flujo causó el represamiento del río Vilcanota, cuyas aguas se desbordaron y afectaron la línea férrea en un tramo de 200 m de longitud entre el km 96+300 al 96+500, interrumpiéndose el servicio de tren Cusco-Machupicchu (Predes, 2008).

Año 2000: Inundación en Calca (SIAR, 2014).

Año 2001: Aluvión en Huancalle-Taray ocurrido el 5 de febrero. El evento dejó 85 personas damnificadas, 16 viviendas destruidas, un centro de salud afectado y 3 puentes peatonales destruidos (Vilchez et al., 2020).

Año 2002: Aluvión-inundación en la quebrada Ancahuachana (Ex planta eléctrica)-Calca, con desembalse del río Ccochoc, con afectación del barrio Piste y sistema de abastecimiento de agua a la ciudad de Calca (SIAR, 2014).

Año 2002: Inundación fluvial en Huancalle-Taray, ocurrido el 4 de enero. El desborde del río Huancalle inundó 8 viviendas, dejando 40 personas damnificadas y 10 ha de cultivo perdido (Vilchez et al., 2020).

Año 2002: Aluvión en Huancalle-Pisac, ocurrido el 25 de febrero. Afectó 5 viviendas y un número no precisado de hectáreas de cultivos (Vilchez et al., 2020).

Año 2002: Inundación fluvial en Huchuy Qosqo-Lamay ocurrido el 3 de abril. Los desbordes de ríos y lagunas dejaron 5 viviendas inundadas y 25 personas damnificadas (Vilchez et al., 2020).

Año 2003: Inundación en Ollantaytambo el 10 de febrero, con 75 damnificados, 30 viviendas afectadas, 1 CCSS afectadas y 3 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

Año 2003: Aluvión en Cancha (Quebrada Huarán) con formación de nueva laguna (SIAR, 2014).

Año 2003: Deslizamiento, derrumbe, cárcava, reptación de suelos en Cuyo Chico, Ampay y Ccotataqui-Pisac, ocurrido el 3 de septiembre. Asentamientos de 200 m de la plataforma de la carretera Písac-Complejo Arqueológico de Písac, 6 viviendas afectadas en el sector de Cuyo Chico y unos 40 m de carretera pueden ser afectados por reactivación de deslizamiento antiguo. Asentamiento de viviendas y un colegio en Cuyo Chico. Colegio de la comunidad de Ampay con agrietamiento de paredes

por efectos de asentamientos de terrenos. Asentamiento en la trocha Cuyo Chico-Ccotataqui (Vilchez et al., 2020).

Año 2004: Aluvión en Calca el 1 de enero, con 8 damnificados y una vivienda destruida.

Año 2004: Inundación en Calca el 13 de enero. Con 50 afectados y 10 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2004: Inundación en Calca el 5 de febrero. Con 12 damnificados y 10 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2004: Inundación en Taray el 4 de febrero, con 10 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

Año 2004: Aluvión en Calca el 18 de julio, con 19 afectados y 4 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2004: Deslizamiento en la comunidad Saclo-Calca, ocurrido el 23 de diciembre. El evento dejó 100 personas afectadas, una persona desaparecida, una fallecida, 20 viviendas destruidas y 10 ha de cultivos afectados (Vilchez et al., 2020).

Año 2004: Aluvión en las quebradas Pucamarca y Huchuy Qosqo-Calca, por precipitaciones y granizada (SIAR, 2014).

Año 2004: Aluvión y granizada en Saclo-Calca (Quebrada Quello Uno), 13 viviendas afectadas, 1 vivienda colapsada, 2 personas fallecidas (SIAR, 2014).

Año 2005: Alud en Ollantaytambo el 13 de octubre, con 6 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

Año 2005: Deslizamiento en Ollantaytambo el 19 de diciembre (INDECI, 2020).

Año 2005: Aluvión en la comunidad Palomar (Limite con la zona de estudio) en Ollantaytambo con interrupción de la línea férrea (SIAR, 2014).

Año 2006: Deslizamiento en Urubamba el 15 de enero (INDECI, 2020).

Año 2006: Deslizamiento en Ollantaytambo el 12 de mayo, con 15 damnificado y 4 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2006: Deslizamiento en Ollantaytambo el 18 de mayo, con 9 damnificado y 1 vivienda destruida (INDECI, 2020).

Año 2006: Deslizamiento en Accha Baja-Calca, con corte de vía terrestre por ruptura de canal inca (SIAR, 2014).

Año 2007: Deslizamiento en Calca el 18 de enero, con 31 damnificado y 7 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2007: Inundación en Calca el 3 de febrero, con 10 damnificados (INDECI, 2020).

Año 2007: Inundación en Calca el 23 de setiembre, con 250 damnificados (INDECI, 2020).

Año 2007: Inundación en Lamay el 16 de marzo, con 26 damnificados (INDECI, 2020).

Año 2008: Inundación en Calca el 26 de febrero, con 6 damnificados y 2 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2008: Lluvia intensa en Calca el 12 de abril, con 1 damnificado y 1 vivienda destruida (INDECI, 2020).

Año 2008: Aluvión en la quebrada Ccan Can-Calca (Quebrada Huandar), con interrupción de la carretera Calca-Urubamba (SIAR, 2014).

Año 2009: Deslizamiento en Calca el 1 de enero (SIAR, 2014).

Año 2009: Inundación el Calca el 15 de enero, con 2 familias afectadas y 1 vivienda afectada (INDECI, 2020).

Año 2009: Inundación en Yucay 31 de marzo (INDECI, 2020).

Año 2010: Aluvión en Yunca Yuncay-Yucay (Quebrada Marcuyohuayjo) (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluvión en la quebrada Pucamarca-Lamay, que afectó parte del centro poblado de Huchuy Qosqo (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluvión en Saclo-Calca (Quebrada Quello Uno) (SIAR, 2014).



Año 2010: Aluvión en la quebrada Marcuyohuayjo en Huayllabamba-Urubamba (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluvión en la quebrada Tojojohuayco-Coya, el que destruyó parte la hacienda Paullo Chico (SIAR, 2014).

Año 2010: Inundación-erosión fluvial en el km. 82 Piscacucho-Ollantaytambo, destrucción de la plataforma de la línea férrea en 0.5 km (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluviones ocurrieron en la microcuenca Taray-Pisaq, en las quebradas Ccalla Rayan, Ttiohuayco, Quejayoc a la altura de Huancalle, con destrucción, inundación y deslizamiento de la carretera Cusco-Pisaq (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluvión en la quebrada Colispata-Pisaq, cerca de la comunidad Viacha-Tucsan (SIAR, 2014).

Año 2010: Aluvión en quebrada Ancahuachana-Calca (Ex planta eléctrica) (SIAR, 2014).

Año 2010: Inundación y erosión fluvial en Tanccar pampa-Ollantaytambo-Aguas Calientes, ocurrido el 10 de enero. El desborde del río Vilcanota produjo el colapso del puente San Pedro; además erosionó la plataforma de la carretera Ollantaytambo-Piscaycucho y la plataforma de la línea férrea (Vilchez et al., 2020).

Año 2010: Aluvión en la quebrada Chicón-Urubamba, ocurrido el 17 de enero. Afectó pastos naturales, zonas agrícolas y viviendas. Se canalizó por las principales avenidas de la ciudad de Urubamba, erosionó el asfalto y destruyó sistemas de agua y desagüe de los sectores de Cichubamba, San Isidro, Yanaoca y Urubamba distrito (Vilchez et al., 2020).

Año 2010: Aluvión en Lamay el 23 de enero, con 600 damnificados y 30 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Huayllabamba el 24 de enero (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Maras el 24 de enero. Con 165 afectados, 29 viviendas destruidas, 1 vivienda afectada (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Maras ocurrido el 24 de enero. Con 185 damnificado, 37 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Ollantaytambo ocurrido el 24 de enero, con 50 damnificados, 85 afectados, 10 viviendas destruidas, 17 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Ollantaytambo el 24 de enero, con 100 damnificados, 20 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Calca ocurrido el 25 de enero, con 678 damnificados, 600 afectados, 125 viviendas destruidas, 80 viviendas afectadas, 1000 ha perdidas y 8 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación fluvial en el sector Huayronccolloc Pampa en Ollantaytambo, ocurrido el 26 de enero. El río Vilcanota inundó 15 viviendas, la plaza principal, la iglesia y terrenos de cultivo (Vilchez et al., 2020).

Año 2010: Inundación en Urubamba ocurrido el 27 de enero, con 7 heridos, 700 damnificados, 200 afectados, 140 viviendas destruidas, 40 viviendas afectadas, y 10 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Lamay ocurrido el 31 de enero, con 250 damnificados, 300 afectados y 47 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Calca ocurrido el 20 de febrero (INDECI, 2020).

Año 2010: Alud en Taray ocurrido el 1 de marzo de 2010 Con 750 damnificados y 150 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Inundación en Coya ocurrido el 1 de marzo. Con 62 afectados y 20 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2010: Alud en Lamay ocurrido el 1 de marzo. Con 405 afectados, 81 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2011: Deslizamiento en Coya ocurrido el 10 de enero. Con 1600 afectados y 350 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2011: Inundación en Urubamba ocurrido el 21 de febrero. Con 15 afectados, 3 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2011: Inundación en Calca ocurrido el 12 de febrero. Con 90 damnificados, 418 afectados, 18 viviendas destruidas, 83 viviendas afectadas (INDECI, 2020).



Año 2011: Inundación en Taray ocurrido el 13 de febrero de 2011. Con 2 damnificados, 130 afectados, 1 viviendas destruidas y 25 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2011: Deslizamiento en Coya ocurrido el 22 de febrero. Con 75 afectados y 40 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2011: Inundación en Lamay el 23 de febrero (INDECI, 2020).

Año 2011: Deslizamiento en Calca ocurrido el 15 de abril Con 7 damnificados, 7 viviendas destruidas (INDECI, 2020).

Año 2011: Deslizamiento en Calca ocurrido el 6 de mayo (INDECI, 2020).

Año 2011: Deslizamiento en Taray ocurrido el 20 de junio Con 90 damnificados y 1 CCSS destruido (INDECI, 2020).

Año 2011: Inundación en Calca ocurrido el 10 de agosto Con 1 vivienda destruida y 1 IIEE afectado (INDECI, 2020).

Año 2011: Aluvión en Urubamba, el 27 de octubre, con 105 afectados, 21 viviendas afectadas (INDECI, 2020)

Año 2011: Deslizamiento en Maras ocurrido el 25 de diciembre (INDECI, 2020).

Año 2011: Inundación y erosión fluvial del puente Huayllabamba en Urubamba, ocurrido en el mes de enero. Socavamiento de las bases del puente Huayllabamba, por lo que fue interrumpido el tránsito de vehículos (Vilchez et al., 2020).

Año 2011: Inundación y erosión fluvial en Yucay-Urubamba ocurrido el mes de enero. Erosión de 500 m de plataforma de carretera, inundación de terrenos de cultivo (Vilchez et al., 2020).

Año 2011: Aluvión en Urubamba ocurrido en el mes de enero (Vilchez et al., 2020).

Año 2011: Inundación fluvial en Huycho-Urubamba ocurrido el mes de enero. Destrucción del puente Huycho y colapso de 23 viviendas (SIAR, 2014).

Año 2012: Inundación en Huayllabamba ocurrido el 2 de enero (SIAR, 2014).

Año 2012: Deslizamiento en Ollantaytambo ocurrido el 17 de enero: Con 24 afectados, 10 viviendas afectadas (INDECI, 2020).



Año 2012: Inundación en Calca ocurrido el 14 de febrero (INDECI, 2020).

Año 2012: Inundación en Maras ocurrido el 15 de febrero. Con 350 afectados y 68 viviendas afectadas (INDECI, 2020).

Año 2013: Inundación en Calca ocurrido el 25 de febrero (INDECI, 2020).

Año 2013: Deslizamiento en Ollantaytambo ocurrido el 24 de noviembre (INDECI, 2020).

Año 2015: Derrumbe en Lamay ocurrido el 24 de febrero, con 55 damnificados (INDECI, 2020).

Año 2016: Inundación en Yucay ocurrido el 18 de enero, con 30 ha de cultivos afectados (INDECI, 2020).

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

En el piso de valle y en ambas laderas del Valle del Vilcanota entre Písaq y Ollantaytambo, ocurren fenómenos de geodinámica externa como deslizamientos y aluviones, que se denominan movimientos en masa (Carreño, 2006), ocurren además inundaciones causadas por el río Vilcanota y en algunas quebradas transversales, principalmente en la época de lluvias entre los meses de noviembre a marzo, las que en el tiempo han provocado pérdidas de vidas humanas y costosos daños materiales (Luna et al., 2020).

Estos peligros de geodinámica externa se activan o reactivan principalmente en la época de lluvias anuales, y mucho más en épocas de lluvias excepcionales, como por ejemplo la ocurrencia de aluviones en Taray y Urubamba el año 2010, con daños materiales de viviendas, vías de comunicación, así como la inundación de zonas urbanas y terrenos de cultivo (Carlotto et al., 2012). Adicionalmente, se sabe que existen muchas zonas, que, por sus características geodinámicas externas, antecedentes geológicos, históricos y recientes, son susceptibles a los movimientos en masa e inundación, las cuales pretenden ser identificadas y estudiadas con mayor detalle en esta investigación.

Los movimientos en masa (Abad et al., 2022) y las inundaciones (Luna et al., 2020; Pan & Qiu, 2022) constituyen las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo y del ámbito nacional, por lo que la evaluación del riesgo de desastre que generan estos movimientos en masa e inundación son de gran interés (Titko & Ristvej, 2020).

En el Perú se han elaborado mapas de susceptibilidad y de peligros a escala regional en las diferentes regiones, por diferentes instituciones nacionales, tales como el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Defensa Civil, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y otras instituciones (MINAM, 2015).

2.2. Definición del problema

Los estudios sobre la geología, geomorfología, peligros de geodinámica externa y susceptibilidad, por lo general, se han abordado a escala regional, con algunos estudios de peligro geológico a detalle en algunas localidades principales del Valle Sagrado de los Incas. La investigación aborda los estudios a escala local de la geología, geomorfología, pendiente, cobertura vegetal, la elaboración de los mapas de susceptibilidad de movimientos en masa e inundación, así como la determinación de los peligros de geodinámica externa, entre las localidades de Písaq y Ollantaytambo.

El problema planteado conlleva a plantear las siguientes preguntas:

Pregunta general

¿Cómo es la susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa entre las localidades de Ollantaytambo y Písaq?

Preguntas específicas

¿Cómo es la geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal?

¿Cuál es la susceptibilidad a movimientos en masa e inundación?

¿Cuáles son los niveles de peligro de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las poblaciones?

2.3. Intención de la investigación

La investigación tiene como intención desarrollar la geodinámica externa de la zona geográfica comprendida entre las poblaciones de Ollantaytambo y Písaq, como un

aporte en previsión de futuros desastres que podrían afectar la seguridad de la población.

2.4. Justificación

La gestión de riesgos de desastres tiene implicancia en la seguridad física de las ciudades y sus habitantes, así como en la economía, agricultura, ganadería, turismo y el bienestar social y la salud ambiental. En la zona de estudio se ubican importantes ciudades pertenecientes a la provincia de Urubamba con capitales de distrito como Urubamba, Chinchero, Huayllabamba, Maras, Ollantaytambo y Yucay. En la provincia de Calca se ubican las capitales de distrito de Calca, Coya, Lamay, Písaq, Taray. Al año 2020, las ciudades con más habitantes son Urubamba con 23,754 habitantes y Calca con 23,423 habitantes, con un total de 113,861 habitantes permanentes en el valle sagrado entre Písaq y Ollantaytambo (INEI, 2020). Además, el valle sagrado, un territorio que se desarrolla a lo largo del río Vilcanota-Urubamba que une los pueblos de Písaq y Ollantaytambo (P. García, 2018), cuenta con infraestructura arqueológica y hotelera, tales como Ollantaytambo, el Palacio del Inca Huayna Cápac en Urubamba, Calispuquio y Urco en Calca, Písaq y Chinchero, cuya conservación y protección es prioridad de la gestión pública y privada para el desarrollo del turismo, la principal actividad económica (de Oliveira, 2022).

Las principales ciudades del valle sagrado entre Písaq y Ollantaytambo se ubican sobre abanicos aluviales antiguos, que están expuestas a movimientos en masa e inundaciones generalmente en la época de lluvias anuales de noviembre a marzo o precipitaciones extraordinarias (Valderrama, 2006). En las márgenes del río Vilcanota ocurren inundaciones en la época de lluvias o precipitaciones extremas.

En las laderas las diferencias litológicas, las características estructurales, la topografía, pendiente y precipitaciones pluviales, tienen injerencia en el rompimiento de la estabilidad de taludes (Vilchez et al., 2020).

Actualmente las principales ciudades del valle sagrado presentan un crecimiento poblacional del 3.42% anual (INEI, 2020), con expansión urbana en viviendas y hoteles en los alrededores de la ciudad, debido al aumento de la oferta turística

nacional e internacional (Chevarría-Lazo et al., 2003), ocupando áreas de peligro por deslizamiento, inundación y aluvión en los cauces y quebradas, que pueden afectar la seguridad física de los pobladores y turistas que visitan estas ciudades.

El problema se acentuará con la construcción del aeropuerto internacional de Chinchero, donde los turistas extranjeros llegarán directamente al valle sagrado (García, 2019). Cabe destacar que la actividad de turismo es la segunda fuente de ingresos económicos de los pobladores del valle sagrado, y la corriente o flujo de divisas hacia el área de destino que produce el turismo no solo constituye una importante fuente de ingresos para aquellas empresas o personas vinculadas directamente con la actividad turística, sino que también beneficia al resto de sectores de la economía a través del denominado efecto multiplicador (Sipaucar, 2019).

El valle sagrado es un microcosmos en los Andes, una zona de productividad, privilegio y poder (Gade, 2016), reconocido por la oferta del mejor maíz blanco gigante, con el grano más grande del mundo, producido solo en distritos específicos de las provincias de Colca y Urubamba en Cusco (Agro Fergi, 2022); sin embargo, las áreas de cultivo están disminuyendo debido a la expansión urbana por viviendas e infraestructura hotelera y los peligros geológicos, afectando la segunda fuente de ingresos económicos de los pobladores del valle sagrado.

En el piso de valle del valle sagrado se encuentran las principales vías de acceso por carretera asfaltada o ferrocarril, de ingreso a los sitios arqueológicos de Machu Picchu, Ollantaytambo, Urubamba y Písaq, que es parte del circuito turístico del valle sagrado. Estas vías de comunicación por tramos, especialmente en la temporada de lluvias o lluvias excepcionales, son a veces afectadas por deslizamientos, aluviones e inundaciones (Carlotto et al., 2005d), que afectan negativamente en el transporte de alimentos, tránsito de pobladores y turistas, perjudicando en los ingresos económicos por servicios en hospedaje y, restaurantes.

A partir de los argumentos de los párrafos anteriores, el trabajo es de suma importancia y de prioridad para la planificación de esta parte del valle sagrado, y el aporte corresponde a la parte de la gestión de riesgos de desastres y prevención.



2.5. Objetivos

2.5.1. Objetivo general

Determinar la susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa entre las localidades de Ollantaytambo y Písaq.

2.5.2. Objetivos específicos

Determinar la geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal.

Determinar la susceptibilidad a movimientos en masa e inundación.

Determinar los niveles de peligro de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las poblaciones.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El estudio se realizó en el Valle del Vilcanota comprendido entre las localidades de Ollantaytambo y Pisaq, ubicado al norte de la ciudad del Cusco entre las coordenadas geográficas $13^{\circ}15'29''S$ - $72^{\circ}15'48''O$ y $13^{\circ}25'27''S$ - $71^{\circ}51'28''O$ (Figura 2), denominado Valle Sagrado de los Incas, declarado como Patrimonio Cultural de la Nación (RD 988/INC, 2009). El acceso a las áreas de estudio fue principalmente por medio del transporte vehicular y caminos de herradura.

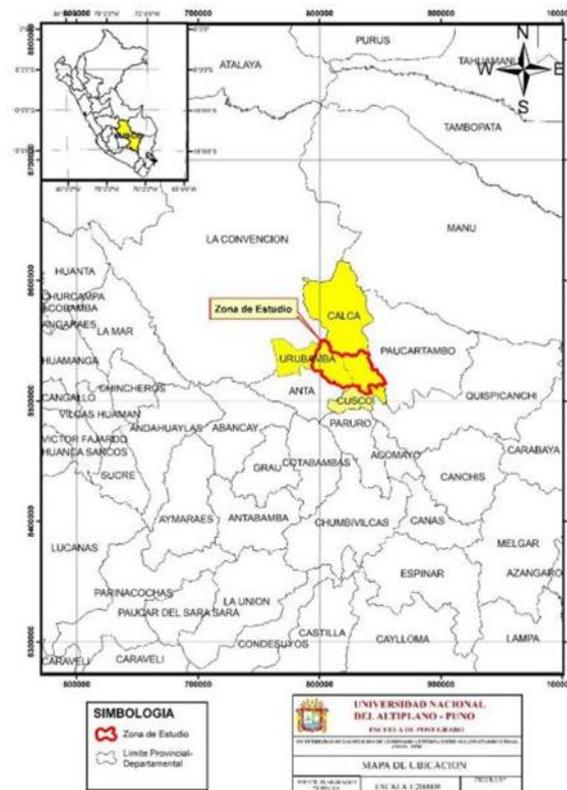


Figura 2. Mapa de ubicación del Valle del Vilcanota, entre Ollantaytambo y Pisaq, Cusco.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población geológica está representada por todo el relieve de la superficie exterior de la zona de estudio, que comprende el estudio de las unidades geológicas y eventos como los movimientos en masa y las inundaciones (Alperin, 2013).

3.2.2. Muestra

La muestra geológica se obtuvo de los cuerpos de rocas denominados como Grupo o Formación. De la observación geológica de las muestras se obtienen datos de las características de los cuerpos rocosos. Así mismo, los datos geológicos se obtuvieron de la información bibliográfica disponible.

La información también se obtuvo de los antecedentes geológicos e históricos de las rocas, suelos y peligros de geodinámica externa que se muestran en los afloramientos y cortes de talud. Adicionalmente, el geólogo tiene la facilidad de utilizar instrumentos geológicos para la observación indirecta de los afloramientos de rocas y material reciente por medio de fotografías aéreas e imágenes satelitales, que son complementarios a los mapas topográficos para la cartografía geológica y de geodinámica externa.

3.3. Metodología por objetivos

3.3.1. Determinación de la geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal

El trabajo geológico se hizo en las etapas de pre-campo, campo y pos-campo mediante la observación directa y documental de la superficie terrestre, habiendo sido la observación directa hacia el relieve la actividad más importante, donde se ha cartografiado y descrito las unidades geológicas, geomorfológicas, cobertura vegetal y pendiente de la zona estudiada, utilizando materiales y equipos geológicos para la toma de datos (Sánchez, 2015).

La etapa de pre-campo se utilizó para la recopilación de información disponible, análisis, evaluación y sistematización de la bibliografía relacionada a la geología,

pendiente, geomorfología y cobertura vegetal de la zona de estudio. La información geológica y geomorfológica se pudo localizar principalmente en el cuadrángulo geológico de Calca y Urubamba (Hojas 27 r y 27 s) a escala 1:100,00 (Carlotto et al., 1996), que cuenta con informes y mapas geológicos, así como en los trabajos técnicos locales reportados en la literatura.

El mapa topográfico digital se elaboró mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) y el software ArcGIS, para lo cual se contó con imágenes satelitales de la zona de estudio, hallando primero un modelo digital de elevación (DEM), con la cual se pudo obtener un mapa topográfico con curvas de nivel.

Con los datos recopilados de la información bibliográfica se elaboró la base de datos y los mapas preliminares de geología, geomorfología, pendiente, cobertura vegetal, sobre los mapas topográficos a escala 1:25000.

Sobre los mapas topográficos con información bibliográfica se continuó el cartografiado de las áreas sin información, para lo cual se completó el cartografiado en gabinete, con la utilización de fotografías aéreas e imágenes satelitales de la zona de estudio, obteniéndose de esta manera los mapas preliminares de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal.

Fue necesario la elaboración de un mapa de rutas para el trabajo de campo, para la labor de toma de datos de campo y cartografía de mapas. Así mismo, el reconocimiento geológico preliminar en campo de la zona de estudio, con el fin de definir las rutas, así como cronogramar y presupuestar las visitas de campo.

Los instrumentos utilizados para el trabajo de campo fueron brújula Brunton (Brújula de geólogo), GPS, cámara fotográfica, lupa de geólogo 20X, martillo de geólogo, cinta métrica, escalímetro y materiales como cuaderno de campo, lápices, colores, lapiceros, ácido clorhídrico (HCl), bolsas de muestreo para rocas, plumón indeleble, cinta Masking Tape, tarjetas de muestreo, mapas topográficos, escalímetro, borrador, los mismos que sirvieron para la toma y registro de datos; y finalmente, equipo personal como mochila, zapatos de cuero, sombrero, poncho de agua, guantes, agua, alimentos, medicinas personales.

La etapa de campo consistió en el uso del mapa de rutas para las visitas de campo geológicas, tomando los datos en el cuaderno de campo y en los mapas preliminares. Los datos de campo fueron registrados en el cuaderno de campo, consignando fecha y año, integrantes del equipo de trabajo y el punto de descripción mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Fang et al., 2007). En el afloramiento se realizó una descripción macroscópica de la litología o material cuaternario, con la lupa de geólogo (aumento de 20x), luego se realizó las medidas de rumbo y buzamiento de los estratos, pliegues, fracturas, fallas, con la brújula Brunton. También se muestrearon rocas y sedimentos, los que fueron guardados en bolsas y rotulados con su codificación para su reconocimiento y posterior descripción detallada en gabinete o etapa post-campo.

El cartografiado preliminar de los mapas temáticos fue contrastado en campo, los mismos que fueron corregidos en caso necesario, con una buena definición de los contactos de las unidades geológicas, geomorfológicas y de cobertura vegetal; y finalmente, se realizaron los registros fotográficos en plano general y en plano de detalle del afloramiento o paisaje.

La etapa pos-campo fue necesario para la comprobación y revisión de la toma de datos del cuaderno de campo y de los mapas de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal. En esta fase se realizaron las siguientes labores:

Nueva revisión y definición final de contactos de los mapas temáticos, nuevamente con ayuda de fotografías aéreas e imágenes satelitales. Elaboración de los mapas de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal. Digitalización de los mapas temáticos de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal, que son considerados como factores condicionantes. Descripción macroscópica detallada de las muestras de rocas. Análisis e interpretación de los mapas temáticos.

3.3.2. Determinación de la susceptibilidad por movimientos en masa e inundación

La susceptibilidad por movimientos en masa e inundación se determinó en la etapa pos-campo o de gabinete, para lo cual fue necesario un equipo de cómputo, sea PC o laptop, que tenga instalado el software ArcGIS, a fin de digitalizar los mapas.

La susceptibilidad a movimientos en masa e inundación, entre Ollantaytambo y Písaq, se determinó mediante el uso de los factores condicionantes de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal (Tabla 2); sin embargo, se debe tener presente que el tipo e importancia de cada factor considerado para explicar la susceptibilidad a un fenómeno de remoción en masa depende del marco geoambiental (relieve, geología, geomorfología y procesos morfodinámicos) y puede diferir sustancialmente de un área a otra debido a diferentes condiciones del terreno (Corominas et al., 2014). Cada factor se desarrolló de manera individual clasificándolo y ponderándolo; luego, se superpusieron los mapas utilizando el software ArcGIS que es un Sistema de Información Geográfica (SIG). En la superposición de mapas y el desarrollo de la cartografía final, se aplicaron diferentes pesos ponderados para cada uno de los factores, dados por la asignación de valores, por juicio de expertos con experiencia y conocimiento del tema; finalmente se obtuvo el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa e inundación.

Tabla 2

Tipos de factores condicionantes

Factor	Tipo de factor	Descripción
Condicionante	Geología	Litología-estructuras
	Pendientes	Rango de pendientes
	Geomorfología	Unidad geomorfológica
	Cobertura vegetal	Unidad vegetal / deforestación

3.3.2.1. Ponderaciones a los factores condicionantes a movimientos en masa

La ponderaciones a los factores condicionantes a movimientos en masa se realizó mediante el proceso de la jerarquía analítica (AHP) de Saaty, que consiste en la comparación de pares con respecto al valor ideal del 100%, donde se utiliza el vector propio principal de una matriz de comparación positiva por pares, donde la consistencia de los datos de la matriz se define y mide mediante una expresión que involucra el promedio de los valores propios no principales. El método implica dos pasos: primero se comparan parejas de alternativas, y segundo, se clasifican y sintetizan mediante el uso de un algoritmo apropiado (Saaty, 1977). La toma de decisiones se hace por jerarquía a partir de una o más niveles de criterios y alternativas, en una escala de 9 puntos para expresar la importancia de un elemento sobre otro, con respecto al siguiente nivel superior en la jerarquía. En la Tabla 3, se muestran los factores condicionantes de geología, geomorfología, pendiente y cobertura vegetal, a los cuales se les asignó un peso a juicio de expertos. El mayor peso de 40% fue asignado a la pendiente, por la inclinación de las laderas; luego 30% a la geomorfología y 20% a la geología, que están relacionados a la topografía y al tipo de roca o suelo respectivamente; y finalmente 10% a la cobertura vegetal, debido a la menor influencia en los movimientos.

Tabla 3

Pesos asignados a los factores condicionantes para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Factor condicionante	Símbolo	Peso	Peso %
Geología	GL	0.2	20
Geomorfología	GM	0.3	30
Pendiente	P	0.4	40

Cobertura vegetal	CV	0.1	10
Total		1.0	100

El **factor geología** estuvo representado por las unidades litoestratigráficas que se presentan en grupo o formación, están compuestas por rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas. Para ponderar las unidades litoestratigráficas se analizó el tipo y composición de las rocas y suelo, fracturas, grado de meteorización y características geotécnicas de calidad de las rocas y sedimentos. En la Tabla 4 se muestran las ponderaciones de las unidades geológicas, calificadas a juicio de expertos. Con ponderación 1, están los depósitos fluvial y lacustre, luego con ponderación 2 están la unidades geológicas duras y poco fracturadas, con ponderación 3 están las unidades con dureza media y fracturadas, con ponderación 4 están las unidades geológicas con dureza baja e incompetentes, con ponderación 5 están las unidades geológicas con dureza muy baja e incompetentes.

Tabla 4

Ponderación del factor geológico, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Unidad geológica y depósitos recientes	Símbolo	Descripción unidades litológicas y depósitos recientes	Ponderación geológica
Depósito fluvial	Q-f	Gravas, arenas, limos y arcillas fluviales, no compactos	1
Depósito lacustre	Q-la	Arenas a arcillas estratificadas, no compactos	1
Fm. Rumicolca	NpQ-ru	Andesitas con dureza alta y poco fracturadas	2
Gpo. San Jerónimo	Peo-sj	Conglomerados, areniscas y limolitas	2
Fm. Ayabacas	Kis-ay	Calizas y calcarenitas	2
Fm. Huancané	Ki-hn	Areniscas cuarzosas y lutitas, de dureza alta las areniscas	2

Grupo Mitu	PsTi-m	Aglomerados, lavas volcánicas, conglomerados areniscas y limos, de dureza alta a media	2
Grupo Copacabana	Pi-c	Calizas y lutitas de dureza media	2
Formación Sandía	Os-s	Cuarcitas y lutitas, de dureza media	2
Rocas ígneas	P-gr	Granitos poco alterados y fracturados.	2
Fm. San Gabán	Os-sg	Areniscas cuarzosas, pizarras, diamictitas, microconglomerados, de dureza media	3
Fm. Verónica	O-v	Conglomerados, areniscas y lutitas de dureza media y fracturados	3
Fm. Ollantaytambo	O-o	Conglomerados, esquistos, y cuarcitas de dureza media y muy fracturadas.	3
Fm. Huambutio	JsKi-hm	Conglomerados rojos violáceos, lutitas rojas, niveles de caliza y areniscas	3
Fm. Ccatca	Ds-ca	Cuarcitas, pizarras y diamictitas.	3
Grupo San José	Om-sj	Pizarras y limolitas esquistasas	3
Fm. Paucarbamba	Ki-pb	Areniscas y limoarcillitas de dureza media	4
Fm. San Sebastián	Q-sa	Arenas a arcillas y diatomitas, no compactos	4
Fm. Chincheros	Np-cc	Gravas a arcillas disgregables	4
Formaciones Quilque Chilca	Pp-qc	Microconglomerados, areniscas y lutitas	4
Formación Ananea	SD-a	Pizarras y limolitas esquistasas	4
Formación Puquín	Ks-pu	Areniscas, lutitas y yesos, incompetentes	5
Depósito aluvial	Q-al	Gravas a arcillas y bloques, no compactos de huaycos	5
Depósito coluvial	Q-co	Gravas a arcillas por gravedad no compactos	5
Depósito glaciario	Q-g	Gravas a arcillas y bloques, poco compactos	5

Formación Maras	Ki-ma	Yeso, anhidrita, limoarcillitas, y incompetentes	areniscas, calizas	5
-----------------	-------	--	--------------------	---

Con la adaptación del color del Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales (CENEPRED, 2014)

El **factor geomorfología** está representado por las unidades geomorfológicas de la zona de estudio. Estas unidades se han ponderado tomando en cuenta la litología, suelos, buzamiento de los afloramientos de rocas y suelos, la presencia de los movimientos en masa en las laderas de los cerros. En la Tabla 5 se presenta las ponderaciones del factor geomorfología, donde 1 corresponde a las mesetas, con litologías poco compactas, con ángulo de inclinación casi plano y sin presencia de movimientos en masa; mientras que 5 corresponde a los conos aluviales compuesto por material no compacto, con inclinaciones medianas y con presencia de movimientos en masa, especialmente en la época de lluvias.

Tabla 5

Ponderación del factor geomorfología, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Unidades y sub unidades geomorfológicas	Símbolo	Ponderación sub unidades
Piso de valle	PV	1
Meseta norte Pampallacta	MEN-P	1
Meseta norte Quello	MEN-QQ	1
Meseta sur Chinchero-Maras	MES-CM	1
Meseta sur Coricocha	MES-QQ	1
Lomadas	L	2
Cono aluvial norte	CAN	3
Cono aluvial norte Sillacasa	CAN-SI	3
Cono aluvial sur (4)	CAS	3
Cono aluvial norte Capco	CAN-CA	3
Cono aluvial norte Chojo	CAN-CHO	3
Cono aluvial norte Lloquepunco	CAN-LL	3
Cono aluvial norte Unura	CAN-U	3
Cono aluvial norte Yarjapata	CAN-YA	3
Ladera baja norte	LBN	4

Ladera baja sur	LBS	4
Montaña norte Morrohuicsa-	MN-MP	4
Montaña Huchuy Qosqo	MS-HQ	4
Montaña sur Minasniyoc	MS-M	4
Montañas sur de Cusco	MS-MC	4
Montaña sur Unoraqui	MS-U	4
Montaña norte Halamcoma	MN-H	4
Ladera alta norte	LAN	4
Montaña sur Pachatusán	MS-PA	4
Cono aluvial norte andenes	CAN-A	4
Cono aluvial norte Chuquibambilla	CAN-CHU	4
Cono aluvial norte Huascaray	CAN-HUAS	4
Cono aluvial sur Saclo	CAS-SA	4
Cono aluvial sur Huayllabamba	CAS-WA	4
Cono aluvial norte Parcaypata	CAN-PA	4
Cono aluvial norte Arín	CAN-AR	5
Cono aluvial norte Calca	CAN-CAL	5
Cono aluvial norte Chaupihuayco	CAN-CH	5
Cono aluvial norte Chicón	CAN-CHI	5
Cono aluvial norte Coya	CAN-CO	5
Cono aluvial norte Huarán	CAN-HU	5
Cono aluvial norte Huayocan	CAN-HUA	5
Cono aluvial norte Lamay	CAN-LA	5
Cono aluvial norte Ollantaytambo	CAN-O	5
Cono aluvial norte Písaq	CAN-PI	5
Cono aluvial norte Pumahuanca	CAN-PU	5
Cono aluvial norte Yanahuara	CAN-YAN	5
Cono aluvial norte Yucay	CAN-YU	5
Cono aluvial sur Pachar	CAS-PA	5
Cono aluvial sur Taray	CAS-TA	5
Cono aluvial sur Urquillos	CAS-U	5

El **factor pendiente** es el más importante en la determinación de la susceptibilidad a los movimientos en masa. El porcentaje de los rangos de pendiente indica que las laderas con mayor pendiente tienen mayor susceptibilidad a los movimientos en masa, mientras que las áreas con menor pendiente tienen poca susceptibilidad. En la Tabla 6 se muestran las ponderaciones del factor pendiente. Las inclinaciones de 0 a 4% se calificaron con valores de 1 (susceptibilidad muy baja), las inclinaciones de 4-15 % con valores de 2 (susceptibilidad baja), las inclinaciones de 15 a 25% con valores de 3 (susceptibilidad media), las inclinaciones de 25-50% con

valores de 4 (susceptibilidad alta), finalmente las pendientes mayores a 50% con valor 5 (Susceptibilidad muy alta) (Vilchez et al., 2007).

Tabla 6

Ponderación del factor pendiente, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Rango de pendiente (%)	Clase	Descripción	Ponderación
0-4	Plana a ligeramente inclinada	Áreas muy poco probable que se formen movimientos en masa	1
4-15	Moderada a ligeramente inclinada	Áreas poco probables que se formen movimientos en masa	2
15-25	Moderadamente empinada	Áreas con laderas susceptibles a presentar movimientos en masa	3
25-50	Empinada	Áreas muy susceptibles a la formación de movimientos en masa	4
>50	Muy empinada	Áreas altamente susceptibles a la generación de	5

Fuente: Vilchez et al., 2007

El **factor cobertura vegetal** se ha ponderado tomando en cuenta la cantidad y tipo de vegetación en las unidades geomorfológicas y que están relacionadas con los movimientos en masa. En la Tabla 7 se muestra la ponderación de las 20 unidades del factor cobertura vegetal, que fue elaborada por el biólogo Alfredo Tupayachi Herrera. La ponderación más baja de 1, corresponde a áreas planas como bofedal, ríos y lagunas, la ponderación 2 a áreas cultivadas, matorral y vegetación ribereña, la ponderación 3 a la vegetación saxicola, matorral, pastizal y plantaciones forestales, la ponderación 4 a matorral seco, glaciares y cantera de sal, y la ponderación 5 a matorral, área desnuda y zonas urbanas.

Luego se asignan los rangos de ponderación a los niveles de susceptibilidad, de acuerdo con la experiencia y conocimiento en la ocurrencia de movimientos en masa. La Tabla 8 muestra el rango de ponderaciones utilizada de 1 a 5 para identificar con facilidad el significado de la susceptibilidad, donde 1 significa una susceptibilidad Muy Baja; 2, Baja; 3, Media; 4, Alta, y 5, Muy Alta. Este criterio se adoptó del Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales (CENEPRED, 2014).

Tabla 7

Ponderación del factor cobertura vegetal, para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Cobertura vegetal	Símbolo	Ponderación
Bofedal	bf	1
Ríos		1
Lagunas		1
Áreas cultivadas		2
Matorral de puna húmeda	maph	2
Matorral arbolado de valles interandinos	mavi	2
Vegetación ribereña	vr	2
Bosque húmedo de valles interandinos	bhvi	2
Parque boscoso de qewña	pbq	2
Área rocosa con vegetación Saxícola	arvs	3
Matorral arbustivo de valles interandinos	marvi	3
Pastizal	Pz	3
Plantación forestal exótica	pfe	3
Matorral seco espinoso	mse	4
Glaciares		4
Cantera de sal		4
Estepa espinosa	ee	5
Matorral halofítico	mh	5
Área desnuda o de escasa vegetación	adev	5
Zonas urbanas		5

Fuente: (SIAR, 2014) Modificado.

Seguidamente de acuerdo a la calificación de las ponderaciones, se creó un ráster (Trama) para cada uno de los mapas obtenidos, de tal modo que cada mapa tuvo un valor de 1 a 5. Después de esta aplicación con el software ArcGIS, se utilizó la herramienta Calculadora ráster y se multiplicó cada uno de estos ráster, por ejemplo: $((\text{ráster_pendientes} * 0.4) + (\text{ráster_geomorfológico} * 0.3) + (\text{ráster_Geológico} * 0.2) + (\text{ráster_cobertura vegetal} * 0.1) / 4)$. A continuación, se generó el ráster de susceptibilidad a movimientos en masa. Finalmente se utilizó la herramienta RECLASSIFY para reclasificar el ráster de susceptibilidad en 5 clases, que va de 1 a 5, donde 1 es susceptibilidad Muy baja y 5 susceptibilidad Muy alta, con base al mapa de amenazas por procesos de remoción en masa, a partir del método heurístico con combinación de análisis multicriterio, que determina cinco niveles de amenaza en la zona urbana (Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy alta), siendo la última la que predomina, confirmando su situación de máximo peligro (Paz Tenorio et al., 2017).

Tabla 8

Rango de ponderación de susceptibilidad a movimientos en masa

Rango de ponderación	Susceptibilidad a movimientos en masa
1	Muy baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

Fuente: CENEPRED, 2014

3.3.2.2. Ponderaciones a los factores condicionantes por inundación del río Vilcanota

Para el análisis de la susceptibilidad a inundaciones se utilizó los factores condicionantes de geomorfología y pendiente, luego se utilizó la misma

metodología aplicada en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa. La Tabla 9 muestra los pesos asignados a los factores condicionantes, con un peso menor para la pendiente y un peso mucho mayor para la geomorfología por su contribución a la formación de inundaciones.

Tabla 9

Pesos asignados a los factores condicionantes para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota

Factor Condicionante	Símbolo	Peso	Peso %
Geomorfología	G	0.8	80
Pendiente	P	0.2	20
		1.0	100

Luego de analizar cada uno de los factores condicionantes, se asignaron las ponderaciones a las unidades de los mapas, de acuerdo con la experiencia y conocimiento en la ocurrencia de inundaciones. Se ponderó cada unidad de la geomorfología y pendiente. En la Tabla 10 se muestra el rango de valores utilizados en las ponderaciones de 1 a 5, donde el rango 1 representa una susceptibilidad muy baja y 5 representa susceptibilidad muy alta.

Tabla 10

Rango de ponderación de susceptibilidad a inundación del río Vilcanota

Rango de ponderación	Susceptibilidad a inundación
1	Muy baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

Los factores condicionantes analizados fueron la geomorfología y la pendiente. La geomorfología fue el factor principal en el análisis de la susceptibilidad a inundaciones. Como se mencionó anteriormente, la geomorfología se relaciona con la litología, estructuras de las rocas y el ángulo de inclinación de los afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios. Las unidades geomorfológicas se han ponderado tomando en cuenta las inundaciones registradas en el inventario de peligros geológicos y a la geoforma plana del territorio. En la Tabla 11 se presentan las ponderaciones del factor geomorfología, con el rango 1 para montaña, meseta y lomadas, rango 2 para laderas altas, rango 3 para laderas bajas y conos aluviales, y rango 5 para el piso de valle.

Tabla 11

Ponderación del factor geomorfología, para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota

Unidades y sub unidades morfológicas	Símbolo	Ponderación
Montaña Mosocllacta-Totora	MN-MT	1
Montaña sur Pachatusán	MS-PA	1
Montaña Huchuy Qosqo	MS-HQ	1
Montañas de Cusco	MS-MC	1
Montaña sur Unoraqui	MS-U	1
Montaña norte Halamcoma	MN-H	1
Meseta norte Pampallacta	MEN-P	1
Meseta norte Quello	MEN-QQ	1
Meseta sur Chinchero-Maras	MES-CM	1
Lomadas	L	1
Ladera alta norte	LAN	2
Ladera baja norte	LBN	3
Ladera baja sur	LBS	3
Cono aluvial norte	CAN	3
Cono aluvial norte Sillacasa	CAN-SI	3
Cono aluvial sur	CAS	3
Cono aluvial sur Saclo	CAS-SA	3
Cono aluvial norte andenes	CAN-A	3
Cono aluvial norte Chojo...	CAN-CHO	3
Cono aluvial norte Chuquibambilla	CAN-CHU	3
Cono aluvial norte Huascaray	CAN-HUAR	3
Cono aluvial sur Huayllabamba	CAS-WA	3

Cono aluvial norte Arín	CAN-AR	3
Cono aluvial norte Capco	CAN-CA	3
Cono aluvial norte Calca	CAN-CAL	3
Cono aluvial norte Chaupihuayco	CAN-CH	3
Cono aluvial norte Chicón	CAN-CHI	3
Cono aluvial norte Coya	CAN-CO	3
Cono aluvial norte Huarán	CAN-HU	3
Cono aluvial norte Huayocán	CAN-HUA	3
Cono aluvial norte Lamay	CAN-LA	3
Cono aluvial norte Lloquepunco	CAN-LL	3
Cono aluvial norte Ollantaytambo	CAN-O	3
Cono aluvial norte Parcaypata	CAN-PA	3
Cono aluvial norte Písaq	CAN-PI	3
Cono aluvial norte Pumahuanca	CAN-PU	3
Cono aluvial norte Unura	CAN-U	3
Cono aluvial norte Yarjapata	CAN-YA	3
Cono aluvial norte Yanahuara	CAN-YAN	3
Cono aluvial norte Yucay	CAN-YU	3
Cono aluvial sur Pachar	CAS-PA	3
Cono aluvial sur Taray	CAS-TA	3
Cono aluvial sur Urquillos	CAS-U	3
Piso de valle	PV	5

El porcentaje de los rangos de pendiente indica que las laderas con mayor pendiente tienen una menor susceptibilidad a inundaciones. En la Tabla 12 se muestran las ponderaciones del factor pendiente. Las inclinaciones de 0 a 4% se calificaron con valor de 5 (susceptibilidad Muy alta) debido a que las áreas son altamente susceptibles a la formación de inundaciones, y las inclinaciones mayores a 50% con valor 1 (susceptibilidad Muy baja) son áreas con muy poca probabilidad que se originen inundaciones.

Tabla 12

Ponderación del factor pendiente, para la determinación de la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota

Rango de pendiente (%)	Clase	Descripción	Ponderación
0-4	Plana a ligeramente inclinada	Áreas altamente susceptibles a la	5

4-15	Moderada a ligeramente inclinada	Áreas muy susceptibles a presentar inundaciones	4
15-25	Moderadamente empinada	Áreas susceptibles a presentar inundaciones	3
25-50	Empinada	Áreas poco probables que se originen	2
+50	Muy empinada	Áreas muy poco probable que se originen inundaciones	1

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad a inundaciones se utilizaron los mapas cartografiados en la etapa de campo de geomorfología y pendiente. Luego se ponderaron cada una de las unidades geomorfológicas y de pendiente, que fueron calificadas a juicio de expertos. Seguidamente de acuerdo a la calificación de las ponderaciones, se creó un ráster (Trama) para cada uno de los mapas obtenidos, de tal modo que cada mapa tuvo un valor de 1 a 5. Después de esta aplicación con el software ArcGIS, se utilizó la herramienta calculadora ráster y se multiplicó cada uno de estos raster: $((\text{ráster_pendientes} * 0.2) + (\text{raster_geomorfológico} * 0.8)) / 2$. A continuación, se generó el raster de susceptibilidad a movimientos en masa, finalmente se utilizó la herramienta RECLASSIFY para reclasificar el raster de susceptibilidad en 5 rangos, que va de 1 a 5, donde 1 es susceptibilidad muy baja y 5 susceptibilidad muy alta.

Al igual que en la zona de estudio, en la subcuenca del río San Francisco en Colombia se realizó el análisis de susceptibilidad a partir de una evaluación de factores de un análisis multivariante discriminante para la asignación de coeficientes o pesos con el método de superposición ponderada, dentro de una función discriminante ajustada por una variable de agrupación definida como sitios estables e inestables. A partir de los análisis efectuados, se elaboró el mapa de susceptibilidad para la zona de interés, en donde se han identificado los sectores con baja, media y alta susceptibilidad para este tipo de eventos (Quiroz, 2019).

3.3.3. Determinación de los niveles de peligro de geodinámica externa que afectan en la seguridad física de las poblaciones

Los niveles de peligro de geodinámica externa que afectan en la seguridad física de las poblaciones entre Ollantaytambo y Písaq se determinó mediante el estudio geológico geodinámico, en sus etapas de pre-campo, campo y post-campo.

En resumen, primero se cartografiaron los peligros por inundación, aluvión y deslizamiento, en las campañas de pre-campo, y luego en la etapa de campo se han definido los contactos, tomando en cuenta los estudios anteriores, las evidencias geológicas, antecedentes históricos y cálculos hidrológicos de las principales cuencas hidrográficas. El cartografiado de peligros incluye los niveles de peligro.

En la toma de datos de campo, en el cuaderno de campo se registró la fecha, año, los integrantes de trabajo, luego se registró el punto de descripción mediante el Global Positioning System (GPS), y se codificó el tipo de fenómeno geodinámico. En la zona del fenómeno geodinámico se realizó una descripción del tipo de material o rocas involucrada, la dimensión, tipo y causa (natural o antrópica) del movimiento en masa (deslizamiento, aluvión) e inundación.

Para los niveles de peligro de deslizamiento, aluvión e inundación, se dividieron en áreas de peligro muy alto, alto, medio y bajo, según los siguientes criterios: Para los deslizamientos, su nivel de peligro estuvo en función de su actividad activo o antiguo; con peligro muy alto es cuando el deslizamiento es activo, con peligro alto es cuando el deslizamiento puede activarse por la presencia de fracturas y planos de deslizamiento; y de peligro medio a bajo, son los deslizamientos antiguos que se encuentran estabilizados. En los aluviones e inundaciones, el nivel de peligro se dio en función de la peligrosidad: Peligro muy alto, cuando las zonas afectadas o que pueden ser afectadas por las precipitaciones pluviales anuales o con un periodo de recurrencia de 10 años; peligro alto, cuando las zonas pueden ser afectadas en periodos de lluvias extraordinarias que se producen entre 10 y 100 años; y peligro medio a bajo, cuando las zonas están relativamente alejadas y un poco más altas del cauce inundable, pero pueden ser afectados debido a lluvias extraordinarias con periodos de recurrencia mayores a los 100 años (Carlotto et al., 2005b; Carlotto et al., 2005c).

Para la elaboración de los mapas de peligros por inundación, aluvión y deslizamiento, se tomó la información del estudio de los Mapas de Peligros de Ciudades Sostenibles de Ollantaytambo, Urubamba, Calca y Písaq (Carlotto et al., 2005a; Carlotto et al., 2005b; Carlotto et al., 2005c); sin embargo, los datos fueron actualizados con la información de los diferentes estudios, posterior a las intensas lluvias ocurridas el año 2010.

Finalmente, con el software ArcGIS se elaboraron los mapas de peligros de geodinámica externa de deslizamiento, aluvión e inundación; estos mapas tienen la finalidad de hallar los niveles de peligros geodinámicos, las cuales sirven de manera directa para la planificación, a diferencia de la susceptibilidad que todavía necesita la interpretación de los expertos. En la zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta Argentina, el análisis de susceptibilidad, el mapa inventario y la topografía digital generados constituyen una línea de base, hasta el momento inexistente en el área de estudio y servirán para futuros estudios de peligrosidad y riesgo por procesos de remoción en masa. Asimismo, serán útiles como una herramienta de planeamiento y para la implementación de estrategias de mitigación y reducción del riesgo (Cardozo, 2013).

3.4. Análisis de datos y categorías

Los datos fueron analizados a través de la creación de un ráster (trama) para cada uno de los mapas obtenidos. Luego se utilizó el software ArcGIS, luego se generó el ráster de susceptibilidad a movimientos en masa, finalmente se utilizó la herramienta RECLASSIFY para reclasificar el ráster de susceptibilidad. peligro muy alto, alto, medio y bajo. Los mapas tienen la finalidad de hallar los niveles de peligros geodinámicos, los cuales sirven de manera directa para la planificación, a diferencia de la susceptibilidad que todavía necesita la interpretación de los expertos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Geología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal

4.1.1. Geología

En el mapa geológico (Figura 3) se observan las delimitaciones de las unidades litoestratigráficas y que han sido verificadas en el campo por el autor. Resaltan las montañas con mayor altura de la margen derecha del río Vilcanota, debido a los afloramientos de rocas volcánicas del Grupo Mitu y rocas metamórficas con afloramientos debido a fallas, son menos susceptibles a movimientos en masa por ser más duras las rocas. Mientras en la margen izquierda afloran rocas evaporíticas y rocas metamórficas con mucho menor altura, debido a la composición de las rocas que son menos duras y más susceptibles a la activación de movimientos en masa.

En la Tabla 13, se muestran las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio, que se agrupan como Grupo (Gr.), Formación (Fm.) y depósitos Cuaternarios (Q) que abarcan una superficie total de 1386.60 km². Las rocas más duras son las pertenecientes a las unidades Rumicolca, San Jerónimo, Ayabacas, Huancané, Mitu, Copacabana, Sandia y rocas ígneas. Luego las rocas también duras pero fracturadas son las pertenecientes a las unidades San Gabán, Verónica, Ollantaytambo, Huambutio, Ccatca, San José. Las rocas poco compactas y fracturadas son las pertenecientes a las unidades Puquín, Ananea, Quilque-Chilca, Chincheros, San Sebastián y Paucarbamba. Las rocas incompetentes son las pertenecientes a las unidades Maras y los materiales cuaternarios.

Tabla 13

Unidades litoestratigráficas y rocas ígneas intrusivas de la zona de estudio

Unidades litoestratigráficas y rocas ígneas	Símbolo	Área km²	Área %
Depósito coluvial	Q-co	30.36	2.19
Depósito aluvial	Q-al	56.54	4.08
Depósito fluvial	Q-f	32.39	2.34
Depósito lacustre	Q-la	15.11	1.09
Depósito glaciar	Q-gl	33.53	2.42
Fm. San Sebastián	Q-sa	50.06	3.61
Fm. Rumicolca	NpQ-ru	8.40	0.61
Fm. Chincheros	Np-cc	10.46	0.75
Grupo San Jerónimo	Peo-sj	110.64	7.98
Fm. Quilque Chilca	Pp-qc	19.03	1.37
Fm. Puquín	Ks-pu	29.62	2.14
Fm. Ayabacas	Kis-ay	1.33	0.10
Fm. Maras	Ki-ma	194.15	14.00
Fm. Paucarbamba	Ki-pb	10.67	0.77
Fm. Huancané	Ki-hn	22.49	1.62
Fm. Huambutio	JsKi-hm	1.36	0.10
Grupo Mítu	TsJi-mi	419.54	30.26
Grupo Copacabana	Pi-c	5.25	0.38
Fm. Ananea	SD-a	101.98	7.35
Fm. Ccatca	Ds-ca	5.90	0.43
Fm. San Gabán	Os-sg	40.37	2.91
Fm. Sandia	Os-s	15.03	1.08
Fm. Verónica	O-v	1.66	0.12
Grupo San José	Om-sj	81.80	5.90
Fm. Ollantaytambo	O-o	30.01	2.16
Rocas ígneas	P-gr	58.91	4.25
Total		1386.60	100.00

Las rocas y suelos que afloran en la zona de estudio abarcan desde la era Paleozoica inferior hasta el Cuaternario (Carlotto et al., 1996). En la geología se

describe las unidades litoestratigráficas y su relación con los fenómenos geodinámicos, estudios que contribuyen principalmente en la planificación del uso del territorio. La geología en el área de estudio está caracterizada por presentar afloramientos de rocas sedimentarias, rocas volcánicas, rocas metamórficas y rocas ígneas, sobre estos afloramientos de rocas se han desarrollado materiales cuaternarios recientes (Vílchez et al., 2007) (Tabla 13 y Figura 3).

4.1.1.1. Unidades litoestratigráficas

1) Formación Ollantaytambo (O-o)

Aflora en el extremo oeste de la zona de estudio, en la localidad de Ollantaytambo, y en ambos márgenes de la quebrada Patacancha, hasta la quebrada Yuracmayo, con una superficie de 30.01 km². Litológicamente, está constituida por brechas y conglomerados, areniscas cuarcíticas, andesitas, pizarras y esquistos verdes intercaladas con bancos de cuarcitas y niveles volcánicos; se le asume una edad Ordovícico basal (Carlotto et al., 1996). Las pizarras y esquistos por su esquistosidad y fracturas pierden su resistencia alta y son inestables, formándose derrumbes o deslizamientos en pendientes muy empinadas (SIAR, 2014).

2) Formación Verónica (O-v)

Formación ubicada en el extremo oeste de la zona de estudio, entre la quebrada Yuracmayo y el cerro Quellorjo, con una superficie de 1.66 km². Litológicamente está compuesta por conglomerados, intercaladas con lutitas negras y cuarcitas blancas; se le asume una edad Ordovícico inferior (Carlotto et al., 1996). Las rocas son bastante duras y estables, a excepción de las lutitas que son inestables con formación de pequeños deslizamientos (SIAR, 2014).

3) Formación San José (Om-sj)

Afloran en el extremo noroeste de la zona de estudio, en ambos márgenes de la quebrada Patacancha desde la quebrada Yuracmayo, y entre los cerros Botija y Huancarani, abarcando una superficie de 81.80 km². Está compuesta por pizarras negras, filitas muy duras y esquistosas, cuarcitas o areniscas sericíticas finas, pizarras micáceas, esquistos, y lutitas negras; se le asume una edad Ordovícico

medio (Carlotto et al., 1996). Las pizarras y filitas son propensas a la formación de deslizamientos, las cuarcitas y areniscas son duras y más estables.

4) Formación Sandia (Os-s)

Aflora en el extremo noroeste del área de estudio en el cerro Patacancha, con una superficie de 15.03 km². Está conformado por bancos de cuarcitas intercaladas con niveles de pizarras negras o esquistos; se le asume una edad Ordovícico superior (Carlotto et al., 1996). La alteración, fracturas y esquistosidad de los afloramientos de pizarras, la hacen inestables con la formación de deslizamientos; mientras que las cuarcitas duras y poco fracturadas son estables.

5) Formación San Gabán (Os-sg)

Esta formación aflora en el extremo noreste de la parte septentrional de la zona de estudio, al noreste y este de la localidad de Calca, con una superficie de 40.37 km². Litológicamente está constituida por bancos de areniscas cuarzosas intercaladas con pizarras, niveles diamictíticos o microbrechas glaciares, microconglomerados cuarzosos; se le asume una edad Ordovícico superior (Carlotto et al., 1996). En general estas rocas son de mala calidad debido a que son poco compactos, además están muy fracturadas y alteradas, con presencia de agua se producen deslizamientos (SIAR, 2014).

6) Formación Ananea (SD-a)

Abarcan grandes afloramientos separados, ubicados en las partes altas de la margen derecha del río Vilcanota, en la parte oriental de la zona de estudio, al norte y este de la localidad de Písaq, con una superficie de 101.98 km². Esta formación se compone de pizarras, esquistos pizarrosos grises a negros y bancos de cuarcitas, sin estratificación visible; se le asume una edad Silúrico-Devónico (Carlotto et al., 1996). Estas rocas al alterarse desarrollan depósitos eluvio-columbiales, que son terrenos inestables por corte de talud y saturación de suelos, con formación de deslizamientos y caída de rocas (SIAR, 2014).

7) Formación Catca (Ds-ca)

Aflora en el extremo este de la zona de estudio, extremo noreste de la localidad de Písaq, con una superficie de 5.90 km². Litológicamente está compuesta de una secuencia de cuarcitas, pizarras y diamictitas. Se le asigna una edad Devónico superior-Carbonífero inferior (Carlotto et al., 2003). Las pizarras y diamictitas son poco consistentes y con pendientes empinadas desarrollan deslizamientos.

8) Grupo Copacabana (Pi-c)

Aflora al oeste de la localidad de Písaq en ambas márgenes del río Vilcanota, y al sur de la localidad de Pachar, en la margen izquierda del río Vilcanota, con una superficie de 5.25 km². Está compuesto principalmente por calizas y lutitas negras; se le asigna una edad Pérmico inferior (Carlotto et al., 1996). Estas rocas son bastante duras y estables, a excepción de las lutitas negras que son inestables (SIAR, 2014).

9) Grupo Mitu (TsJi-mi)

Se presentan en grandes extensiones en la zona de estudio, a lo largo de toda la margen derecha del río Vilcanota; y en la parte baja de la margen izquierda del río Vilcanota entre las localidades de Písaq y Huarán, y en Pachar, con una superficie de 419.54 km². Este grupo se divide en dos formaciones: Písaq y Pachatusán. La Formación Písaq está constituida mayormente por areniscas y conglomerados intercalados con niveles de rocas volcánicas. La Formación Pachatusán está conformada por rocas volcánicas intercalado con niveles de conglomerados, areniscas y limolitas rojas; se le asigna una edad Triásico superior-Jurásico inferior (Carlotto et al., 1996). Estas rocas son bastante duras y estables.

Las rocas del Grupo Mitu se formaron debido a la formación de grandes depresiones falladas en la parte superior de la litosfera, caracterizadas por la constante actividad sísmica y magmática, denominada como rift. Una invasión marina de los grábenes que alojan al Grupo Mitu inicia en el Noriano (Rosas et al., 2007), que define el final de la sedimentación dentro del Grupo Mitu.

El ambiente geodinámico de la Cordillera Oriental evolucionó en el Permotriásico a un rift continental (Dalmayrac et al., 1980; Vivier *et al.*, 1976). Esta hipótesis se basa en la

presencia de basalto alcalino y andesitas con una signatura de intraplaca que se encuentra intercaladas con rocas rojas clásticas y conglomerados pertenecientes al Grupo Mitu (Cenki *et al.*, 1999; Kontak *et al.*, 1990; Panca & Breitreuz, 2010a).

Los depósitos syn-rift en el centro y sur de Perú son representados por el Grupo Mitu, el cual consiste de una sucesión de conglomerados, areniscas y pelitas localmente con carbonatos y evaporitas que se acumularon en grábenes subsidentes, puntualmente gruesos de más de 2000 m (Carlotto *et al.*, 1998; Dalmayrac *et al.*, 1977; Mégard, 1978). Estas rocas sedimentarias están comúnmente intercaladas con flujos de lava basáltica, ignimbritas y volcanoclastitas, y raramente delgados niveles de calizas atribuido a posibles intrusiones marinas (Panca & Breitreuz, 2010a). El Grupo Mitu ha sido ampliamente descrito (Carlotto, 1998; Cenki *et al.*, 1999; Panca & Breitreuz, 2010; Reitsma, 2012; Sempere *et al.*, 2002). Por las razones antes expuestas los afloramientos de rocas pertenecientes al Grupo Mitu, tienen grandes extensiones que abarcan desde el centro hasta el sur del Perú.

10) Formación Huambutío (JsKi-hm)

Se presenta como pequeños afloramientos, ubicado uno al noroeste y al oeste de la localidad de Pachar, con una superficie de 1.36 km². Litológicamente está constituida por conglomerados rojos violáceos, lutitas rojas, niveles de caliza y areniscas; se le asigna una edad Jurásica superior a Cretácica inferior (Carlotto *et al.*, 1996). Son rocas poco compactas y son inestables cuando son deleznable.

11) Formación Huancané (Ki-hn)

Esta formación se presenta en la margen derecha del río Vilcanota, como afloramientos alargados en contacto estratigráfico o fallado con rocas del Grupo Mitu, entre Písaq y Urubamba. Otros afloramientos se presentan al norte de la localidad de Urubamba y en la localidad de Pachar. La superficie de afloramientos es de 22.49 km². Litológicamente está conformada por areniscas conglomerádicas y areniscas cuarzosas blancas; se le asigna una edad Cretácica inferior (Carlotto *et al.*, 1996). Son rocas muy compactas y bastante duras, son estable en cortes de talud (SIAR, 2014).

El Grupo Mitu está cubierto por rocas sedimentarias del Jurásico Superior hasta el Cretácico hacia el sur del Perú a través de un hiato erosivo. Los depósitos Post-rift incluyen a la Formación Huancané (Carlotto *et al.*, 1995) y la Formación Huambutio. Una muestra de roca del Grupo Mitu datada al tope en la sección Mamuera arroja una edad estratigráfica de 223.4 ± 7.5 Ma, indicando que un ambiente continental y volcánico perteneciente al Grupo Mitu fue coetáneo al inicio Noriano del Grupo Pucará en el norte y centro del Perú. Otras dos areniscas eólicas de la Formación Huancané en el Valle Sagrado fueron datadas y arrojaron edades de ($165,3 \pm 3,3$ Ma- $176,7 \pm 4,5$ Ma). Estas dataciones no restringen el final de la sedimentación del Grupo Mitu debido al gran hiato existente entre las dos formaciones (Reitsma, 2012).

12) Grupo Yuncaypata

Este grupo se divide en 4 formaciones: Formaciones Paucarbamba, Maras, Ayavacas y Puquín se le asume una edad Cretácico inferior-superior para todo el grupo (Carlotto *et al.*, 1996). Los afloramientos de estas formaciones se presentan en las laderas en ambos márgenes del río Vilcanota, junto a los afloramientos de la Formación Huancané, abarcando una superficie total de 235.77 km^2 . La Formación Paucarbamba (Ki-pb) está constituida por lutitas y areniscas rojas. La Formación Maras (Ki-ma) está constituida por una mezcla de yesos, lutitas y lentes de calizas que se presentan de manera caótica (SIAR, 2014). La Formación Ayavacas (Kis-ay) se compone de calizas grises. La Formación Puquín (Ks-pu) se compone principalmente de lutitas negras y rojas, intercaladas con capas de yesos y capas de areniscas. Las rocas son duras como las areniscas y calizas, las lutitas y yesos son poco compactos y se producen deslizamientos, derrumbes y hundimientos particularmente al sur de la ciudad de Urubamba (SIAR, 2014).

El Grupo Copacabana del Pérmico inferior, en la región entre Abancay y Cusco, ocupa el núcleo de una gran estructura anticlinal de dirección E-W, que se interrumpe a la altura de Abancay por medio de una falla N-S. El Grupo Copacabana reaparece más hacia el NE, primero en la región de Ollantaytambo (quebrada Ocororoyoc) y después en la región de Písaq-San Salvador en el Valle Sagrado de los Incas (Marocco, 1978). Esta estructura anticlinal, pliega secuencias de rocas de los grupos Copacabana, Mitu y Formación Huambutío con edades que van del Pérmico Inferior al Jurásico superior.

También este anticlinal fallado, involucra a las rocas de la Formación Huancané y Grupo Yuncaypata con edades que van del Cretácico inferior al Cretácico superior. Esta gran estructura plegada, localmente en Písaq se le conoce como el anticlinal del Vilcanota.

13) Formaciones Quilque y Chilca (Pp-qc)

Estas formaciones afloran al norte y noreste del poblado de Urubamba, luego al norte de las lagunas Piuray y Qoricocha, con una superficie de 19.03 km². Están compuestas de lutitas, areniscas, microconglomerados y conglomerados; se le asume una edad Paleoceno inferior-Paleoceno superior (Carlotto et al., 1996). Estas rocas son inestables en presencia de agua, y las areniscas son más estables.

14) Grupo San Jerónimo (Peo-sj)

Este grupo aflora en ambas márgenes del río Vilcanota en la zona de Urquillos, siguiendo una dirección aproximada NO-SE, entre la localidad de Urubamba y la zona de Huchuy Qosqo. También afloran al sureste de la laguna Piuray, y al suroeste de la localidad de Pachar, con una superficie total de 110.64 km². Están constituidas por areniscas intercaladas con lutitas rojas, y por microconglomerados; se le asigna una edad Eoceno medio-Oligoceno inferior (Carlotto et al., 1996). Son rocas muy duras, e inestables cuando están fracturadas, con formación de derrumbes.

15) Formación Chincheros (Np-cc)

Aflora en los alrededores de las lagunas Huaypo y Piuray, con una superficie de 10.46 km². Esta formación está constituida por un conjunto sedimentario caótico formado por bloques de calizas, brechas y limolitas no compactos, provenientes de la erosión del Grupo Yuncaypata; se le asume una edad Pliocena (Carlotto et al., 1996). Por la variedad de materiales y poca compactación, son inestables en presencia de aguas subterráneas, con formación de deslizamientos.

16) Formación Rumicolca (NpQ-ru)

Se presentan como pequeños cuerpos y corresponden a 8 afloramientos en la zona de estudio (Moray, Maras, Ccollanas, cerro Unoraquí, cerro Pucaqasa, laguna Qoricocha, cerro Qorqomoco, Písaq), con una superficie total de 8.40 km². Se trata de coladas

volcánicas de shoshonitas (andesitas); se le asume una edad Plio-cuaternaria (Carlotto et al., 1996). Estas rocas son duras y estables en cortes de talud.

17) Formación San Sebastián (Q-sa)

Se presenta en afloramientos aislados en la Meseta Chinchero-Maras, entre la localidad de Moray y la laguna Piuray, con una superficie de 50.06 km². Esta formación se compone de arenas, gravas, arcillas intercaladas con diatomita y niveles de turba de origen lacustre y palustres no compactos; se le asume una edad Pleistoceno inferior (Carlotto et al., 1996). Los sedimentos de esta formación son incompetentes y en presencia de agua se producen deslizamientos.

18) Depósitos recientes o cuaternarios

Los depósitos Cuaternarios, se presentan en afloramientos aislados, cubriendo las diferentes unidades litoestratigráficas de la zona de estudio, con una superficie total de 167.93 km². Dentro de estos materiales, se tienen los depósitos lacustre, glaciar, fluvial, aluvial y coluvial. Estos poseen granulometría variable y dispuestos en capas e intercaladas, no son compactos, y se comportan como inestables en presencia de agua con la formación de movimientos en masa e inundaciones.

Los depósitos glaciáricos (Q-gl) se ubican al pie de los nevados y mayormente ubicadas en la margen derecha del río Vilcanota, cubriendo un área de 33.53 km² (SIAR, 2014). Constituyen acumulaciones no compactas de bloques y gravas en una matriz limo arcilloso. Los depósitos lacustres (Q-la) se presentan en los alrededores de las lagunas Piuray, Qoricocha y Huaypo, cubriendo una extensión de 15.11 km²; está compuesto esencialmente por arcilla, limos, arenas, y gravas poco compactas. Los depósitos fluviales (Q-f) se presentan en las márgenes del río Vilcanota como terrazas fluviales abarcando una superficie de 32.39 km², están conformados por materiales no compactos de gravas, arenas y limos arcillosos. Los depósitos aluviales (Q-al) corresponden a los abanicos aluviales, las que se hallan en la desembocadura de las quebradas principales, adyacentes al valle del río Vilcanota (SIAR, 2014). Abarcan una superficie de 56.54 km², están constituidos por sedimentos no compactos de bloques y gravas envueltas por una matriz limo-arcillo-arenosa, estos abanicos muestran la actividad geodinámica en el pasado y presente, por lo que deben ser considerados como peligros para las poblaciones

que están asentadas en estos lugares (Carlotto et al., 2010). Los depósitos coluviales (Q-co) Se forman en las laderas de los cerros por erosión de los afloramientos de las rocas y suelos por gravedad, se incluyen a los deslizamientos y abarcan una superficie de 30.36 km², están conformados por una mezcla no compactos de limos, arenas y gravas (SIAR, 2014). Todos los sedimentos antes descritos poseen granulometría variable y dispuestos en capas no compactos, y se comportan como inestables en presencia de agua con la formación de movimientos en masa e inundaciones.

4.1.1.2. Rocas ígneas (P-gr)

Las rocas ígneas intrusivas se ubican a 5 km al norte de la ciudad de Urubamba, están representados por el Macizo de Urubamba, delimitado entre los nevados Chicón y Capacsaya (SIAR, 2014), con una superficie de 58.91 km². Este cuerpo está compuesto por granitos y microgranitos; se le atribuye una edad Pérmica (Carlotto et al., 1996). Estas rocas se hallan muy fracturadas y alteradas, por lo que tienen un comportamiento semi estable si están alterados, con formación de derrumbes.

Resumiendo las unidades litoestratigráficas y rocas ígneas de la Cordillera Oriental de Perú, muestra un importante registro estratigráfico que comprende rocas desde el Silúrico-Devónico hasta el Jurásico, las cuales forman depósitos de sucesiones potentes pre-rift (Grupo Tarma-Copacabana, Grupo Cabanillas), depósitos syn-rift (Grupo Mitu), y depósitos post-rift (Grupo Pucará y Formación Huancané) que fueron depositados en diferentes ambientes incluyendo marino, continental y fluvio-eólicos.

Los estudios previos evidenciaron que la Cordillera del Perú ofrece un campo para la investigación geológica tan vasto que, a pesar del trabajo de muchos investigadores, todavía posee el atractivo de un país casi virgen (Mc Laughlin, 1924). La Cordillera de los Andes, se ha formado en el límite entre la Placa Oceánica Pacífica y la Placa Sudamericana, que se extiende en una franja angosta a lo largo de toda América del Sur para luego continuar en la América del Norte tomando el nombre de Montañas Rocosas (Steinmann et al., 1929), donde las rocas sedimentarias del Paleozoico superior están ampliamente distribuidas y probablemente más representadas en los Andes peruanos que en otras partes de América del Sur (Newell et al., 1953).

El Departamento de Junín evidencia en un área de 6474.97 km², depósitos de sedimentos y lavas de hasta 7,924.8 m de espesor, sobre afloramientos plegados del Devónico o más antiguos, en una depresión que se rellenó por etapas, donde en muchos horizontes se intercalan rocas volcánicas y rocas intrusivas, con espilitas intercaladas con flujos riolíticos y brechas que marcan el Carbonífero; los umbrales de gabro intruyen muchos horizontes del Mesozoico. Durante las primeras etapas del Mesozoico se introdujeron pequeños cuerpos de granito y pórfido de cuarzo; los sedimentos del Cretácico y posteriores en la Cordillera Occidental fueron alterados por cuerpos intrusivos, pero los granitos de la Cordillera Oriental probablemente sean más antiguos que los del Cretácico. Un fuerte plegamiento precedió a la deposición del Carbonífero y un segundo movimiento importante tuvo lugar después de que se depositara la Serie Red Bed. El plegamiento afectó afloramientos de rocas de edades Carbonífera, Triásica, Lias y Cenomaniana. El Triásico y el Lias Inferior están superpuestos por el Lias Medio. Probablemente existe una brecha entre este y el Cretácico Inferior, y el rápido engrosamiento de la Serie Red Bed sugiere la existencia de una brecha también entre ésta y el Cenomaniano, con alguna perturbación, aunque de menor magnitud que el plegamiento principal que afecta al Cretácico Inferior (Harrison, 1940).

Cerca de Cerro de Pasco, fallas cabalgadas y plegamientos cerrados afectan facies de calizas del Mesozoico inferior de 2,896 metros de espesor. Los estratos son del Triásico Superior y pueden extenderse hasta el Liásico inferior (Jurásico inferior). Los estratos terciarios, se acumularon en cuencas intermontañas de bajo nivel sobre formaciones mesozoicas y paleozoicas plegadas y falladas. A la fuerte deformación al final del Cretácico le siguieron, tras la acumulación de depósitos continentales del Terciario, fallas de cabalgamiento y plegamientos isoclinales a principios del Terciario. Se presentan deformaciones menores hacia el final del Pérmico y Jurásico. La actividad ígnea intrusiva y extrusiva aparentemente siguió de cerca a la deformación del Terciario temprano (Jenks, 1951).

La evolución Paleozóica y Meso-Cenozoica de la región de Cusco (Perú) sería en parte controlada por un límite paleográfico con dos tipos diferentes de sustrato, situado a nivel de la Deflexión de Abancay y del Umbral Cusco-Puno. El Permo-Triásico debe ser

considerado como un periodo transitorio entre el ciclo Herciniano y el ciclo Andino (Carlotto, 1998a)

En la evolución paleogeográfica de las cuencas del Paleozoico superior, se reconocen tres tipos principales de cuencas ubicadas en el sur de Sudamérica: infracráticas o intraplaca, relacionadas con el arco y retroarco. Las cuencas intraplaca (Paraná, Chaco-Paraná, Sauce Grande-Colorado y La Golondrina) están cubiertas por corteza continental o cuasi continental, con tasas de subsidencia bajas o moderadas y actividad magmática y tectónica limitada. Las cuencas relacionadas con el arco (norte y centro de Chile, Navidad-Arizaro, Río Blanco y Cal-ingasta-Uspallata y depocentros a lo largo de la Patagonia chilena) muestran una historia tectónica muy compleja, actividad magmática generalizada, altas tasas de subsidencia y casos de metamorfismo de sedimentos del Paleozoico tardío. Una situación intermedia corresponde a las cuencas del retroarco (este de Madre de Dios, Tarija, Paganzo y Tepuel-Génova), que carecen de magmatismo y metamorfismo extensos, pero con tectonismo y tasas de sedimentación coetáneos, probablemente fueron más importantes que los de la región intraplaca. Según la distribución estratigráfica de los sedimentos del Paleozoico tardío, las discontinuidades a escala regional y los cambios en los patrones de sedimentación, se proponen cinco etapas paleogeográficas principales. La más baja está restringida a las cuencas proto-Pacífico y retroarco, corresponde al Misisipiano (etapa 1) y se caracteriza por sedimentos siliciclásticos marinos poco profundos y de transición. Durante la etapa 2 (Pensilvaniano temprana), las secuencias glaciales-postglaciales dominaron las cuencas infracráticas (o intraplaca) y retroarco, y los sedimentos marinos terrígenos poco profundos prevalecieron en las cuencas relacionadas con el arco. La etapa 3 (Pensilvaniano Tardío-Cisuraliano Temprano) muestra la máxima extensión de sedimentos glaciales-postglaciales en las cuencas de Paraná y Sauce Grande-Colorado (región intraplaca), mientras que en las cuencas del retroarco prevalecieron depósitos fluviales que se intercalan con finos intervalos de sedimentos marinos poco profundos. Al oeste, las cuencas relacionadas con el arco estaban dominadas por condiciones costeras y marinas profundas (incluidas sucesiones turbidíticas). En el Cisuraliano Tardío (etapa 4), se registran diferencias importantes en los patrones de sedimentación para las cuencas relacionadas con el arco occidental y las cuencas intraplaca orientales. Las primeras estaban localmente dominadas por sedimentos volcánicos o depósitos

marinos, y las cuencas intraplaca se caracterizan por condiciones marinas poco profundas marcadas por varios episodios de progradación deltaica. Finalmente, en el Pérmico Tardío (etapa 5), el vulcanismo y la sedimentación volcánica dominaron en las cuencas ubicadas a lo largo del margen occidental de América del Sur. Las cuencas intraplaca, a su vez, se caracterizaron por ciclos transgresivo-regresivo compuestos por depósitos siliciclásticos marinos, deltaicos y fluviales poco profundos (Limarino & Spalletti, 2006).

4.1.2. Pendiente

En la Tabla 14 se observan los 5 rangos de pendiente en porcentaje y grados, así como la clase de pendiente que va desde el menor rango de 0-4 % con clase plana a ligeramente inclinada, hasta el mayor rango con pendiente +50% con clase muy empinada.

Tabla 14

Parámetro de pendientes

Clase de pendiente	Rango de pendiente (%)	Tipo	Clase
A	0-4	<5°	Plana a ligeramente inclinada
B	4-15	5° - 15	Moderada a ligeramente inclinada
C	15-25	15° - 35°	Moderadamente empinada
D	25-50	35° - 45	Empinada
E	+50	>45°	Muy empinada

Fuente: SIAR, 2014 [Haga clic o pulse aquí para escribir texto.](#)

4.1.3. Geomorfología

El área de estudio se encuentra en un valle intercordillerano de dirección NO-SE (SIAR, 2014) conformado por unidades y subunidades geomorfológicas (Tabla 15 y Figura 4). En la Figura 4 se presenta el mapa geomorfológico elaborado en base a la morfología de la superficie terrestre y altitudes, mostrando las unidades geomorfológicas: Piso de valle, laderas bajas, laderas altas, montañas, mesetas, lomadas y conos aluviales, diferenciándose cada sub unidad geomorfológica por un código característico según la zona donde se presenten. En la Tabla 15 se muestran las seis unidades y 46 subunidades geomorfológicas, que se ubican al norte y sur del río Vilcanota; la unidad

geomorfológica con mayor extensión son las montañas con 627.96 km² que corresponde al 45.29 % del área de estudio, y con menor extensión es el piso de valle con 32.75 km² y ocupan solo el 2.36 % del área de estudio.

Tabla 15

Unidades geomorfológicas

Unidades geomorfológicas	Símbolo	Área	
		km ²	%
Piso de valle	PV	32.75	2.36
Ladera baja norte	LBN	146.83	10.59
Ladera alta norte	LAN	146.89	10.59
Ladera baja sur	LBS	122.73	8.85
Montaña norte Morrohuicsa-	MN-MP	351.58	25.36
Montaña norte Halamcoma	MN-H	117.05	8.44
Montaña sur Pachatusán	MS-PA	16.25	1.17
Montaña sur Huchuy Qosqo	MS-HQ	43.95	3.17
Montaña sur Minasnioc	MS-M	16.64	1.20
Montaña sur de Cusco	MS-MC	31.08	2.24
Montaña sur Unoraqui	MS-U	51.40	3.71
Meseta norte Pampallacta	MEN-P	20.02	1.44
Meseta norte Quello	MEN-QQ	42.33	3.05
Meseta sur Chinchero-Maras	MES-CM	159.22	11.48
Meseta sur Coricocha	MES-QO	11.53	0.83
Lomadas	L	49.93	3.60
Cono aluvial norte	CAN-CH	0.29	0.02
Cono aluvial norte Písaq	CAN-PI	0.13	0.01
Cono aluvial norte andenes	CAN-A	0.30	0.02
Cono aluvial norte Capco	CAN-CA	0.04	0.00
Cono aluvial norte Lloquepunco	CAN-LL	0.06	0.00
Cono aluvial norte Coya	CAN-CO	0.40	0.03
Cono aluvial norte Lamay	CAN-LA	1.14	0.08
Cono aluvial norte	CAN-	0.13	0.01
Cono aluvial norte Calca	CAN-CAL	2.32	0.17
Cono aluvial norte Parcaypata	CAN-PA	1.06	0.08
Cono aluvial norte Sillacasa	CAN-SI	0.11	0.01
Cono aluvial norte Arín	CAN-AR	1.21	0.09
Cono aluvial norte Chojo	CAN-	0.48	0.03
Cono aluvial norte	CAN	0.10	0.01
Cono aluvial norte Huarán	CAN-HU	1.04	0.08
Cono aluvial norte Huayocan	CAN-	2.00	0.14
Cono aluvial norte Yucay	CAN-YU	1.13	0.08
Cono aluvial norte Yarjapata	CAN-YA	0.19	0.01

Cono aluvial norte Chicón	CAN-CHI	4.47	0.32
Cono aluvial norte Pumahuanca	CAN-PU	4.36	0.31
Cono aluvial norte Huascaray	CAN-	2.06	0.15
Cono aluvial norte Yanahuara	CAN-	4.80	0.35
Cono aluvial norte	CAN-O	4.25	0.31
Cono aluvial norte Unura	CAN-U	0.31	0.02
Cono aluvial sur Taray	CA S-TA	0.36	0.03
Cono aluvial sur Saclo	CAS-SA	0.68	0.05
Cono aluvial sur	CAS	1.72	0.12
Cono aluvial sur Urquillos	CAS-U	1.33	0.10
Cono aluvial sur Huayllabamba	CAS-WA	1.03	0.07
Cono aluvial sur Pachar	CAS-PA	0.45	0.03
TOTAL		1386.60	100.0

4.1.3.1. Unidades geomorfológicas

1) Piso de Valle (Pv)

El piso de valle de la zona de estudio es la parte más baja del valle, abarca una superficie de 32.75 km² que corresponde a 2.36 % de la zona de estudio. Con una morfología de pendiente que varía de ligeramente inclinada a moderadamente inclinada (4-15%) en las terrazas fluviales, y se representa en el mapa geomorfológico con el símbolo Pv. La longitud aproximada del valle en la zona de estudio es de 66.36 kilómetros y se extiende aproximadamente desde la localidad de Písaq hasta Ollantaytambo. Presenta un ancho variable entre 1.5 km en la región de Urubamba a 500 metros en la región de Pachar y Písaq (SIAR, 2014). Su origen se debe a la acumulación de depósitos fluviales a lo largo del río Vilcanota y depósitos aluviales en la desembocadura de las quebradas transversales.

En el piso de valle se localizan las mayores extensiones de áreas de cultivo principalmente de maíz muy cotizado en el extranjero, debido a las buenas condiciones de clima, suelo y disponibilidad de agua (SIAR, 2014).

Los pisos de valle son formaciones del desarrollo de accidentes geográficos, cuya tectónica de extensión ha creado las zonas hundidas donde se han depositado máximos espesores de escombros (Luirei et al., 2018). La sección media de Urubamba tiene terreno plano en el fondo del valle, clima templado y abundante agua de riego, con un control de los movimientos de tierra hecho por los incas, que son áreas de productividad, privilegio y poder, donde prosperó el maíz blanco gigante, adaptado a temperaturas

moderadas y una temporada de crecimiento inusualmente larga; y a pesar de las limitaciones de clima, agua, tecnología y crédito, produce el mejor maíz harinero del mundo (Chipana et al., 2016); y son estas unidades geomorfológicas las que posibilitan el desarrollo de la actividad agrícola en secano, con el agua de lluvia, sin mucha dependencia de agua subterránea como los valles de la costa, donde existe una demanda enorme de agua subterránea (Salmoral et al., 2020).

En el mundo los pisos de valle se han convertido en áreas de producción agrícola cada vez más importantes para los hogares rurales, debido a su disponibilidad relativamente alta y segura de agua y la fertilidad del suelo (Dossou-Yovo et al., 2017); además, son importantes como amortiguadores de agua y puntos críticos de biodiversidad y proporcionan a las comunidades locales recursos forestales, forrajeros y pesqueros, donde con un mejor control del agua a través de infraestructuras de drenaje junto con una gestión integrada de nutrientes promovería el uso agrícola sostenible, para una seguridad alimentaria sostenible (Alemayehu et al., 2022)

2) Laderas

Aledaña al piso de valle, las laderas se presenta en ambas márgenes del río Vilcanota, desde la región de Písaq hasta Cachicata, abarcando una superficie de 416.45 km² correspondiendo un 30.03% de la zona de estudio.

Se dividen en ladera baja norte (LBN) que abarca una extensión de 146.83 km² con 10.59%, ladera baja sur (LBS) que abarca un área de 122.73 km² con 8.85%, y ladera alta norte (LAN) con una extensión de 146.89 km² y 10.59%. Presentan una morfología mayormente con pendiente muy empinada (+50%) a pendiente empinada (25-50%).

Ladera baja norte (LBN) y ladera baja sur (LBS)

Laderas ubicadas en la margen derecha e izquierda del río Vilcanota, empiezan desde el piso de valle y que llegan aproximadamente a altitudes que varían entre los 3,000 y 3,700 msnm (SIAR, 2014).

Presentan una pendiente mayormente muy empinada (+50%), con elevaciones y relieves prominentes cuya gradiente favorece los procesos erosivos, particularmente la formación de cárcavas y movimientos en masa como deslizamientos (SIAR, 2014),



caída de rocas y conos de deyección. En las laderas bajas, en general, se presentan rocas pertenecientes al Grupo Mitu, Grupo Copacabana, Grupo San Jerónimo, Formación Maras y Formación Ollantaytambo. Sobre las unidades litoestratigráficas se han desarrollado depósitos aluviales y coluviales (SIAR, 2014).

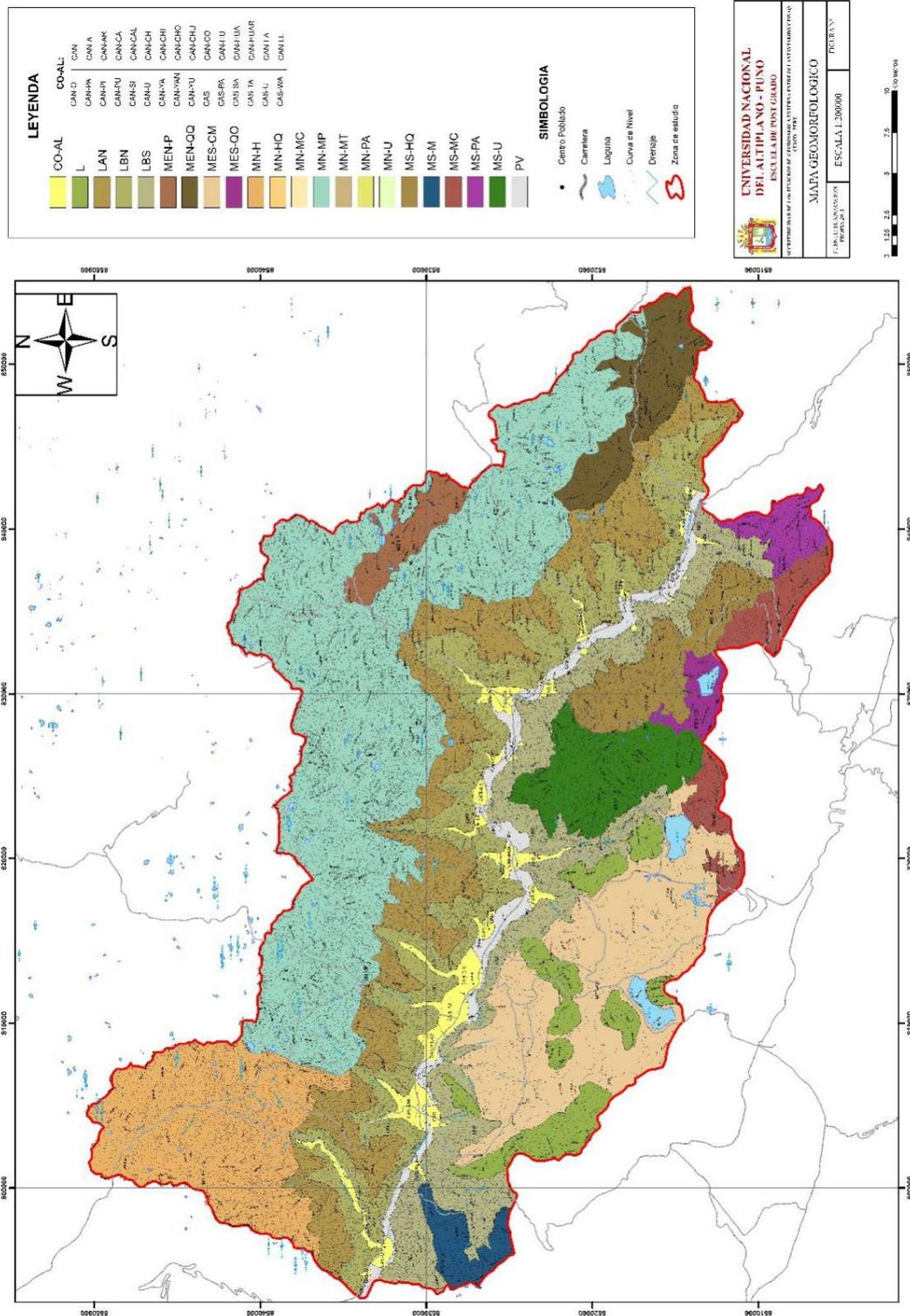


Figura 4. Mapa geomorfológico

Laderas Altas

Esta subunidad geomorfológica se presenta en la margen derecha del río Vilcanota, desde la región de Písaq hasta Cachicata, y se menciona en el mapa geomorfológico como ladera alta norte (LAN). Presenta una morfología con pendientes muy empinadas (+50%) a empinada (25-50%). Las laderas altas se localizan aproximadamente entre los 3,000 y 3,700 msnm, y pueden llegar hasta los 4,200 msnm: Los relieves son menos abruptos que las laderas bajas, sin embargo, en los desniveles del terreno favorecen a la formación de cárcavas (SIAR, 2014). En las laderas altas se presentan rocas del Grupo Mitu, formaciones Huancané, Paucarbamba, Maras y rocas metamórficas paleozoicas. Sobre estas rocas se han generado depósitos aluviales, coluviales y glaciares (SIAR, 2014).

La ladera, entendida como la superficie inclinada de una colina entre su parte superior e inferior, las mismas que a diferencia del altiplano andino, que es un contexto desafiante para la agricultura debido a la escasez de precipitaciones, la alta evapotranspiración, un breve período libre de heladas y la escasa fertilidad del suelo (Meldrum et al., 2018), el Valle Sagrado se caracteriza por sus laderas bajas y altas, las mismas que son desplazamientos de masas de tierra o de rocas que se encuentran en pendiente, con una inestabilidad de los materiales, los mismos que pueden desplazarse en el sentido de la pendiente como consecuencia de la fuerza de la gravedad, sobre todo a causa del retroceso glaciar (Masiokas et al., 2020).

3) Mesetas

Esta unidad se presenta en ambas márgenes del río Vilcanota, que están cortadas por pequeñas quebradas profundas. En el mapa geomorfológico se distinguen la meseta sur Chincheros-Maras (MES-CM), meseta norte Pampallacta (MEN-P), y meseta norte Quello (MEN-QQ), que ocupan un área de 221.57 km² con 15.97 %. Estas unidades se caracterizan por la presencia de lagunas y asentamientos humanos dedicados a las actividades agrícolas.

Meseta sur Chinchero-Maras (MES-CM)

Se localiza en la margen izquierda del río Vilcanota (Figura 9), entre los 3,200 y 3,400 msnm y abarca una superficie de 159.22 km². Presenta una pendiente predominante de moderadamente inclinada a plana (0-15%). Se encuentra cortada por quebradas tributarias del río Vilcanota, Se observa la formación de cárcavas, y ocasionalmente se producen aluviones y pequeños deslizamientos. En esta subunidad se localizan las lagunas de Huaypo, Qoricocha y Piuray, esta última provee de agua potable a la ciudad del Cusco (SIAR, 2014).

Está conformada por afloramientos pertenecientes al Grupo Yuncaypata, Grupo San Jerónimo, formaciones Quilque-Chilca, rocas volcánicas de la Formación Rumicolca. Sobre todas estas rocas se han formado depósitos eluviales y coluviales.

Meseta norte Quello (MEN-QQ)

Localizada al noreste del poblado de Pisaq, en la margen derecha del río Vilcanota entre los 4,300 y 4500 msnm (SIAR, 2014), abarcando una superficie de 42.33 km², con pendiente moderadamente empinada a empinada (15 a 50%). Presenta afloramientos de rocas pertenecientes a la Formación Ananea; sobre él cual se han desarrollado depósitos coluviales.

Meseta norte Pampallacta (MEN-P)

Se encuentra ubicada al noreste de la ciudad de Calca, en la margen derecha del río Vilcanota, entre los 4,000 y 4,300 msnm (SIAR, 2014), que abarca una superficie de 20.02 km², con pendiente moderadamente empinada a empinada (15 a 50%), con desarrollo de depósitos coluviales. Presenta afloramientos de rocas pertenecientes a las formaciones Ananea y San Gabán.

La meseta, por definición constituye un planicie o llanura extensa y elevada situada a considerable altura respecto al nivel del mar, siendo la meseta del Collao en el Altiplano andino, la más referencial, como una extensa planicie de altura ubicada a 3800 metros de altitud (Tapia et al., 2022). Las mesetas continentales mantienen el enigma de su formación, puesto que surgieron en ausencia de

colisión continental, en correlación espacial y temporalmente con el magmatismo de arco andino, debido al engrosamiento de la corteza producido por el acortamiento horizontal de una litosfera térmicamente ablandada (Allmendinger et al., 1997).

4) Montañas

Se localizan en las partes más altas de ambos márgenes del río Vilcanota. Al norte del río Vilcanota se ubican la Montaña norte Mosocllacta-Tотора (MN-MT), Montaña norte Pitusiray (MN-P), Montaña norte Chicón-Pumahuanca (MN-CP) y Montaña norte Halancoma (MN-H); mientras que al sur del río Vilcanota se ubican la Montaña sur Pachatusán (MS-P), Montaña sur Minasnioc (MS-M), Uchuyccosco (MN-HQ), Unoraqui (MS-U) y Montañas del Cusco (MS-MC). La superficie que ocupan las montañas norte es de 468.63 km² con 33.8%, y las montañas sur ocupan una superficie de 11.49 km² con 11.65%.

Montaña norte Morrohuicsa-Pumahuanja (MN-MP)

Esta unidad se ubica en la margen derecha del río Vilcanota entre el cerro Morrohuicsa (Pisac) y el nevado Pumahuanja (Urubamba), ocupan una extensión de 351.58 km², con pendientes muy empinadas (+ 50%) a empinadas (25 – 50%) y con las elevaciones que alcanzan los 5,000 msnm (SIAR, 2014). Comprende rocas pertenecientes al Grupo Mito, formaciones Ananea, San Gabán y depósitos coluviales.

Montañas norte Halancoma (MN-H)

Se encuentran ubicados al norte de Ollantaytambo, entre la quebrada Aruraycocha y el cerro Chicllororjo. Presentan relieves abruptos que abarca una extensión de 117.05 km², con pendientes empinadas a muy empinadas (25 a +50%) y elevaciones que alcanzan los 5,000 msnm (SIAR, 2014). En el extremo oeste de la zona de estudio se encuentra el nevado Halancoma. Litológicamente se compone de rocas pertenecientes a la Formación Verónica, Formación San José, Formación Ollantaytambo y depósitos coluviales.

Montañas sur Pachatusán (MS-P)

Esta unidad abarca grandes superficies, en la zona de estudio solo abarca una superficie de 16.25 km² (1.17%) en el cerro Susiyoc. Tiene elevaciones que alcanzan los 4,400 msnm (SIAR, 2014), con pendiente mayormente empinado (25-50%). Dominan las rocas del Grupo Mitu, Grupo Yuncaypata, formaciones Huancané, Ananea y depósitos coluviales.

Montañas sur Minasnioc (MS-M)

Esta unidad se presenta en grandes extensiones, pero en la zona de estudio ubicada en el extremo oeste, solo presenta una superficie de 16.64 km² (1.20%). Tiene una morfología muy abrupta, con elevaciones que llegan en promedio hasta los 4,900 msnm (SIAR, 2014), con pendiente empinada a muy empinada (25-50%). La litología está compuesta por rocas de la Formación Maras y Grupo San Jerónimo y depósitos coluviales.

Montañas sur Huchuy Qosqo (MS-HQ)

Se encuentra entre el cerro Rajchi (Taray) y el cerro Pucaqasa (Calca). Es una superficie escarpada con 43.95 km² y 3.17% de la zona de estudio, con elevaciones que superan los 4,400 msnm (SIAR, 2014), de pendiente empinada (25-50%). La litología comprende rocas pertenecientes al Grupo Yuncaypata, Grupo Mitu, formaciones Quilque-Chilca y depósitos coluviales.

Montañas sur Unoraqui (MS-U)

Se encuentra al suroeste de la ciudad de Calca entre el cerro Pucaqasa y el cerro Unoraqui (Quebrada Urquillos). Zona muy prominente que abarca una superficie de 51.40 km², con elevaciones que superan los 4,400 msnm (SIAR, 2014), con pendiente muy empinada a empinada (25 a +50%). La litología comprende rocas pertenecientes al Grupo San Jerónimo, Formación Puquín, formaciones Quilque-Chilca y depósitos coluviales.

Montañas sur del Cusco (MS-MC)

Esta unidad abarca grandes extensiones, en la zona de estudio solo se presenta entre los cerros Cuncani Punta y Chanquicruz. Es una zona sobresaliente con respecto a la Depresión de Corao, con una superficie de 31.08 km² (2.24%) y

elevaciones que superan los 4,200 msnm (SIAR, 2014), y pendiente mayormente empinado (25-50%). La litología comprende rocas del Grupo San Jerónimo y depósitos coluviales.

La formación de montañas en los Andes, la cadena montañosa continental más larga de la Tierra, comenzó a finales del Cretácico (Boschman, 2021); cuyo origen se atribuye a la colisión de los continentes, la misma que es un proceso de tectónica de placas por el cual dos placas tectónicas continentales han entrado en contacto debido a las fuerzas tectónicas que las empujaron (Brown et al., 2008); así, las montañas andinas se habrían formado por la colisión de los continentes y la migración del arco magmático impulsada por el flujo del manto completo inducido por la subducción, la misma que es una actividad convergente que ocurre cuando una placa con corteza oceánica más pesada choca con otra placa de corteza continental menos pesada, la misma que a lo largo del margen occidental de América del Sur ha estado activa desde el Jurásico, pero la orogenia andina comenzó a mediados del Cretácico y fue precedida por una extensión de arco posterior en el Jurásico-Cretácico temprano (Schellart, 2017).

La ciudad peruana de Cusco se encuentra enclavada precisamente en los Andes sudamericanos, como una de las metrópolis más emblemáticas del continente, con un impresionante ejemplo de urbanismo precolombino, la capital del antiguo imperio inca se convirtió en una de las ciudades más representativas del reino colonial español, declarada hoy como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (Branca & Haller, 2021). Los incas lograron dominar la ingeniería hidráulica con una magistral planificación, diseño y construcción, evidenciando sus habilidades técnicas en el suministro de agua, fuentes, terrazas, cimientos, muros y senderos en Machu Picchu, donde la topografía montañosa dificultaba la construcción, por las altas precipitaciones, terreno empinado y acceso desafiante (Wright, 2021). El otro ejemplo de la sabiduría hidráulica Inca destaca el sistema de canales de Tipón, ubicado a 23 km al sudeste del Cusco, a una altitud de 3,560 m, ubicado en el distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchis, un adoratorio mayor donde se rendía culto al agua, una maravilla de la Ingeniería Civil (Ortloff, 2022).

5) Conos aluviales

Los conos aluviales son de diversos tamaños y se presentan en la desembocadura de las quebradas transversales que llegan al río Vilcanota en ambas márgenes, siendo los de mayores dimensiones aquellos localizados en la margen derecha (SIAR, 2014). Sobre estos conos aluviales se han desarrollado grandes poblados como Písaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo. Cabe destacar el crecimiento y expansión urbana desordenada de estos poblados en el Valle del Vilcanota o Valle Sagrado de los Incas, y la disminución de los terrenos de cultivo mayormente de maíz, por el nuevo uso del suelo, aumentando de esta manera el peligro a los movimientos en masa e inundaciones.

Los conos aluviales se originan por la acumulación de material sedimentario en eventos sucesivos con superposición de flujos de huaycos o aluviones antiguos, debido al cambio de gradiente topográfico en la desembocadura de las quebradas que llegan al río Vilcanota y que se depositan como abanicos que han controlado la migración. Están compuestas por gravas y bloques de rocas subangulosas en una matriz limo-arcillosa (SIAR, 2014).

Debido al pasado geodinámico del origen de los conos aluviales en el Valle del Vilcanota, el peligro actual es latente frente al peligro por aluviones, deslizamientos e inundaciones, que generalmente se activan o reactivan en la época de lluvias, que es de noviembre a marzo de cada año, o como grandes eventos extraordinarios como el ocurrido el año 2010.

La superficie total que ocupan la mayoría de los conos aluviales cartografiados en la zona de estudio es de 37.95 km² con 2.73%. Los conos aluviales registrados en la margen derecha (Conos aluviales norte con 32.38 km² y 2.34%) y margen izquierda del río Vilcanota (Conos aluviales sur con 5.57 km² y 0.4%) son los siguientes: Conos aluviales norte Chaupihuayco (CAN-CH), Písaq (CAN-PI), andenes (CAN-A), Lloquepunco (CAN-LL), Capco (CAN-CA), Coya (CAN-CO), Lamay (CAN-LA), Chuquibambilla (CAN-CHU), Sillacasa (CAN-SI), Calca (CAN-CAL), Parcaypata (CAN-PA), Chojo (CAN-CHO), Cono aluvial (CAN), Arín (CAN-AR), Huarán (CAN-HU), Huayocán (CAN-HUA), Yucay (CAN-YU), Yarjapata (CAN-YA), Chicón (CAN-CHI), Pumahuanca (CAN-PU),

Huascaray (CAN-HUAR), Yanahuara (CAN-YAN), Ollantaytambo (CAN-O), Unura (CAN-U). Los conos aluviales ubicados en la margen izquierda del río Vilcanota son los conos aluviales sur: Taray (CAS-TA), Saclo (CAS-SA), Urquillos (CAS-U) Huayllabamba (CAS-WA), Cono aluvial (CAS), y Pachar (CAS-PA).

Cono aluvial norte Chaupihuayco (CAN-CH)

Tiene un área de 0.29 km², con pendiente plana a ligeramente inclinada (0-4%), formado por aportes aluviales provenientes de la quebrada Chaupihuayco o Chongo. Por la topografía abrupta de la parte alta, en la temporada de lluvias existe el peligro de aluviones e inundaciones. Se conserva en gran parte los terrenos de cultivo, con relación al nuevo uso hotelero.

Cono aluvial norte Písaq (CAN-PI)

Tiene un área de 0.13 km² con pendiente plana a empinado (0-50%), formado por depósitos aluviales provenientes de la quebrada Colispata. Casi la totalidad de la superficie del cono aluvial, esta edificado y corresponde a la localidad de Písaq. Otro cono más pequeño, con similar característica urbana y de vegetación es el Cono aluvial norte Lloquepunco (CAN-LL), mientras que el Cono aluvial norte andenes (CAN-A), y el Cono aluvial norte Capco (CAN-CA) son utilizados exclusivamente como terrenos de cultivo. Por la topografía escarpada de la parte alta, en la temporada de lluvias existe el peligro de aluviones e inundaciones en la ciudad de Písaq (SIAR, 2014). La evaluación del peligro de deslizamientos de tierra requiere un enfoque de amenazas múltiples, ya que pueden ocurrir diferentes tipos de deslizamientos de tierra, cada uno con diferentes características y factores causales, y con diferentes probabilidades espaciales, temporales y de tamaño. Además, los peligros de deslizamientos de tierra a menudo ocurren junto con otros tipos de peligros de inundación y aluvión (Corominas et al., 2014).

Cono aluvial norte Coya (CAN-CO)

Abarca un área de 0.4 km² con pendiente plana a moderadamente empinada (0-25%) a moderadamente empinada (15-25%), formado por sucesivos aportes de sedimentos aluviales, provenientes de la quebrada Huaynapata o Yanamayo.

Aproximadamente en igualdad de superficie se encuentran los terrenos de cultivo y las viviendas del poblado de Coya. En ambos flancos de la quebrada, por presentar pendientes empinadas, se producen movimientos en masa e inundación.

Cono aluvial norte Lamay (CAN-LA)

Comprende una superficie de 1.14 km² con pendiente plana a moderadamente empinada (0-25%), formado por depósitos aluviales, procedentes de la quebrada Carmen. La expansión urbana de Lamay está en crecimiento, igualando casi a la reducción de los terrenos de cultivo. Al noroeste y de menor dimensión se presenta el cono aluvial Chuquibambilla (CAN-CHU), que tiene las mismas características geomorfológicas y de vegetación. En ambos flancos, las laderas del cono aluvial son escarpadas y rocosas, fuertemente presionada por actividades antrópicas, susceptibles a caída de rocas y derrumbes.

Cono aluvial norte Calca (CAN-CAL)

Abarca un área de 2.32 km² con pendiente de plana a moderadamente empinada (0-25%); formado por aluviones antiguos procedentes de la quebrada Ccochoc. Gran parte del cono aluvial está ocupado por viviendas del poblado de Calca, y superficies muy reducidas por terrenos de cultivo. Otros conos adyacentes de menores dimensiones son al oeste, el cono aluvial Parcaypata (CAN-PA) y hacia el sureste el Cono aluvial Sillacasa (CAN-SI), que presentan las mismas características geomorfológicas y de vegetación. En los flancos de la quebrada escarpada se presentan deslizamientos derrumbes, huaycos e inundaciones. El río Vilcanota produce erosión en su margen derecha afectando el abanico aluvial del río Ccochoc, donde se asienta el poblado de Calca (Vilchez et al., 2020).

Cono aluvial norte Arín (CAN-AR)

Comprende una superficie de 1.21 km², con pendiente plana a empinada (0-50%); formado por depósitos sucesivos de aluviones, procedentes de la quebrada Churo. El cono aluvial es activo, con presencia de viviendas espaciadas y terrenos de cultivo. El Cono aluvial norte Chojo (CAN-CHO) y Cono aluvial norte (CAN) de pequeñas dimensiones y de mismas características geomorfológicas y de

vegetación, se presentan hacia el este. En estos conos se presentan derrumbes, caídas de rocas, deslizamientos, aluviones e inundaciones.

Cono aluvial norte Huarán (CAN-HU)

Abarca un área de 1.04 km², con pendiente moderadamente inclinada a empinada (4-50%), formado por depósitos sucesivos de aluviones, procedentes de la quebrada Cancha. En este cono se conservan en mayor proporción los terrenos de cultivo, con relación a las viviendas con distribución esparcida. En las laderas empinadas se presentan fenómenos de geodinámica externa como aluvión e inundación.

Cono aluvial norte Huayocari (CAN-HUA)

Abarca un área de 2.00 km², con pendiente plana a moderadamente empinada (0-25%) a moderadamente empinada (15-25%), formado por depósitos aluvionales, procedentes de la quebrada Layjapuquio. Los terrenos de cultivo se conservan en mayor proporción, con relación a las viviendas dispersas. Los peligros de aluvión e inundaciones son importantes.

Cono aluvial norte Yucay (CAN-YU)

Abarca una superficie de 1.13 km² con pendiente ligeramente inclinada a moderadamente empinada (4-25%), formado por eventos de aluviones, procedentes de la quebrada San Juan. La parte más distal del cono, está ocupado por viviendas del poblado de Yucay, conservándose gran parte del área del como terrenos de cultivo. Hacia el este se encuentra el cono aluvial norte Yarjapata (CAN-YA) de pequeña dimensión, y con las mismas características de pendiente y vegetación. En las laderas de la quebrada se presentan pequeños derrumbes, restos de aluviones e inundaciones pasadas.

Cono aluvial Chicón (CAN-CHI)

Comprende un área de 4.47 km², con pendiente ligeramente inclinada a moderadamente empinada (4-25%), formado por flujos de aluviones, provenientes de la quebrada Chicón. Sobre este cono se emplaza el poblado de Urubamba, con la mayor expansión urbana en el Valle del Vilcanota, en desmedro de la

disminución de los terrenos de cultivo. Es latente el peligro por aluvión e inundaciones.

Cono aluvial norte Pumahuanca (CAN-PU)

Alcanza un área de 4.36 km², con pendiente ligeramente inclinada a moderadamente empinada (4-25%), formado por depósitos aluviales, provenientes de la quebrada Pachaschioc o Pumahuanca. En estos últimos años la expansión urbana de Urubamba se ha incrementado, llegando a igualar a la ocupación de terrenos de cultivo. Existe el peligro por aluviones e inundación.

Cono aluvial norte Huascaray (CAN-HUAR)

Alcanza un área de 2.06 km², con pendiente ligeramente inclinada a moderadamente empinada (4-25%), compuesto por depósitos aluviales, provenientes de la quebrada Huascaray. El uso del suelo es principalmente como terrenos de cultivo. Existe el peligro por aluvión e inundación.

Cono aluvial norte Yanahuara (CAN-YAN)

Comprende una superficie de 4.80 km², con pendiente ligeramente inclinada a moderadamente empinada (4-25%), formado por depósitos aluviales, provenientes de las quebradas Mantacnayniyoc y Calicanto. Este cono aluvial está ocupado principalmente por terrenos de cultivo. Es latente el peligro por aluvión e inundación.

Cono aluvial norte Ollantaytambo (CAN-O)

Abarca un área de 4.25 km², con una pendiente plana a inclinada (0-50%); constituida por varios eventos de flujos aluviales, provenientes de la quebrada Patacancha. La mayor parte de este cono está ocupado por terrenos de cultivo y en menor proporción es ocupada por el poblado de Ollantaytambo, con presión de la ampliación y construcción de hoteles. Hacia el oeste, se ubica el cono aluvial Unura (CAN-U), de pequeña dimensión, con similares características geomorfológicas y vegetación. En este cono existe el peligro por aluvión e inundación a la localidad de Ollantaytambo que además tiene un registro histórico desde la época inca.

Cono aluvial Taray (CAS-TA)

Presenta un área de 0.36 km², con pendiente plana a ligeramente inclinada (0-4%), formado por depósitos aluviales provenientes de la quebrada Quesermayo. La mayor parte de este cono aluvial es ocupada por viviendas de la localidad de Taray. Las laderas empinadas de la quebrada son susceptibles a deslizamientos. Existe el peligro por aluvión e inundación como lo ocurrido en el 2012.

Cono aluvial sur Saclo (CAS-SA)

Abarca un área de 0.68 km², con pendiente plana a ligeramente inclinada (0-15%); formado por flujos aluviales procedentes de la quebrada Quello Unu. La mayor parte de este cono, se conserva como terrenos de cultivo. Otro cono aluvial (CAS) de menor superficie, presenta similares características geomorfológicas y de vegetación.

Cono aluvial sur Urquillos (CAS-U)

Presenta una extensión de 1.33 km², con una pendiente plana a moderadamente empinada (0-25%), compuesto por depósitos de aluviones provenientes de la quebrada Urquillos. La mayor parte de este cono aluvial se conserva como terrenos de cultivo, sin embargo, la presión por la construcción de hoteles es fuerte.

Cono aluvial sur Huayllabamba (CAS-WA)

Tiene una extensión de 1.03 km², con una pendiente plana a moderadamente empinada (0-25%), compuesto por depósitos de aluviones provenientes de la quebrada Marcuyohuayjo. La mayor parte de este cono aluvial, está ocupada por viviendas de la población de Huayllabamba y en menor proporción por terrenos de cultivo.

Cono aluvial Pachar (CAS-PA)

Abarca un área de 0.4 km² con una pendiente plana a ligeramente inclinada (0-4%), formado por aluviones provenientes de la quebrada Huarcocondo. La mayor superficie de este cono aluvial, abarcan los terrenos de cultivo y en menor

proporción las viviendas del poblado de Pachar. En ambas laderas de la quebrada, se originan deslizamientos y pequeños derrumbes.

Cabe mencionar que los conos aluviales, también pueden llamarse como abanico aluvial o cono de deyección, que es un conjunto de sedimentos aluviales arrastrados por un río de las montañas y laderas, que se extiende radialmente ladera abajo desde el punto en el que el curso de agua abandona la zona montañosa. En planta suele tener forma de cono o abanico, de ahí su nombre. Los abanicos aluviales y los conos de escombros unen dos zonas del sistema fluvial y, por lo tanto, tienen funciones importantes de acoplamiento o amortiguamiento, con un rol funcional que acopla escombros-cono, o conservación que controla el suministro de sedimentos (Harvey, 2012).

Estas acumulaciones de sedimentos se abren en abanico desde una fuente concentrada de sedimentos, como un cañón angosto que emerge de una escarpa. Son característicos del terreno montañoso en climas áridos a semiáridos, pero también se encuentran en ambientes más húmedos sujetos a lluvias intensas y en áreas de glaciación moderna. Los abanicos aluviales son los accidentes geográficos de depósito más dominantes desarrollados a lo largo de los frentes montañosos delimitados por fallas normales en contextos extensionales (Özpolat et al., 2022), y como tales, son cuerpos sedimentarios dinámicos, cuya morfología y estratigrafía reflejan las condiciones climáticas y tectónicas durante su formación, pudiendo cambiar sus parámetros geomorfológicos durante su evolución, tales como su longitud radial, la pendiente de la superficie del abanico y el área fuente, y la ubicación de la punta activa del abanico (Ratnayaka et al., 2019).

6) Lomas

Estas geoformas son denominadas como L, se identifican como relieves que sobresalen en la Meseta Chinchero-Maras afectadas por erosión superficial, abarcan una superficie de 49.93 km² con 3.6%. La pendiente es de moderadamente empinada a empinada (15-50%) (SIAR, 2014). En algunos casos se trata de afloramientos de rocas volcánicas, y en otros casos son afloramientos de rocas clásticas de areniscas y limolitas rojas del Grupo Yuncaypata (SIAR, 2014).

Cabe resaltar que los peligros geológicos como los deslizamientos se presentan principalmente en las unidades geomorfológicas laderas y montañas por el aumento de pendiente del terreno; los aluviones e inundaciones se presentan en los conos aluviales por la disminución de pendiente del terreno. Las inundaciones se presentan con mayor frecuencia en las unidades geomorfológicas piso de valle y mesetas por el relieve casi plano.

La lomada también se puede llamarse colina, que es una forma de relieve que se extiende por encima del terreno circundante que en la zona de estudio está conformado por yesos. A menudo tiene una cumbre distinta que en la zona de estudio está conformado por rocas volcánicas. Las lomadas o colinas pueden formarse a través de fenómenos geomórficos: fallas, erosión de formas terrestres más grandes, como montañas y movimiento y deposición de sedimentos por parte de los glaciares, en particular, morrenas (lomas o colinas alargadas) y crestas (drumlins) o por erosión que expone roca sólida que luego se erosiona hasta formar una colina (Portal, 2017).

4.1.4. Cobertura vegetal

En el “Plan de acondicionamiento territorial 1ra etapa provincias de Calca y Urubamba” elaborado el 2011 (SIAR, 2014) se describe la cobertura vegetal presentado por el biólogo Alfredo Tupayachi Herrera. Se ha realizado un resumen de los datos de cobertura vegetal, con el fin de utilizar como factor condicionante en la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa.

4.1.4.1. Unidades de cobertura vegetal

A continuación, se presenta el resumen de las diferentes unidades de cobertura vegetal (Tabla 16 y Figura 5). En la Tabla 16 se presentan 14 unidades de cobertura vegetal con un área de 963.89 km² que hacen un porcentaje de 69% indicando buena cobertura vegetal. En el mapa de cobertura vegetal (Figura 5) se muestran 20 delimitaciones, de las cuales 14 son las unidades de cobertura vegetal y delimitadas también las áreas cultivadas, los ríos, lagunas, glaciares, canteras de sal y zonas urbanas.

Tabla 16

Unidades de cobertura vegetal

Cobertura vegetal	Símbolo	Área, km ²	Área, %
Área desnuda o de escasa vegetación	adev	393.85	28.40
Área rocosa con vegetación saxícola	arvs	21.43	1.55
Bofedal	bf	4.29	0.31
Bosque húmedo de valles interandinos	bhvi	7.47	0.54
Estepa espinosa	ee	0.68	0.05
Matorral arbolado de valles interandinos	mavi	19.48	1.40
Matorral arbustivo de valles interandinos	marvi	90.75	6.54
Matorral de puna húmeda	maph	4.79	0.35
Matorral halofítico	mh	14.27	1.03
Matorral seco espinoso	mse	75.28	5.43
Parche boscoso de q'ueuña	pbq	15.43	1.11
Pastizal	Pz	298.85	21.55
Plantación forestal exótica	pfe	16.02	1.16
Vegetación ribereña	vr	1.3	0.09
Áreas cultivadas		379.74	27.39
Ríos		6.1	0.44
Glaciares		14.21	1.02
Cantera de sal		0.1	0.01
Lagunas		13.05	0.94
Zonas urbanas		9.51	0.69
Total general		1386.60	100.00

Fuente: SIAR, 2014

1) Estepa espinosa (ee)

Ocupa una superficie de 68 ha que representan el 0.05 % del área de estudio. La flora se encuentran entre los 2,780 a 3,000 msnm y se hallan en ambas márgenes del río Vilcanota, correspondiente al piso de valle, conos y suelos coluviales, desde Silque en Ollantaytambo, hasta Saclo en Calca (SIAR, 2014). En esta unidad es característico la presencia de arbustos, la tara, huarango, cactáceas, algarrobo andino, huaranhuay, y el molle.



2) Matorral seco espinoso (mse)

Se extienden desde el piso de valle y continua por las laderas suaves o escarpadas hasta una cota promedio de 3,300 msnm. Ocupa 7,528 ha, que representa el 5.43 % del área total. La composición vegetal es muy variada de *Berberis boliviana*, *Colletia spinosissima*, *Acalipha aronioides*, *Flourenzia polycephala*, *Schinus microphyllus*, *Dasyphyllum leiocephalum* (SIAR, 2014).

3) Matorral arbustivo de valles interandinos (marvi)

Ocupa 9,075 ha que representa el 6.54 % del área total evaluada. Se presenta en ambas márgenes del río Vilcanota, hasta una altura promedio de 3,500 msnm. Corresponde a las laderas de Arín, Pumahuanca, etc. Las especies vegetales predominantes son la tayanca, llaulli, marcju, murmuchkuy, vino, chillca, t'ancar, y el vinagrillo (SIAR, 2014).

4) Matorral halofítico (mh)

Aflora en la margen izquierda del río Vilcanota entre Huayllabamba, Maras y Pachar., ocupan 1,427 ha que representa el 1.03 % del área total.

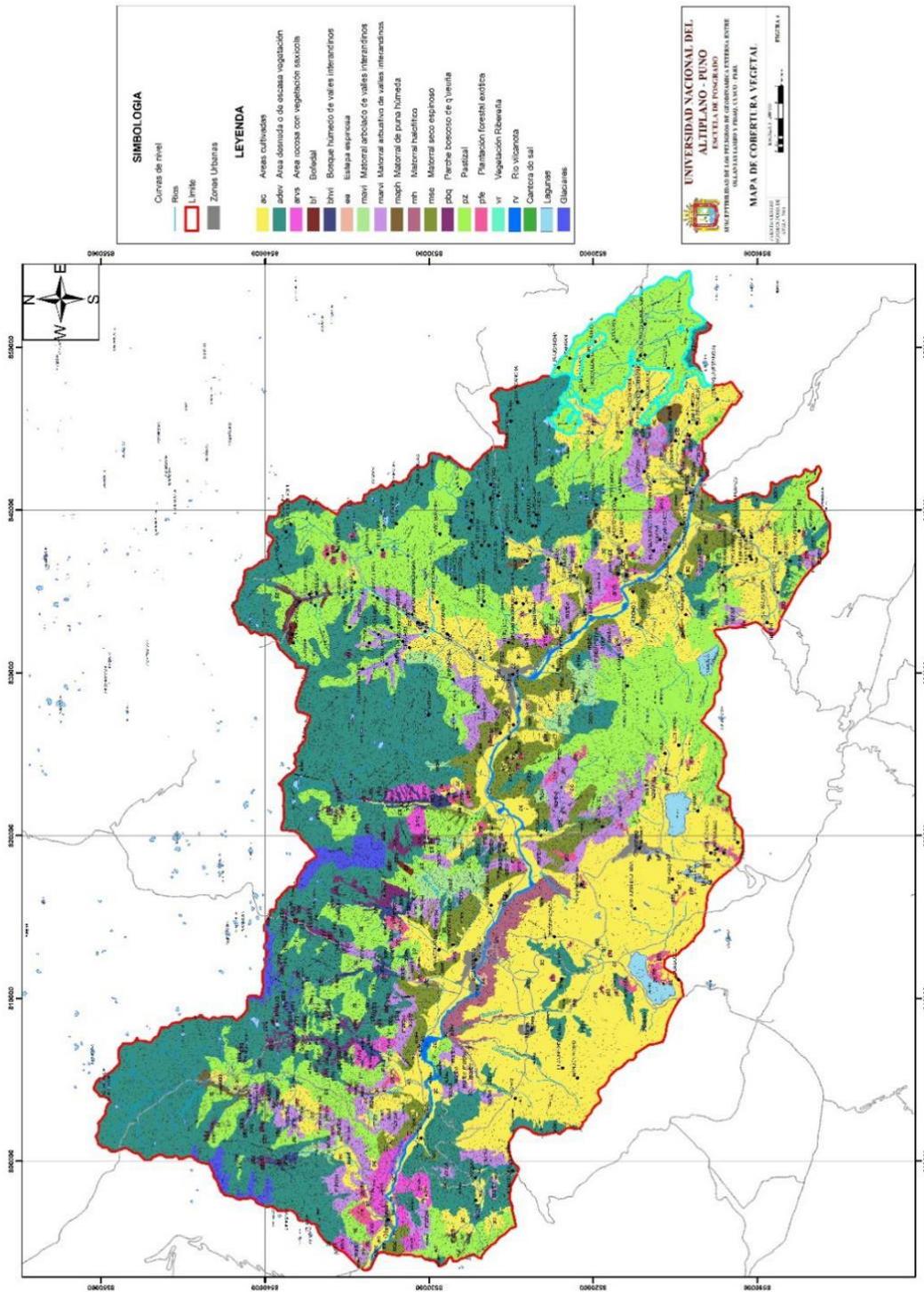


Figura 5. Mapa de cobertura vegetal (SIAR, 2014).

Las especies más representativas son *Pluchea zamalloai*, *Passiflora gracilens*, *Nicotiana paniculata*, *Coursetia fruticosa*, *Nolana urubambae*, *Krameria lappacea*, *Distichlis humilis* (Tito, 2018).

5) Matorral arbolado de valles interandinos (mavi)

Ocupan 1,948 ha que representa el 1.40 % del área total. Se ubican aproximadamente entre los 3,650 y 3,750 msnm de altitud, comprende las laderas de Jochoc, Arín-Huarán, Yucay, Chicón, Pumahuanca, Yanahuara-Chaquihuayco y Huilloc-Patacancha y por el sur las laderas de Silque. Se caracteriza por la vegetación de árboles y arbustos, con abundancia de la tasta, el Chachacomo, especies frutales como las pasifloras tumbos, tintines (SIAR, 2014)

6) Vegetación ribereña (vr)

Abarca un área de 13 ha que equivale a 0.09 % del área total. Esta vegetación se observa en las quebradas de Huarán, Pumahuanca, Manthanay y Phiri. Las especies características, son el aliso, unca, laurel de cera, raque, manglillo y wichullu (SIAR, 2014).

7) Áreas rocosas con vegetación saxícola (arvs)

Presentan una cobertura vegetal que crece en las fisuras de las rocas (plantas fisurícolas) o en el escaso suelo acumulado a través del tiempo (plantas litófitas) soportando la sequedad. Estas formaciones se ubican en las laderas bajas norte y sur de la zona de estudio (SIAR, 2014), ocupan un área de 2,143 ha que representa el 1.55 % del área total.

8) Matorral de la puna húmeda (maph)

Esta vegetación se distribuye entre los 4,000 a 4,800 msnm, ocupan 479 ha que representa el 0.35 % del área total. Están conformados por bosques alto andino de t'asta, toccarhuay.

9) Bosque húmedo de valles interandinos (bhvi).

Se presentan en las quebradas de Huarán-Cancha Cancha en (Calca), Chicón, Pumahuanca, Yanahuara – Mantamay en (Urubamba), en Patallacta. Se presentan

en la margen derecha del río Vilcanota, en las montañas altas con presencia de humedad para el desarrollo de los bosques de *Polylepis spp* (Qewñal)(SIAR, 2014), quebrada Patacancha, los que cubren una extensión de 747 ha y que representa el 0.54 % del área total.

10) Pastizales (Pz)

Constituyen las formaciones vegetales de mayor extensión y se encuentran en las partes elevadas de las montañas y próximos a los nevados, en Pachar, Lamay-Calca, mesetas de Chinchero-Maras; los pastizales están conformados por pastos, plantas graminiformes y numerosas especies de hierbas anuales y plantas perennes asociadas, palatables para el ganado (SIAR, 2014) y relacionadas a la época de lluvias. Ocupa una extensión de 29,885 ha que representa el 21.55 % del área total.

11) Parche boscoso de q'euña (pbq)

En las montañas de la margen derecha del Valle del Vilcanota se encuentran bosques de *Polylepis spp* q'euñales, en las alturas de Calca Arín, Yanacocha, Chaquicocha, Chicón, Yanahuara, Mantamay y Ollantaytambo (SIAR, 2014), entre altitudes de 3,800 a 4,890 msnm, los que ocupan una superficie 1,543 ha que representa el 1.11 % del área de estudio.

12) Áreas desnudas o de escasa vegetación (adev)

Se presentan en las altas montañas y se encuentran desnudas o con escasa vegetación debido al intemperismo, granizada, vientos y la erosión que soportan las capas delgadas de suelo (SIAR, 2014), que limitan la presencia de vegetación.

13) Bofedales (bf)

Se ubican en las montañas y el piso de valle, y se encuentran rodeando las lagunas, o formando los bofedales propiamente dichos. En esta unidad se desarrollan los mejores pastos y especies graminiformes palatables que alimentan los camélidos en los Andes (SIAR, 2014). El área ocupada por esta unidad es de 429 ha, que representa el 0.31 % del área total. Los bofedales altoandinos georreferenciados, dada su disponibilidad de agua y vegetación verde en forma permanente, son medios de vida de las vicuñas y fauna silvestre (Díaz et al., 2016); y dada su

diversidad florística, la alta productividad primaria neta aérea y su alta capacidad de carga, hacen de estos espacios, hábitats de los herbívoros en los altos andes y un espacio de pastoreo de llamas, alpacas y ovinos (Yaranga, 2020).

14) Plantaciones forestales exóticas (pfe)

Se presentan en las laderas bajas y medias de Písaq, Taray, Chicón, Pumahuanca, Manthanay, la Meseta Chinchero-Maras y Ollantaytambo con presencia de plantaciones de eucaliptos; mientras que los pinos se encuentran en la quebrada alta de Ccochoc y Chicón (SIAR, 2014). Estos árboles pueden encontrarse entre los 2,500 hasta los 3,900 msnm. Ocupan una extensión de 1,602 ha, que representa el 1.16 % del área total de la zona de estudio.

Las unidades más propensas a la formación de movimientos en masa son aquellas áreas desnudas de suelo y rocas fracturadas, así como las unidades estepa espinosa y matorral halofítico, matorral seco espinoso, glaciares y cantera de sal. Las pendientes son poco estables en las unidades área boscosa de q'ueuña, área rocosa con vegetación saxícola, matorral arbustivo de valles interandinos, pastizal, plantaciones forestales exótica. Las pendientes son más estables en las unidades área cultivada, matorral de puna húmeda, matorral arbolado de valles interandinos, vegetación ribereña, bosque húmedo de valles internadinos y parche boscoso de q'ueuña.

Los suelos albergan diversas comunidades vegetales que sustentan y regulan las funciones de los ecosistemas, siendo los pastizales, los matorrales y las áreas de cultivo las que ocupan la mayor proporción de la cobertura vegetal, con efecto directo sobre la producción de las plantas y la eficiencia en el uso de los recursos. La interacción suelo-planta de las áreas cultivadas tiene impacto en la producción de alimentos y la seguridad alimentaria y nutricional (El Mujtar et al., 2019), donde la tierra es el recurso natural más importante que posibilita la vida, principalmente la vida vegetal, que se expresa como biomasa que posibilita la vida animal y la vida humana, a través de la cadena y la red alimentaria (Nedd et al., 2021).

La biodiversidad vegetal promueve directamente el funcionamiento de los ecosistemas y la agricultura sostenible directamente y a través de efectos mediados por procesos microbianos subterráneos. La estructura de la comunidad vegetal influye en la diversidad microbiana del suelo, lo que a su vez promueve las funciones deseadas para la agricultura sostenible, para lograr la seguridad alimentaria en el Antropoceno (Cappelli et al., 2022).

El suelo desnudo representa casi un tercio de la superficie (Tabla 16), lo cual es preocupante, puesto que esas áreas están en franco proceso de erosión. Las plantas en su conjunto, es decir la cobertura vegetal, es fundamental para la prevención de la erosión del suelo y el escurrimiento del agua. La erosión del suelo se ha convertido en un problema ambiental crítico en todos los ecosistemas terrestres del mundo, debido a que inflige daños múltiples y graves en los ecosistemas naturales y manejados, puesto que reduce la capacidad de retención de agua debido a la rápida escorrentía del agua; reduce también la materia orgánica del suelo, los nutrientes y su valiosa biota; así como la diversidad de especies de plantas, animales y microbios; por lo que, una medida efectiva para el control de la erosión y la regeneración de los suelos degradados es el establecimiento de la cobertura vegetal (Durán & Rodríguez, 2008a). Un suelo erosionado después de la degradación de la vegetación inducida por la perturbación de cabras salvajes, un mamífero invasor y depredador, conduce a la pérdida o acumulación de suelo a escala local, alterando sus propiedades químicas y limitando el establecimiento de plantas de pastizales (Hata et al., 2019).

Los suelos de los Andes son mucho más susceptibles a la erosión, dada su pronunciada pendiente y la intensidad de las precipitaciones, con una tasa de erosión de 9 mm año^{-1} , asumiendo que el 90% de un solo deslizamiento de tierra llega al río en promedio (Blodgett & Isacks, 2007), por lo que es necesario las cubiertas vegetales para la restauración de ambientes degradados, así como concentrar los esfuerzos futuros en el desarrollo de sucesiones ecológicas y métodos de revegetación que promuevan una cubierta de dosel arbóreo sustancial y sostenible (Durán & Rodríguez, 2008b), siendo necesario la restauración de la infraestructura natural, tales como la restauración y protección de la vegetación

natural, como bosques o pastizales nativos, forestación con especies nativas o exóticas, así como la implementación de medidas de conservación de suelo y agua para mitigar la erosión (Vanacker et al., 2022).

4.2. Susceptibilidad por movimientos en masa e inundación

4.2.1. Susceptibilidad por movimientos en masa

Después de seguir la metodología de la determinación de la susceptibilidad a movimientos masa del análisis de los factores condicionantes y las ponderaciones de las unidades de los mapas factor, se realiza la combinación de dichos factores mediante la utilización de una herramienta Calculadora Raster denominado álgebra de capas, del software Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.3) (Ttito, 2018). El resultado es el mapa de suma de factores, con 5 rangos de susceptibilidad, que viene a ser el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa (Figura 6). La Figura 6 se muestran las delimitaciones de susceptibilidad desde muy baja a muy alta y diferenciadas en colores, en general se muestra que la susceptibilidad a movimientos en masa es muy baja a baja en las mesetas, la susceptibilidad es media mayormente en las laderas y abanicos aluviales, la susceptibilidad es alta a muy alta en las montañas.

En la Tabla 17, se muestra los criterios de susceptibilidad, considerando las condiciones de pendiente, litología, intemperización, fractura y presencia de aguas subterráneas y superficiales.

Los mapas raster de grados de susceptibilidad a movimientos de masa, deben ser convertidos en el software ArcGIS, donde se hallaron las áreas de cada uno de los grados de susceptibilidad (Tabla 18). En la Tabla 18 de los grados de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta, las áreas con mayor grado de susceptibilidad están entre media y alta que podría incrementarse a la susceptibilidad muy alta, lo que indica que sean susceptibles a movimientos en masa.

Tabla 17

Criterios de susceptibilidad por movimientos en masa

Grados	Criterios
Muy alta	Laderas conformadas por yesos, rocas sedimentarias carbonatadas y rocas metamórficas, muy intemperizadas, y fracturadas; sedimentos recientes o cuaternarios inconsolidados muy saturados, laderas con pendientes mayor a 50%, movimientos en masa activos. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente existe la alta posibilidad que ocurran movimientos en masa. La presencia de aguas subterráneas y superficiales en la época de lluvias anuales influye en la inestabilidad de laderas
Alta	Laderas conformadas por rocas sedimentarias, rocas volcánicas y rocas metamórficas, con alto intemperismo y fracturadas; sedimentos recientes inconsolidados parcialmente saturados, laderas con pendientes entre 25 a 50%. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente existe la posibilidad de que ocurran movimientos en masa. La presencia de aguas superficiales en la época de lluvias anuales influye en la inestabilidad de las laderas.
Media	Laderas conformadas por rocas sedimentarias, rocas volcánicas, con moderado intemperismo, laderas con pendientes entre 15 y 25%. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente no existe la completa seguridad de que no ocurran movimientos en masa. Estos pueden activarse o reactivarse por las lluvias excepcionales y ocurrencia de sismos. Presencia de aguas subterráneas en época de lluvias anuales y excepcionales.
Baja	Laderas conformados por rocas volcánicas, rocas sedimentarias poco fracturados, moderada a poca intemperización. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente entre 4 a 15%, tienen pocas condiciones para originar movimientos en masa, sin embargo pueden activarse en época de lluvias excepcionales. Presencia de aguas subterráneas y superficiales en poca cantidad o discurren libremente por la falta de fracturas de las rocas.
Muy baja	Laderas conformadas por rocas sedimentarias y rocas volcánicas muy poco fracturadas y muy poco intemperizadas. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente menores a 4% no existen indicios para la formación de movimientos en masa por la pendiente casi plana.

Tabla 18

Área de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa

Grado de susceptibilidad	Área, km ²	Área, %
Muy Baja	96.08	6.93
Baja	196.13	14.14
Media	439.41	31.69
Alta	538.75	38.85
Muy Alta	116.24	8.38
Total general	1386.60	100.00

Susceptibilidad muy baja

Las áreas con susceptibilidad muy baja, se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con el color verde oscuro, comprende una extensión de 96.08 km² que corresponde a 6.93% del área de estudio (Figura 6 y Tabla 18). Las zonas con susceptibilidad muy baja se encuentran en el piso de valle del río Vilcanota, así como pequeñas superficies de las mesetas. En estas zonas no existen indicios para la formación de movimientos en masa por la pendiente ligeramente inclinada. Vílchez et al., (2007) mencionan que la superficie de los terrenos con pendiente muy baja, presentan escasos indicios de formación de movimientos en masa, o donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos (Fidel et al., 2010). Los movimientos en masa son inexistentes o muy raros; ya que las características intrínsecas de los terrenos hacen difícil su ocurrencia, aunque no significa que no se puedan producir. Estos terrenos se pueden considerar relativamente estables (Vilchez et al., 2020).

Susceptibilidad baja

Las áreas con susceptibilidad baja, se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con el color verde claro, comprende una regular extensión de 196.13 km² y porcentaje de 14.14% del área de estudio (Figura 6 y Tabla 18). La superficie de los terrenos en esta zona presenta pendiente moderadamente inclinada. Esta susceptibilidad a movimientos en masa se presenta

en mayor proporción en la unidad geomorfológica mesetas. Por las las pendiente entre 5° a 15° , tienen pocas condiciones para originar movimientos en masa, sin embargo pueden activarse en época de lluvias excepcionales (Izquierdo, 2021). En estas zonas se puede permitir el desarrollo de infraestructura siempre y cuando se incorporen las recomendaciones del estudio de diseño para hacer viable cualquier proyecto o adaptarse a las condiciones del terreno (Vilchez et al., 2020). Zonas que tienen pocas condiciones para originar movimientos en masa, salvo que puede ser afectada por movimientos en masa, ocurridos en zonas de susceptibilidad alta a muy alta cercanas a ellas, detonadas principalmente por lluvias excepcionales (Fidel et al., 2010).

Susceptibilidad media

Las áreas con una susceptibilidad media se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con el color amarillo, comprende una extensión de 439.41 km^2 y 31.69% del área de estudio (Figura 6 y Tabla 18). Son áreas relacionadas a la cumbre de los cerros, con poca tendencia a la ocurrencia de movimientos en masa y están asociados a pendientes moderadamente empinada. No existe la completa seguridad de que no ocurran movimientos en masa, pero pueden activarse o reactivarse por las lluvias excepcionales y ocurrencia de sismos (Izquierdo, 2021). Hacia los bordes de planicies disectadas se producen derrumbes, deslizamientos y procesos de erosión de ladera, que pueden afectar toda infraestructura que se encuentre cerca a estos bordes (Vilchez et al., 2020). Ocurren algunos movimientos en masa y no existe completa seguridad de que no ocurran. Estos pueden ser “detonados” por sismos y lluvias excepcionales (Fidel et al., 2010).

La susceptibilidad media a movimientos en masa, se presentan distribuidas en las cumbres de los cerros en ambas márgenes del río Vilcanota en la laderas altas y bajas, así como la parte baja de las montañas, presentándose en mayor proporción en la margen izquierda del río Vilcanota. En el modelo análisis de la susceptibilidad de los flujos de desechos a escala regional en la puna argentina, ha demostrado ser útil para la zonificación de riesgo de deslizamientos en áreas por

encima de los 4000 msnm donde el acceso es difícil por medios terrestres (Fernández, 2017).

Susceptibilidad alta

Las áreas con una susceptibilidad alta se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa con el color anaranjado y comprende la mayor extensión 538.75 km² y porcentaje de 38.85% de la zona de estudio (Figura 6 y Tabla 18). Estas zonas se presentan distribuidas en las cumbres de los cerros y en ambas márgenes de las quebradas, principalmente en las laderas bajas y partes altas de las montañas. Se localizan en ambas márgenes del río Vilcanota, pero con mayor proporción en su margen derecha. Cabe mencionar que las laderas bajas son inestables debido a la erosión en la margen izquierda del río Vilcanota y la presencia de la carretera del valle sagrado en la margen derecha. Estas áreas son zonas donde se presenta la pendiente empinada, rocas poco compactas o fracturadas, y sedimentos parcialmente saturados existe la posibilidad de que ocurran movimientos en masa (Izquierdo, 2021).

Se debe restringir el desarrollo de infraestructura urbana y de instalaciones o esta debe de ser muy bien planificada y contar con sus respectivos estudios de zonificación por peligros geológicos a escala local. En el caso de infraestructura vial, líneas de energía, actividad minera, etc., se deben de realizar estudios geotécnicos de detalle (Vilchez et al., 2020). También se debe considerar zonas donde han ocurrido movimientos en masa o existe la posibilidad de que ocurran (Fidel et al., 2010).

Susceptibilidad muy alta

Las áreas con susceptibilidad muy alta, se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa con el color rojo, comprende una pequeña extensión 116.24 km² y porcentaje de 8.38% del área de estudio (Figura 6 y Tabla 18). Estas áreas tienen pendiente muy empinada, rocas evaporíticas y metamórficas poco compactas o fracturadas, así como escasa vegetación. Esta susceptibilidad se presenta en las laderas bajas en ambas márgenes del río Vilcanota, y en zonas de pequeña extensión en las laderas de las quebradas.

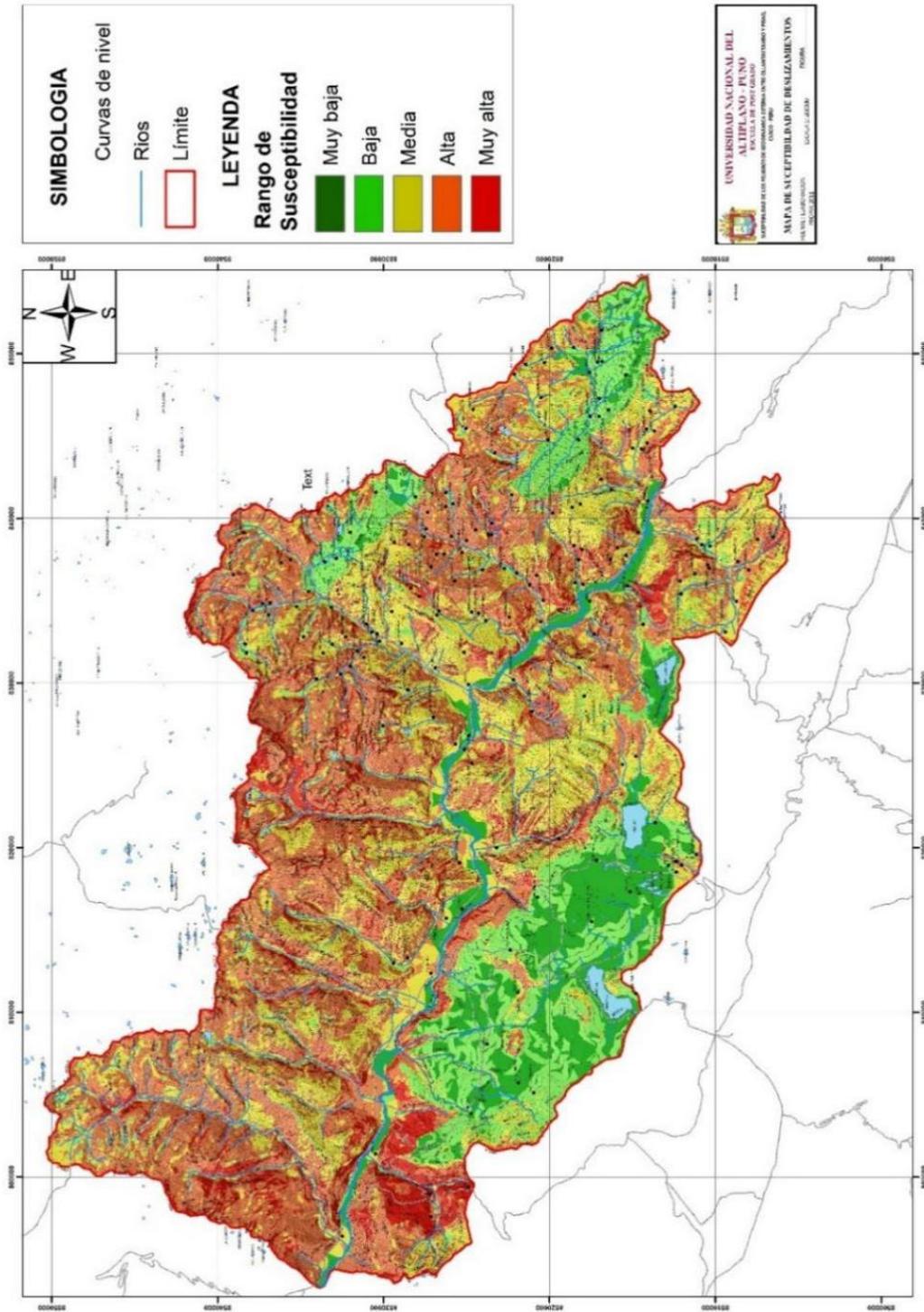


Figura 6. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

La susceptibilidad muy alta a movimientos a masa, con presencia de grandes deslizamientos recientes, se ubican, desde la quebrada Marcuyohuayjo hasta la quebrada Pachar y está relacionado a la presencia de afloramientos de yeso de la Formación Maras. Por las condiciones litológicas, estructural y pendiente existe la alta posibilidad que ocurran movimientos en masa con presencia de aguas subterráneas y superficiales en la época de lluvias anuales (Izquierdo, 2021). Se recomienda prohibir el desarrollo de toda infraestructura sin el conocimiento geológico detallado previo. Son necesarios los estudios geológicos-geotécnicos al detalle para el desarrollo y construcción de infraestructura de cualquier tipo (carreteras, puente, presas, hidroeléctricas) o habilitación urbana (Vilchez et al., 2020). En estos sectores existe alta posibilidad de que ocurran movimientos en masa (Fidel et al., 2010)

A partir de los datos presentados, el movimiento de masa es un fenómeno de origen geológico, geofísico y/o sísmico, donde una masa de terreno desciende sobre una pendiente, como procesos de erosión, transporte y acumulación de material que ocurren tanto en pendientes suaves como empinadas debido principalmente a fuerzas gravitatorias, a través de deslizamientos de tierra o solifluxión, dando como resultado la nivelación y la formación de paisajes (Brain & Rosser, 2022).

Un ejemplo es la Cordillera de los Andes Fueguinos, en la parte más austral de América del Sur, donde el paisaje se caracteriza por el deshielo relativamente joven, con valles longitudinales de laderas de fuerte buzamiento, sin tener datos sobre la estabilidad de las laderas rocosas al retroceso glaciar ni la contribución de los procesos gravitacionales en la evolución del paisaje de los Andes más australes (Bran et al., 2020).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), reporta periódicamente los procesos de remoción en masa o movimiento en masa que se generan en el territorio nacional, con grandes impactos, relacionados básicamente con las presencia de las intensidad de la precipitación, la cual se conjuga estratégicamente con las condiciones de vulnerabilidad física de la cuenca, las cuales están asociadas básicamente a sus características geológicas (pendiente del terreno, tipo de suelos, zonas deforestadas y degradadas), para dar origen a los

diferentes tipos de flujo de lodos y materiales por las laderas de la cuenca, generando a su paso grandes impactos adversos a las infraestructura civil y a la población, a causa de los fenómenos relacionados a los deslizamientos, huaycos, inundaciones y lluvia intensas (Ordoñez, 2019).

La Cordillera Blanca es una de las zonas con mayor actividad de movimientos de masa y uno de los peligros geológicos que pone en gran riesgo a la población de la región Áncash, donde los movimientos en masa pueden activarse por sismos o intensas lluvias, con deslizamientos, erosiones superficiales, cárcavas, caídas, avalanchas de rocas, flujos de detritos y movimientos complejos; habiéndose inventariado 1,631 movimientos en masa, de los cuales el 38.6% corresponde a erosiones superficiales tipo cárcavas, el 30,5% son caída de detritos (partículas de masa sólida) y depósitos de talud, 19.3% flujos de detritos (principalmente aluviones por desprendimiento de hielo, rocas o ruptura de un dique glaciario), 7.3% caída de rocas y detritos, y el 4.5% deslizamientos (Valderrama et al., 2016).

4.2.2. Susceptibilidad por inundación del río Vilcanota

La metodología utilizada para la generación de los mapas de susceptibilidad a inundación tiene similitud con la generación de los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa.

El mapa de susceptibilidad a inundación del río Vilcanota se presenta en 5 rangos de susceptibilidad que son: muy baja, baja, media, alta y muy alta (Figura 7 y Tabla 19). En la Figura 7 en el mapa susceptibilidad a inundación se observa en el cauce la susceptibilidad muy alta y hacia los alrededores en los abanicos aluviales la susceptibilidad es alta. Cabe mencionar que por lo abanicos aluviales circulan pequeños ríos que aumenta el caudal del río Vilcanota y además afectan las planicies de los abanicos generalmente en la época de lluvias anuales o precipitaciones extraordinarias. En la Tabla 19 se verifica que la susceptibilidad a inundación muy alta corresponde al río Vilcanota y la susceptibilidad alta corresponde a los abanicos aluviales.

Tabla 19

Área de zonificación de susceptibilidad a inundación del río Vilcanota

Susceptibilidad	Área, km ²	Área, %
Muy Baja	880.93	63.53
Baja	129.76	9.36
Media	102.66	7.40
Alta	240.45	17.34
Muy Alta	32.80	2.37
Total general	1386.60	100.00

Susceptibilidad muy baja

Las áreas con susceptibilidad muy baja son representadas en el mapa de susceptibilidad a inundaciones con el color verde oscuro, que comprende una gran extensión de 880.93 km² que corresponde al 63.53% de la zona de estudio (Figura 7 y Tabla 19). Los terrenos en esta zona son lugares que presentan pendientes fuertes y relacionadas a las montañas principalmente. Estas áreas con pendiente muy empinada, presentan muy poca influencia en la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota. Esta zona corresponde principalmente a las vertientes de laderas de pendientes muy inclinadas y convexas de montañas y colinas; también en zonas de montaña con cobertura glaciaria (Vilchez et al., 2020).

Susceptibilidad baja

Las áreas con susceptibilidad baja se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a inundaciones con el color verde claro, comprende una extensión de 129.76 km² y 9.36 % de la zona de estudio (Figura 7 y Tabla 19). Los terrenos en esta zona, son de pendiente empinada, relacionadas a las laderas altas y montañas. Estas áreas presentan poca influencia en la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota. Estos terrenos bajos adyacentes a la llanura de inundación, terrazas, valles fluviales y ríos secundarios, con vertientes de suave inclinación donde la topografía configura terrenos cóncavos, pueden acumular agua. Por ser terrenos levemente inclinados y mal drenados son inundados en periodos de lluvia excepcional (Vilchez et al., 2020).

Susceptibilidad media

Las áreas con susceptibilidad media se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a inundaciones con el color amarillo, comprende una extensión de 102.66 km² y 7.40% de la zona de estudio (Figura 7 y Tabla 19). Los terrenos en esta zona, son moderadamente empinada, principalmente se puede observar en las laderas bajas y altas principalmente. Estas áreas presentan influencia en la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota. También se encuentran comprometidos terrenos planos, ligeramente ondulados, con drenaje deficiente o por estar constituidos por materiales de poca permeabilidad, que favorecen la acumulación de la precipitación pluvial y originan anegamientos; también se tiene terrenos con esas condiciones, en las ondulaciones formadas por lomadas y colinas de baja altura. Otros sectores considerados como inundables son las zonas de baja pendiente constituidos por materiales arcillosos, que se saturan con precipitaciones pluviales y forman anegamientos muy locales, de reducida extensión (Vilchez et al., 2020).

Susceptibilidad alta

Las áreas con susceptibilidad alta se encuentran representadas en el mapa de susceptibilidad a inundaciones con el color anaranjado, comprende una extensión de 240.45 km² y 17.34 % de la zona de estudio (Figura 7 y Tabla 19).

La superficie en esta zona es moderadamente inclinada, principalmente se puede observar en los abanicos aluviales donde se encuentra emplazado varios poblados muy importantes, así como terrenos de cultivo del Valle Sagrado de los Incas, donde se pueden generar algunos desbordes de los ríos en la temporada de lluvias anuales o lluvias excepcionales principalmente como el ocurrido el año 2010 en los poblados de Calca, Urubamba, Písaq y Ollantaytambo. Otras zonas propensas a inundaciones se encuentran también a lo largo de zonas, donde el drenaje es deficiente. Se incluyen zonas urbanas y asentamientos urbanos ubicados dentro de las áreas de inundación normal a excepcional, terrenos de cultivo y vías de comunicación (Vilchez et al., 2020).

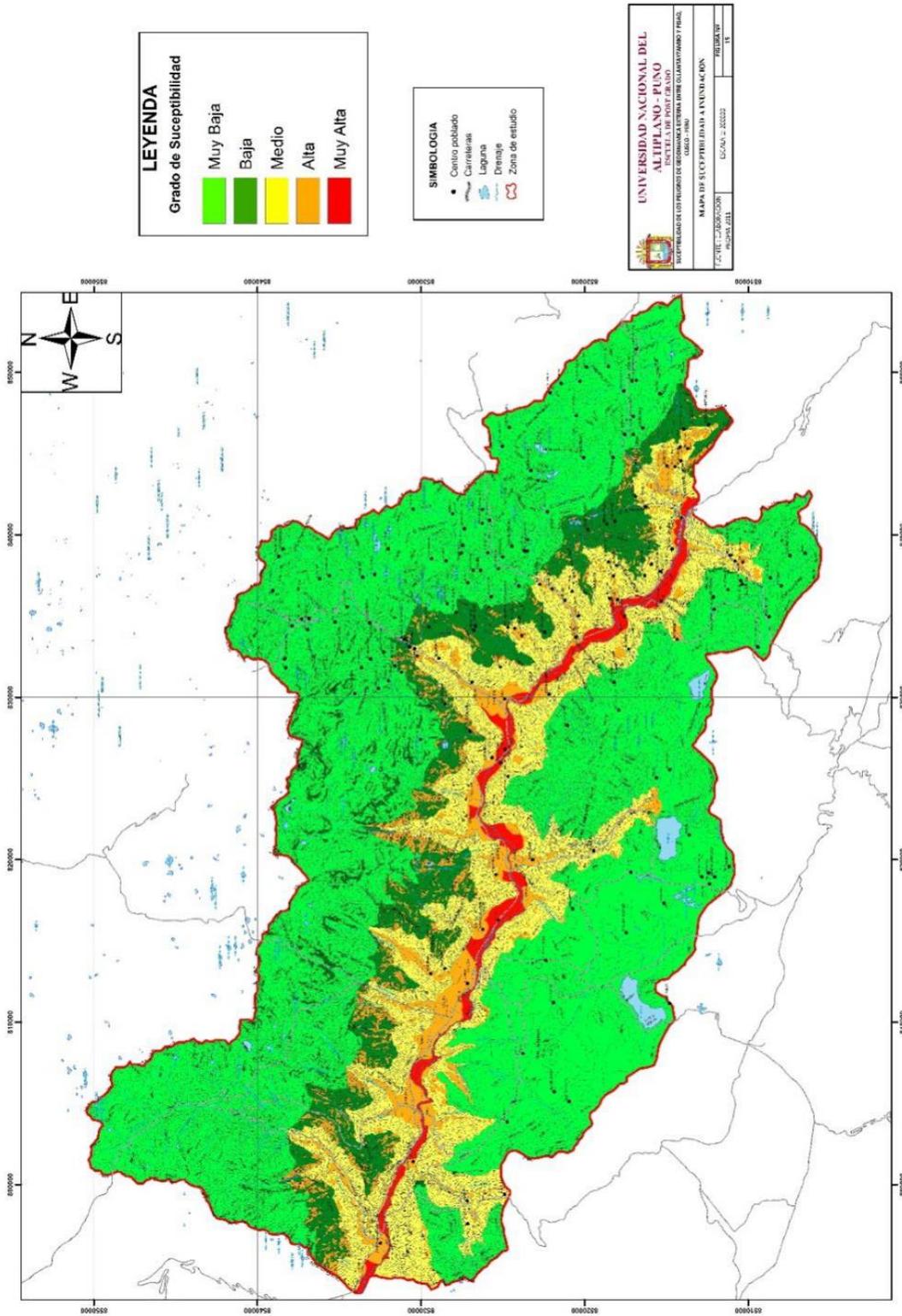


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a inundación

Susceptibilidad muy alta

Las áreas con susceptibilidad muy alta, se encuentran representados en el mapa de susceptibilidad a inundaciones con el color rojo, comprende una pequeña extensión de 32.80 km² y 2.37% de la zona de estudio (Figura 7 y Tabla 19). Los terrenos en esta zona presentan una pendiente ligeramente inclinada y corresponden a terrazas fluviales; estas áreas se encuentran ampliamente distribuidas en el piso de valle del río Vilcanota, donde se emplazan algunas o parte de poblados y terrenos de cultivo como en Písaq, Calca, Lamay. En estas áreas se presentan además procesos de erosión fluvial y de riberas (Vílchez et al., 2007). Se tiene zonas muy propensas a inundación a lo largo de todo el valle, que afecta las llanuras inundables, terrazas bajas y medias; así como también a lo largo de bofedales cercanos al río, por el levantamiento del nivel freático (Vílchez et al., 2020).

La inundación es el desastre más peligroso por el desbordamiento de un río, dada por la dirección de su flujo, las condiciones topográficas de la región, conformadas por cuencas, llanuras con pendientes (0-8%), las condiciones topográficas en forma de llanuras y cuencas hacen que un área sea propensa a inundaciones cuando el agua del río se desborda (Irawan et al., 2022). Las principales causas de las crecidas de los ríos pueden ser las lluvias fuertes, largos periodos de lluvia, deshielo, pendientes pronunciadas, roca impermeable (no permite el paso del agua), suelos muy húmedos y saturados y suelos compactados o secos (Tariq et al., 2022).

4.3. Niveles de peligro de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las poblaciones

Los peligros de geodinámica externa, que afectan en la seguridad física de las poblaciones ubicadas entre Ollantaytambo y Písaq, se muestran en los mapas de peligro de geodinámica externa por inundación, por aluvión y por deslizamiento. Estos mapas fueron desarrollados mediante el software ArcGIS y se determinó las superficies de los peligros de geodinámica externa. En la Tabla 20 se observa que el mayor área de peligro son los deslizamientos que abarca 124.81 km², representando el 9% de la zona de estudio, luego siguen los aluviones con 55.71

km² que representa el 4.02%, y la inundación con 26.18 km² que representa el 1.89%.

Tabla 20

Área de los peligros de geodinámica externa del área de estudio

Peligro	Área, km²	Área, %
Aluvión	55.71	4.02
Deslizamiento	124.81	9.00
Inundación del río Vilcanota	26.18	1.89
Total	206.70	14.91

4.3.1. Mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota

El río Vilcanota es el colector principal de las aguas del Valle del Vilcanota, que en época de lluvias transporta una gran cantidad de aguas de precipitación y sedimentos finos. El río Vilcanota muestra que es muy activo, por los sedimentos que erosiona, transporta y deposita. Existe defensa ribereña reciente en las localidades de Písaq, Calca, Urubamba. En algunos lugares se han ganado terrenos al cauce natural inundable en periodos de lluvias anuales y en periodos extraordinarios entre 10 y 100 años (SIAR, 2014). A pesar de las pequeñas obras de defensa ribereña, el río trata de recuperar su cauce natural produciendo las inundaciones (GRC, 2011). Los datos del mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota se muestran en la Tabla 21 y Figura 8.

En la Tabla 21 de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota muestra una superficie de 26.18 km² que representa el 1.89 % de la zona de estudio. Los niveles de peligro por inundación del río Vilcanota contiene rangos de peligro muy alto, alto, medio y bajo. El peligro aumenta en la temporada de lluvias y que se incrementa mucho más con las precipitaciones excepcionales como el ocurrido el año 2010 que afectaron viviendas y terrenos de cultivo, principalmente en el sector de Matara (Písaq); en el sector de Los Descalzos (Calca); en Yucay y Pacramayo (Urubamba) (SIAR, 2014); y en los sectores de Wayronqoyoc, Silque, Primavera y Phiri (Ollantaytambo).

En la Figura 8 se muestra el mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota, con zonas con peligro muy alto en los bordes del cauce del río Vilcanota y según la topografía y los niveles de terrazas fluviales se cartografía el peligro alto, medio y bajo; la escala que se muestra en el mapa no se distingue muy bien los niveles de peligro. En la Tabla 21 se muestran las áreas de los niveles de peligro, observándose que el peligro alto de 8.14 km² puede incrementarse a peligro muy alto con las precipitaciones anuales altas, lo que indica la alta peligrosidad por inundación del río Vilcanota.

Tabla 21

Niveles de peligro por inundación del río Vilcanota

Peligro	Área, km ²	Porcentaje, %
Bajo	2.69	0.19
Medio	8.05	0.58
Alto	8.14	0.59
Muy Alto	7.30	0.53
Total	26.18	1.89

Peligro muy alto

Están representados en el mapa de peligros por inundación del río Vilcanota con el color rojo, comprende un área de 7.30 km² que corresponde a 0.53% del área de estudio (Figura 8 y Tabla 21). Corresponde a las zonas que son afectadas o pueden ser afectadas por las lluvias muy fuertes que se producen anualmente o con un periodo de recurrencia de 10 años. Dentro de estas zonas tenemos los bordes del río con viviendas construidas (Carlotto et al., 2010) y terrenos de cultivo que no cuentan con obras de encauzamiento, o es parcial como en Pisaq, Calca y Urubamba que se protegen con sacos de material de río, que son erosionadas con el aumento de caudal del río Vilcanota.

Peligro alto

Estas áreas se reconocen en el mapa de peligros por inundación del río Vilcanota con el color anaranjado, tiene un área de 8.14 km² que corresponde a 0.59% del área de estudio (Figura 8 y Tabla 21).

Corresponde a las zonas que pueden ser inundadas en periodos de lluvias extraordinarias que se producen entre 10 y 100 años, con destrucción de los muros de encauzamiento que en muchos casos no consideran estos aspectos o en otros casos las aguas rebozan las áreas de peligro muy alto. Por el periodo de recurrencia de 100 años (SIAR, 2014), los pobladores muchas veces desconocen el retorno de las inundaciones a largo tiempo. Las principales áreas vulnerables a este peligro se presentan en las localidades de Písaq, Calca, Yucay, Urubamba y Ollantaytambo.

En el poblado de Písaq, un tramo de unos 4.5 km del valle del río Vilcanota está afectado por procesos erosivos e inundación por lluvias excepcionales en la zona. Aguas abajo del poblado de Písaq el valle del río es amplio con un ancho máximo de 300 m. A la altura del poblado de Písaq el río es encauzado hasta un ancho de 50 m. Hay pérdida de terrenos de cultivo aguas abajo del poblado de Písaq. El 2010 por erosión se destruyó el puente que permite el paso vehicular Písaq-Urubamba y que además, en ambas márgenes fueron afectadas las obras de encauzamiento. Se recomienda el reforzado, mejoramiento y ampliación de obras de encauzamiento del río Vilcanota (Vilchez et al., 2020).

Peligro medio

Las áreas con peligro medio están representadas en el mapa de peligros por inundación del río Vilcanota con el color amarillo, comprende el área de 8.05 km² que corresponde a 0.58% del área de estudio (Figura 8 y Tabla 21).

Estas áreas de peligro están relativamente alejadas y un poco más altas del cauce inundable, pero que pueden ser inundadas en presencia de lluvias extraordinarias con periodos de recurrencia mayores a 100 años, o debido a la activación de aluviones que se producen en la parte alta de la quebrada (SIAR, 2014). Estas

posibilidades de peligro medio son muy bajas, pero no deben ser ignoradas, por los antecedentes geodinámicos en la zona.

Peligro bajo

Las áreas con peligro bajo se observan en el mapa de peligros por inundación del río Vilcanota con el color verde oscuro, comprende un área de 2.69 km² que corresponde a 0.19% del área de estudio (Figura 8 y Tabla 21). Corresponde a sitios relativamente alejadas y sin antecedentes de inundaciones recientes, sin embargo los pobladores /no deben ignorar el peligro bajo debido a que los aluviones pueden producirse por precipitaciones excepcionales.

4.3.2. Mapa de niveles de peligro por aluvión

Recientemente ocurrieron aluviones el año 2010, que afectaron la ciudad de Urubamba, el poblado de Taray y Zurite, con destrucción de viviendas, terrenos de cultivo y con pérdidas de vidas humanas. Aluviones de menores dimensiones se produjeron en Písaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo con afectación de terrenos de cultivo. Los datos de los mapas de niveles de peligro por aluvión se muestran en la Tabla 22 y Figura 9.

En la Tabla 22 se muestran los niveles de peligro por aluvión, que ocupan un área de 55.71 km² que representan el 4.02 % del área de estudio, además se muestran las áreas de los niveles de peligro, siendo la mayor área de peligro medio-bajo con 42.84 km² que representa el 3.09% del área de estudio, los peligros alto y muy alto tienen áreas menores, sin embargo con precipitaciones pluviales extraordinarias puede aumentar el peligro a muy alto. Los poblados de Písaq, Calca, Urubamba, y Ollantaytambo tienen un origen aluvional por sus antecedentes geológicos e históricos como los ocurridos por ejemplo los años 1942 y 2010, que nos indica la actividad recurrente de aluviones que ocurrieron en Urubamba, con destrucción de obras de ingeniería, viviendas, con pérdida de vidas humanas, destrucción de terrenos de cultivo, pérdida de cosechas, relleno de canalización inca con material aluvial.

Otro evento similar de flujo de lodo ocurrió en Villa Santa Lucía en el norte de la Patagonia Argentina, en este estudio se evaluaron los mecanismos que



posibilitaron un deslizamiento de $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ para evolucionar a la catastrófica avalancha de lodo que destruyó Villa Santa Lucía en la Patagonia chilena, con un saldo de 22 muertos. El deslizamiento, que pudo haber sido provocado por condiciones hidrometeorológicas y la desestabilización de la pared alrededor del glaciar en retroceso en la Cordillera Yelcho, provocó la generación de un flujo de lodo en la cabecera del río Burritos que recorrió alrededor de 10 km y afectó el 50 % del casco urbano de Villa Santa Lucía el 16 de diciembre de 2017.

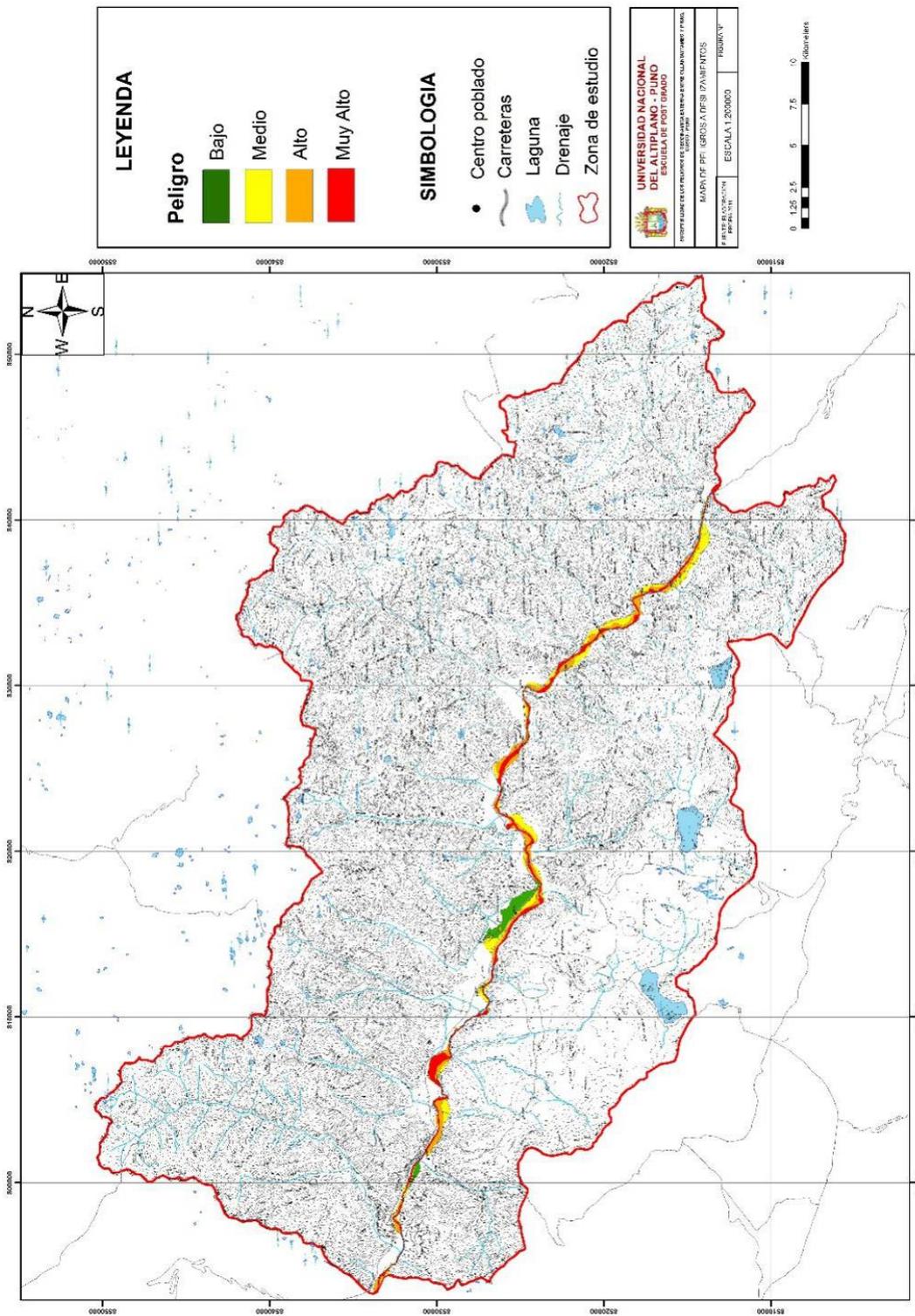


Figura 8. Mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota

Las primeras observaciones indicaron que el evento fue posible por la presencia de un lago glaciar. Sin embargo, los resultados de campo no permiten sustentar esta hipótesis en el área. Por lo tanto, el estudio buscó comprender las condiciones que posibilitaron el evento (Somos-Valenzuela et al., 2020).

En la Figura 9 se muestra el cartografiado de los abanicos aluviales, con mayor presencia en la margen derecha del río Vilcanota y que corresponden a los poblados de Písaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo, además se distingue en cada abanico los niveles de peligro muy alto, alto, medio-bajo.

Tabla 22

Área de niveles de peligro por aluvión

Peligro	Área, km²	Área, %
Medio-bajo	42.84	3.09
Alto	10.20	0.74
Muy alto	2.67	0.19
Total general	55.71	4.02

Peligro muy alto

Las áreas con peligro muy alto se reconocen en el mapa de peligros por aluvión con el color rojo, comprende un área de 2.67 km² que corresponde a 0.19% del área de estudio (Figura 9 y Tabla 22). Estas áreas pueden ser inundadas en periodos de lluvias extraordinarias que se producen mayor a 50 años (Carlotto et al., 2010), por lo que a veces los pobladores desconocen la recurrencia del fenómeno. Por el periodo de recurrencia muy largo, solo algunos pobladores tienen conocimiento de los antecedentes geológicos e históricos. Se trata de áreas con reactivación de deslizamientos, ocurrencia de aluviones con represamiento y desembalse asociados. Las áreas con peligro muy alto se encuentran en las quebradas Pachar, Huarán, Chaupihuayco, Quesermayo, Huichoc, Jochoc, Lamay, Chicón y Patacancha.

El aluvión de Taray, se inicia en la quebrada del río Quesermayo con un ancho de cauce de 11 m, forma un abanico aluvial en su confluencia al río Vilcanota por la margen izquierda, en cuyo depósito se asienta la población de Taray. Deslizamiento activo aguas arriba en el sector de Huancalle, puede represar el río Quesermayo. Represamiento del cauce del río Quesermayo y posterior desembalse puede generar flujo de detritos que afectaría la localidad de Taray. Caudales importantes que discurran por el río Quesermayo pueden generar desbordes que afectarían el poblado de Taray. Se recomienda la limpieza, profundización y encauzamiento del río Quesermayo, con muros de gaviones y diques transversales que retengan la fracción sólida de flujos de detritos que puedan bajar por el río. Monitorear e implementar un sistema de alerta temprana para flujos (Vilchez et al., 2020).

El aluvión de Ollantaytambo o Patacancha, está conformado por movimientos complejos antiguos que represaron la quebrada Ocororuyoc y Patacancha. Los derrumbes activos que afectan la carretera, compromete el substrato rocoso y conos de talus. Los derrumbes y deslizamientos del valle del río Patacancha originaron flujos de detritos o aluviones que se acumularon en el valle de represamiento. La erosión fluvial afecta ambas márgenes del río Patacancha. Movimiento complejo antiguoreactivado en el sector de Huiloc, producen asentamientos en la carretera. Deslizamientos y derrumbes activos afectan la carretera. Los huaycos afectaron terrenos de cultivo, pastizales y campo deportivo. Erosión fluvial afectó la carretera y puede afectar además la línea de transmisión eléctrica que pasa por el valle del río Patacancha. Flujos de detritos o aluviones destruyeron viviendas y terrenos de cultivo en los sectores de Huiloc y Ccolccaraccay; también afectaron restos arqueológicos de Marcacocha. Se recomienda el perfilado de talud superior de carretera, banquetado de taludes, drenaje de aguas subterráneas que afloran como manantiales, colocado de muros de mampostería o gaviones para estabilizar taludes, colocado de diques de gaviones en zonas afectadas por erosión fluvial, limpieza y descolmatado del río Patacancha (Vilchez et al., 2020).



Los aluviones o flujo de detritos excepcional de la quebrada Chicón pueden afectar el poblado de Urubamba, que circula por un cauce encausado con muros de piedra actual de 2 m. Último evento se produjo el 18 de octubre del 2010, con calles cubiertas con lodo y rocas, por erosión de las márgenes de la quebrada Chicón aguas arriba. Un evento de gran magnitud puede comprometer la seguridad física de la localidad de Urubamba.

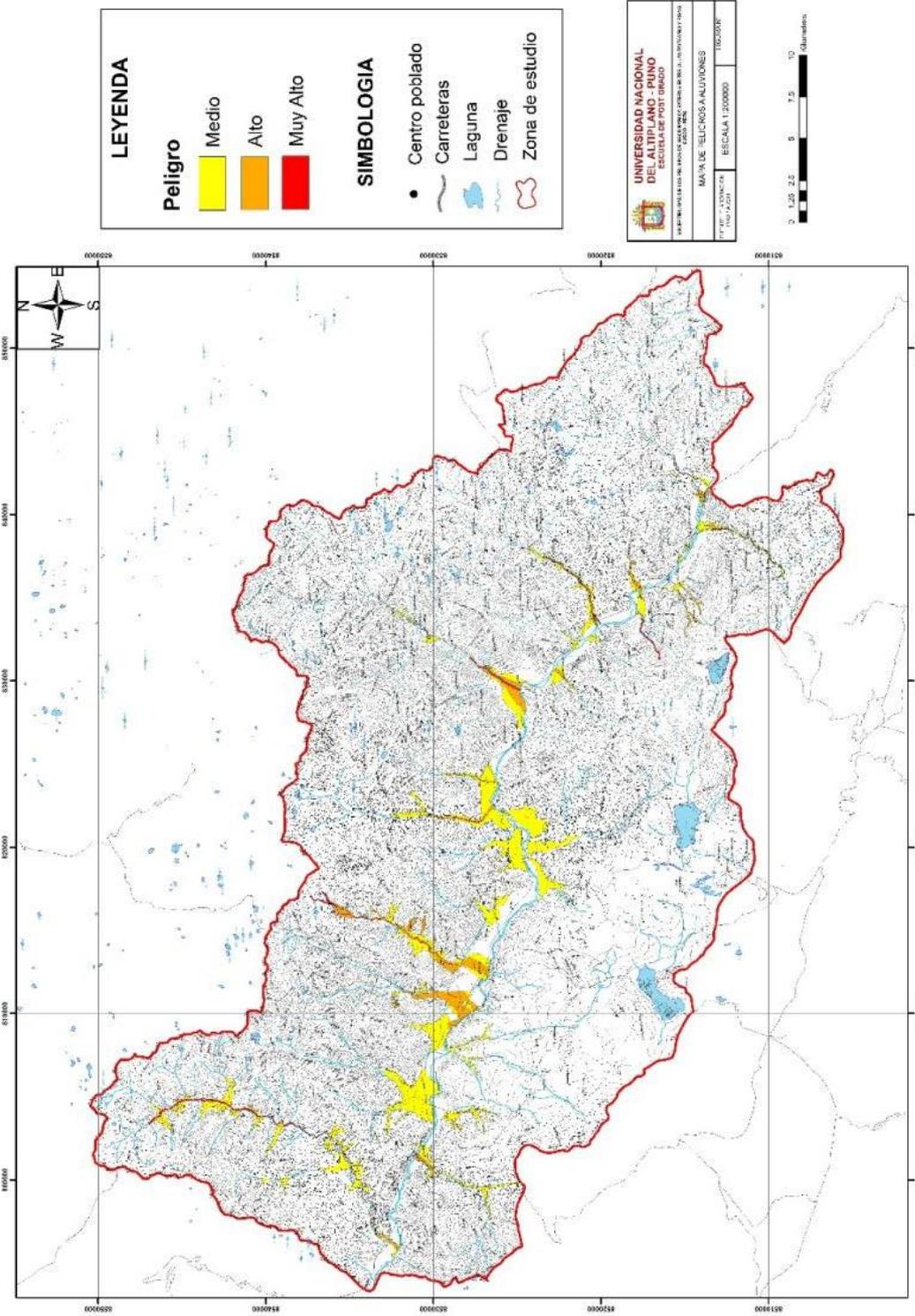


Figura 9. Mapa de niveles de peligro por aluvión

Se recomienda la limpieza y descolmatado de cauce, colocado de muros transversales al cauce de la quebrada Chicón, implementación de un sistema de alerta temprana de desastres en toda la cuenca, la cual debe constar de estaciones pluviométricas, sensores de alarma colocados en el cauce, etc. (Vilchez et al., 2020).

Peligro alto

Las áreas con peligro alto se reconocen en el mapa de niveles de peligro por aluvión con el color anaranjado, comprende un área de 10.2 km² que corresponde a 0.74% del área de estudio (Figura 9 y Tabla 22). Comprende áreas que pueden ser inundadas en periodos de lluvias extraordinarias que se producen entre 20 y 50 años (SIAR, 2014), con destrucción, relleno o rebose de las obras de encauzamiento. Por el periodo de recurrencia largo, la población no considera el retorno del peligro a largo tiempo. Se trata de áreas, en el caso de la reactivación de un gran deslizamiento, las poblaciones cercanas a estos serán afectadas de manera severa por efecto de los aluviones, con represamientos-desembalses asociados (SIAR, 2014). Las áreas con este peligro se presentan en las quebradas y conos aluviales de los poblados de Písaq, Taray (Figura 19), Paullo Chico, Coya, Lamay, Cocha Huerta, Calca, Huarán, quebradas Chicón y Pumahuanca en Urubamba), Pachar y Ollantaytambo.

Peligro medio

Las áreas con peligro medio se reconocen en el mapa de peligros por aluvión con el color amarillo, comprende un área de 42.84 km² que corresponde a 3.09 % del área de estudio (Figura 9 y Tabla 22). Comprende las áreas que pueden ser inundadas por aluviones con ocurrencias de lluvias extraordinarias entre 50 y 100 años. Los aluviones pueden destruir y colmatar las obras de encauzamiento o superan los límites del peligro alto con rebalses (SIAR, 2014). Por el periodo de recurrencia muy largo, la población no considera el tiempo de retorno de este peligro (SIAR, 2014). El peligro medio se presenta en las quebradas y conos aluviales de Chaupihuayco, Písaq andenes, Lloquepunco, Capco, Coya, Lamay, Chuquibambilla, Sillacasa, Calca, Paracaypata, Chojo, Cono aluvial, Arín, Huarán,

Huayocán, Yucay, Yarjapata, Chicón, Pumahuanca, Huascaray, Yanahuara, Ollantaytambo, Unura, Taray, Saclo, Urquillos, Huayllabamba, y Pachar.

Peligro bajo

Corresponde a pequeñas áreas que pueden ser inundadas por aluviones que se producen en periodos de lluvias extraordinarias con recurrencia mayor a los 100 años (SIAR, 2014).

4.3.3. Mapa de niveles de peligro por deslizamiento

En el mapa de niveles de peligro por deslizamiento (Figura 10) se observa el cartografiado de los deslizamientos ubicados en las laderas del Valle del Vilcanota y laderas de las quebradas transversales, distinguiéndose los niveles de peligro bajo, medio alto. En la Tabla 23 se observa que los peligros por deslizamiento, abarcan 124.81 km² que representa el 9.00 % del área de estudio, además el nivel medio de peligro tiene un valor alto de 19.10 km² que puede incrementarse a nivel de peligro alto por la reactivación de deslizamientos antiguos o sin medidas de prevención o mitigación.

Los lugares con mayores problemas de geodinámica se encuentran en Písac, en la quebrada Chaupihuayco con la presencia del deslizamiento de Cuyo Chico, que se desliza muy lentamente especialmente en la época de lluvias, aquí el peligro es que el río Chongo pueda ser represada y el desborde originar un aluvión y afectar a Písac y alrededores. Otro deslizamiento se ubica en Calca, en la quebrada Ccochoc con la presencia del deslizamiento de Accha Baja, que es de grandes dimensiones. Este deslizamiento al activarse puede represar el río Ccochoc y formar aluviones, afectando la ciudad de Calca y alrededores. En la margen izquierda del río Vilcanota en Urubamba, se ubican grandes escarpas de deslizamientos en las laderas de los cerros Jaboncilluyoc y Yahuarmaqui con el peligro de represar el río Vilcanota o dañar las viviendas y la carretera Cusco-Urubamba (SIAR, 2014).

También ocurren movimientos en masa en la región cafetera de la subcuenca del río San Francisco en Colombia, se han incrementado, siendo los recientes periodos invernales los de mayor afectación en todos los sectores

productivos. Esta sucesión de eventos ha causado en los sectores de vivienda, infraestructura de transporte y agricultura las mayores pérdidas, debidas principalmente a la ocurrencia de movimientos en masa en las zonas de ladera (Quiroz, 2019).

Peligro alto

Las áreas con peligro alto se reconocen en el mapa de peligros por deslizamiento con el color anaranjado, comprende un área de 13.02 km² que corresponde a 0.94 % del área de estudio (Figura 10 y Tabla 23).

Tabla 23

Área del nivel de peligro por deslizamiento

Peligro	Área, km²	Área, %
Alto	13.02	0.94
Medio	19.10	1.38
Bajo	92.69	6.68
Total general	124.81	9.00

Los deslizamientos activos lentos o rápidos que presentan reactivación por la presencia de grietas y fallas de desplazamiento, corresponden al nivel de peligro alto por deslizamiento. Las áreas con peligro alto por deslizamiento se observan en de Cuyo Chico (Pisac), Lamay, Accha Baja (Calca), Yahuarmaqui y Jaboncilluyoc (Urubamba). Los deslizamientos de tierra son fenómenos naturales que pueden causar grandes pérdidas de vidas y daños a la propiedad.

El deslizamiento de Pisac o Cuyo Chico, es un evento muy lento y progresivo, que desvió hacia su margen izquierdo el curso de la quebrada Chongo, así como también produjo el cierre parcial del cauce de la quebrada. Está conformado por rocas de areniscas, cuarcitas, limolitas, pizarras y lutitas de la Formación Ccatca. Este deslizamiento-flujo presenta muchas reactivaciones, las cuales comprometen

la seguridad física de terrenos de cultivos, poblados, carreteras, etc. Se recomienda colocar drenes horizontales, que intercepten el agua infiltrada en el talud o cuerpo del deslizamiento, logrando de esta forma el abatimiento del nivel freático dentro de la masa fallada y, por lo tanto, se incrementa su resistencia al corte. La salida de los drenes debe ser hacia una canaleta revestida con concreto simple y conducida hacia un canal de drenaje principal (quebrada, río), para evitar procesos de erosión de suelos (Vilchez et al., 2020).

El Deslizamiento de Calca o Accha Baja ubicado en el valle del río Ccochoc corta rocas del Grupo Mitu, Formación Paucartambo y Formación Zapla; rocas consideradas de mala calidad, donde se trazó la carretera Calca-Yanatile. En el año 1950 se produjo aluvión que afectó al poblado de Calca. En esta cuenca se han producido huaycos, derrumbes y deslizamientos que afectaron viviendas, carretera, terrenos de cultivo y central hidroeléctrica; así también se produjeron represamientos del río Ccochoc. Los taludes de la carretera se presentan inestables por la ampliación de carretera (Vilchez et al., 2020).

El deslizamiento de Urubamba o Yawarmaqui está conformado por derrumbes, deslizamiento rotacional, erosión en cárcavas, que a veces afectan la carretera de acceso a Urubamba, que tienen 5 desarrollos con derrumbes del talud conformado por rocas de areniscas y yesos, que producen asentamiento de la plataforma de carretera en temporada de lluvias. Es un conjunto de deslizamientos que pueden represar el río Urubamba frente a la localidad de Urubamba. Se recomienda el monitoreo del deslizamiento, limpieza del material caído de la carretera y cunetas, remoción de bloques inestables caídos en la carretera (Vilchez et al., 2020).

Un mapa de susceptibilidad a deslizamientos es una herramienta útil para ayudar con la gestión de la tierra en áreas propensas a deslizamientos (Huang & Zhao, 2018).

Peligro medio

Las áreas con peligro medio se reconocen en el mapa de peligros por deslizamiento con el color amarillo, comprende un área de 19.10 km² que corresponde a 1.38 % del área de estudio (Figura 10 y Tabla 23). Los deslizamientos que no muestran

signos de reactivación, pero en un futuro cercano puede reactivarse por cortes de talud (SIAR, 2014), deforestación, erosión de ríos corresponden al peligro medio por deslizamiento. Este nivel de peligro se observan en Coya, Lamay, Accha Baja, ladera de la margen izquierda del río Vilcanota entre Huayllabamba y Pachar (SIAR, 2014), y en la ladera derecha de Ollantaytambo.

Peligro bajo

Las áreas con peligro bajo se reconocen en el mapa de peligros por deslizamiento con el color verde oscuro, comprende un área de 92.69 km² que corresponde a 6.68 % del área de estudio (Figura 10 y Tabla 23). Los deslizamientos antiguos aparentemente estables y cubiertos por vegetación presentan el nivel de peligro bajo, pero que puede subir a un nivel mayor cuando estos deslizamientos por alguna actividad geodinámica externa o interna natural, o antrópica pueden activarse nuevamente. Los deslizamientos de peligro bajo se observan en ambas márgenes del río Vilcanota, y localmente se observan en las quebradas Quesermayo (Taray), Chaupihuayco (Pisac), Ccochoc (Calca), Huarán, Huarocondo (Pachar) y Patacancha (Ollantaytambo).

Tramo de unos 18 km trazados en el valle estrecho del río Huarocondo, se observan vertientes afectadas por derrumbes activos que a veces obstruyen la carretera, los deslizamiento antiguos se presentan en mayor proporción que los activos, además se observan procesos de erosión fluvial en ambas márgenes del río que generan pequeños aluviones o flujos de detritos. Se recomienda el perfilado de taludes. limpieza y remoción de bloques colgados en el talud de la carretera y encauzamiento del río con gaviones (Vilchez et al., 2020). Cabe destacar que los fenómenos de geodinámica que afectan esta quebrada con precipitaciones excepcionales, el peligro puede incrementarse a medio y alto.

En la Figura 11 se muestra la superposición del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, con el mapa de niveles de peligro por deslizamiento y aluviones, y en la Figura 12 se muestra la superposición del mapa de susceptibilidad a inundación con el mapa de nivel de peligro por inundación.

Estas superposiciones se realizaron con el fin de ver las coincidencias en movimientos en masa e inundación y principalmente para la validación de los mapas. Hecho el análisis se observa la coincidencia parcial de la susceptibilidad por movimientos en masa e inundación, con los niveles de peligros por deslizamiento, aluvión e inundación. Se evaluó con datos de campo de control de un inventario de deslizamientos de tierra del área y mostró una buena concordancia entre las zonas de alta susceptibilidad a movimientos en masa y las ubicaciones de deslizamientos de tierra observadas en el campo (Fernández, 2017).

También para la validación de los mapas de susceptibilidad de movimientos en masa e inundación se han realizado la comparación de los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa e inundación obtenidos en esta tesis, con los mapas de susceptibilidad de movimientos en masa y susceptibilidad a inundación del Perú (Geocatmin, 2022), para los abanicos aluviales de Písaq, Calca, Urubamba y Ollantaytambo, sin embargo, se puede hacer las comparaciones para otros lugares de interés.

El abanico aluvial de Písaq en el presente estudio presenta una susceptibilidad a movimientos en masa de baja a media, la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es muy alta a alta. En el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del Perú a escala 1:1'000,000 (Geocatmin, 2022) muestra una susceptibilidad a movimientos en masa baja a media, y susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es media a alta. Haciendo las comparaciones la susceptibilidad de movimientos en masa coincide totalmente, mientras que la susceptibilidad a inundación coincide parcialmente.

El abanico aluvial de Calca en el presente estudio presenta una susceptibilidad a movimientos en masa de media a baja, la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es media a alta. En el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del Perú a escala 1:1000000 (Geocatmin, 2022) muestra una susceptibilidad a movimientos en masa baja a media, y susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es media a alta. Haciendo las comparaciones de susceptibilidad de movimientos en masa e inundación coinciden totalmente, con mayor detalle en el presente trabajo.

El abanico aluvial de Urubamba en el presente estudio presenta una susceptibilidad a movimientos en masa de media a alta, la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es alta. En el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del Perú a escala 1:1'000,000 (Geocatmin, 2022) muestra una susceptibilidad a movimientos en masa media a baja, y susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es alta. Haciendo las comparaciones de susceptibilidad, coinciden parcialmente en movimiento en masa y coinciden totalmente en inundación.

En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas en México se han presentado históricamente procesos de remoción en masa en la zona sur del valle, específicamente en los depósitos de talud cuya génesis se determina a partir de la mesa kárstica de Copoya, geofoma sometida a intenso fracturamiento, procesos de disolución y erosivos, que dan como resultado el desprendimiento de grandes bloques. Estos se distribuyen en las márgenes de la mesa, siendo alterados y destruidos por intemperismo, del cual se generan partículas de menor tamaño que reposan sobre limolitas, lutitas y areniscas. Esta condición determina que las laderas sean inestables por naturaleza (Tenorio et al., 2017).

El abanico aluvial de Ollantaytambo en el presente estudio presenta una susceptibilidad a movimientos en masa de media a alta, la susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es alta a muy alta. En el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa del Perú a escala 1:1'000,000 (Geocatmin, 2022) muestra una susceptibilidad a movimientos en masa media a baja, y susceptibilidad a inundación del río Vilcanota es alta. Haciendo las comparaciones de susceptibilidad, coinciden parcialmente.

Las comparaciones entre mapas de susceptibilidad y mapas de niveles de peligro, no siempre serán iguales, debido a la escala del estudio, mientras la escala sea más grande será menor el detalle.

Para finalizar, la ciencia de los peligros naturales y el riesgo de desastres tiene como objetivo explicar el patrón, el proceso y el mecanismo espacio-temporal, la respuesta de emergencia y la mitigación del riesgo de los peligros naturales, lo que requiere un enfoque multidisciplinario e interdisciplinario, pudiéndose identificar

siete aspectos en los riesgos naturales: proceso de formación, mecanismo y dinámica de los peligros naturales, evaluación del riesgo de desastres, pronóstico, monitoreo y alerta temprana, mitigación de desastres, tratamiento y rescate de emergencia, riesgo gestión y reconstrucción post-desastre (Cui et al., 2021).

En este documento, presentamos los resultados de una encuesta del vigésimo aniversario de NHESS (Natural Hazards and Earth System Sciences), en la que una encuesta a 350 miembros de la comunidad de peligros naturales respondieron a dos preguntas: (P1) ¿Cuáles son los tres principales desafíos científicos sobre los peligros naturales? y (P2) ¿qué tres cambios debería o podría hacer la comunidad de ante los peligros naturales para el desarrollo sostenible? Las respuestas fueron concretas: (i) deficiencias en el conocimiento del riesgo y los componentes del riesgo (64 %), (ii) deficiencias de los enfoques de reducción de peligros y riesgos (37 %), (iii) influencia del cambio global, especialmente el cambio climático (35 %), (iv) integración de factores sociales (18%), (v) traducción inadecuada de la ciencia a la política y práctica (17 %), y (vi) falta de enfoques interdisciplinarios (6 %); y ante la pregunta (Q2), las respuestas fueron (i) una mayor participación de las partes interesadas, comunicación y transferencia de conocimientos (39 %), (ii) una mayor gestión y reducción de los riesgos de desastres (34 %), (iii) investigación interdisciplinaria mejorada y su traducción a políticas y prácticas (29 %), (iv) una mejor comprensión de los peligros naturales (23 %), (v) mejores datos, acceso mejorado a datos e intercambio de datos (9 %), y (vi) mayor atención a los países en desarrollo (6 %) (Trogrlić et al., 2022).

Los datos previos evidencian lo mucho que falta investigar sobre los riesgos y peligros de desastres por los distintos fenómenos naturales; y más aún, en los andes de Perú, donde la topografía del terreno está formada por cordilleras, cerros, nevados, volcanes, y altas precipitaciones que lo hacen más vulnerable.

Los peligros geológicos de fenómenos de geodinámica externa como los deslizamientos, los aluviones y las inundaciones se activan mayormente por el aumento de las precipitaciones en las época de lluvias de setiembre a marzo, producen inestabilidades de laderas que pueden afectar en la seguridad física de las poblaciones (Sardon et al., 2022).

Los deslizamientos y desprendimientos en el rango medio, alto y muy alto, están condicionados por factores de la pendiente, exposición y tipo de suelo, siendo las precipitaciones, el principal factor desencadenante (Rugiero & Wyndham, 2013).

Las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas generan una situación morfo-dinámica propicia para la ocurrencia de movimientos de masa, (flujos de detritos o aluviones y deslizamientos antiguos) (Hauser, 2000; Naranjo & Varela, 1996; Sepúlveda ET , Rebolledo, & Vargas, 2006; Sepúlveda *et al.*, 2010). Los cursos de agua forman una importante unidad para la actividad de movimiento en masa (Sepúlveda *et al.*, 2006; Sepúlveda & Padilla, 2008).

En Santa Ana del Yacuma en Bolivia se facilita a las autoridades municipales herramientas útiles para intervenir e iniciar el diseño de programas de manejo de desastres y aplicación de una gestión de riesgo que enfatice en la prevención, mitigación y reducción del riesgo asociado a inundaciones (García *et al.*, 2017).

Las medidas de prevención ante riesgos de desastres, pueden ser estructurales y no estructurales. En Colombia se protege a las comunidades ante los desastres, mitigando el impacto; todo esto mediante la integración de medidas estructurales con desarrollo de obras civiles y no estructurales con estrategias educativas, en los procesos de gestión del riesgo (García & Restrepo, 2016). Las obras civiles más utilizadas son los muros de contención que fueron utilizadas por los incas y denominadas como andenes, actualmente las estructuras utilizadas en los Andes Peruanos son los gabiones por ser estructuras flexibles en oposición a las estructuras de concreto.

Del análisis de toda la información antes descrita desde 1572, los peligros por inundación son los que mayor daño han ocasionado en las poblaciones de Ollantaytambo, Urubamba, Yucay, Calca, Lamay, Coya, Taray, Písaq y Maras, luego son los aluviones los que han provocado daños materiales y humanos, finalmente los deslizamientos pese a tener menor dimensión, también ocasionan daños en las poblaciones. Todos estos peligros afectan viviendas, infraestructura vial y terrenos de cultivo.



Los peligros por inundación, deslizamiento y aluvión narrados, evidencian los efectos destructivos de aluviones, inundaciones y deslizamientos en el pasado y el conocimiento de estos peligros por los habitantes del valle sagrado entre Ollantaytambo y Písaq, aprendieron a prevenir y mitigarlos. Las construcciones incas de andenes y defensa ribereña con bloques de rocas inclusive labradas en Ollantaytambo, Urubamba, Calca y Písaq confirman la acción preventiva de los pobladores asentados en el valle. En Ollantaytambo existen sectores con evidencias de sepultamiento de edificios incas por un aluvión, que motivó la construcción de defensa ribereña en el río Patacancha, canales de encauzamiento del río Vilcanota en Calca, y los andenes en Písaq que, por siglos estabilizó la tierra (Carlotto et al., 1996).

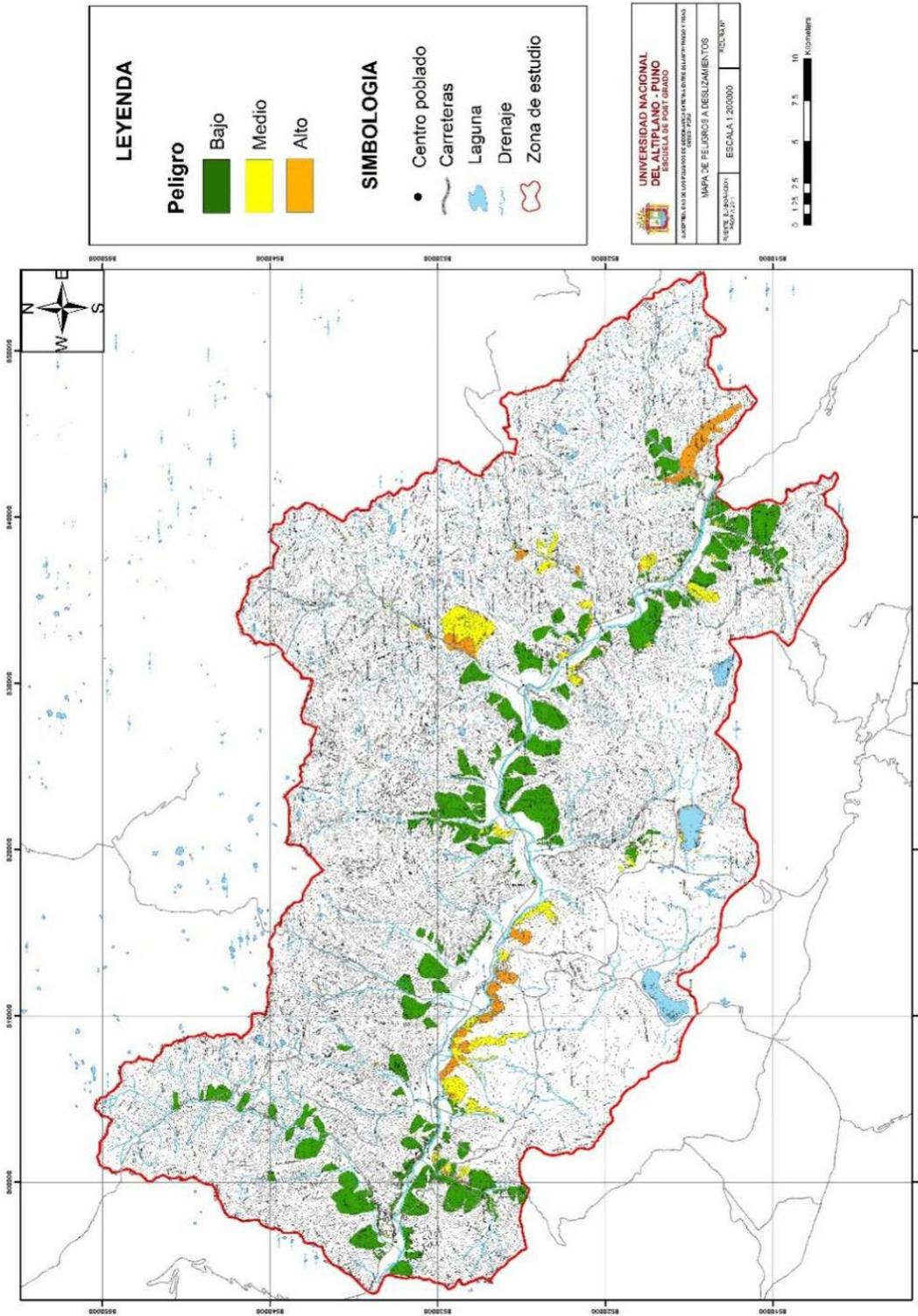


Figura 10. Mapa de niveles de peligro por deslizamiento

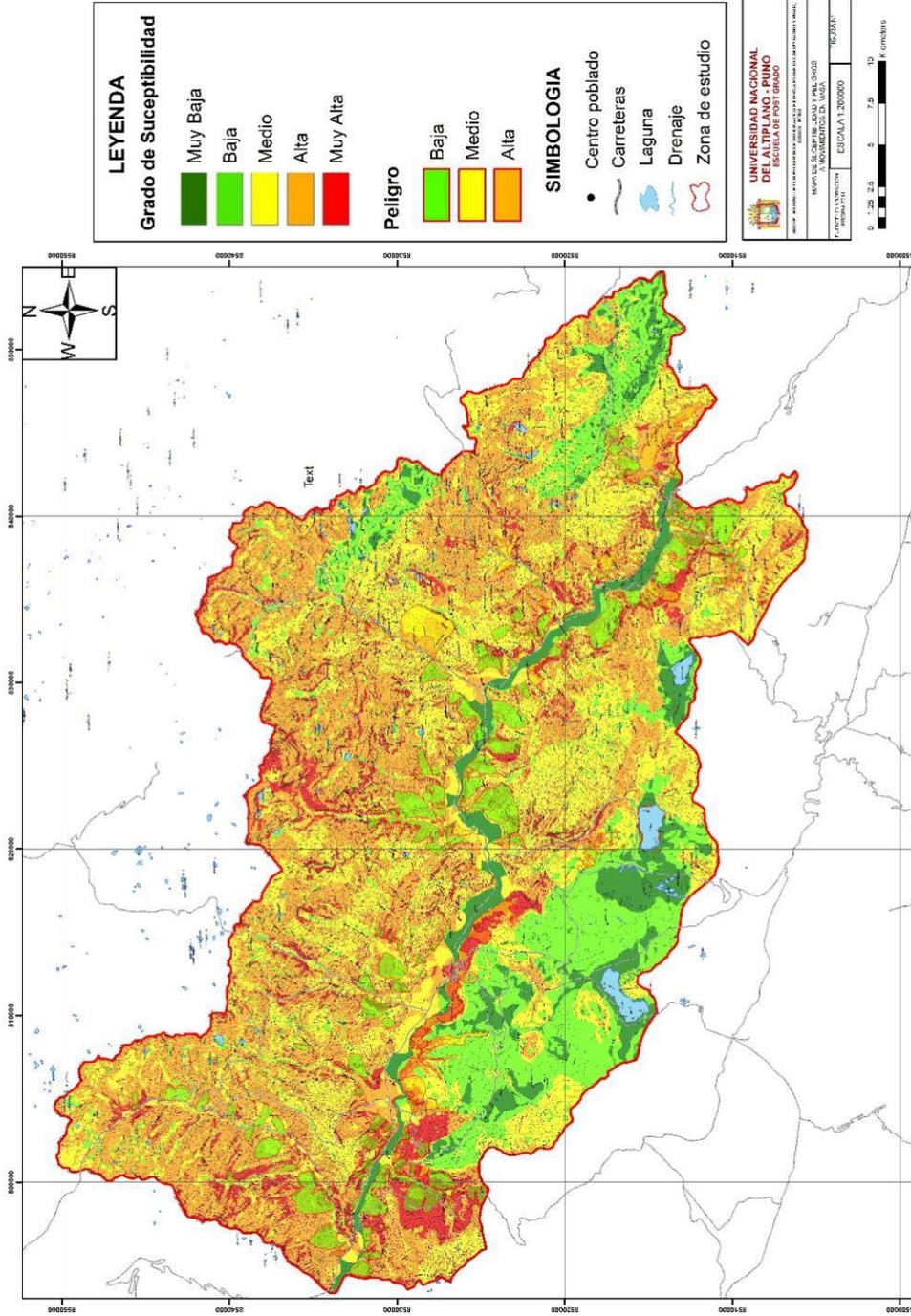


Figura 11. Mapa de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa vs mapa de niveles de peligros por deslizamiento y aluvión.

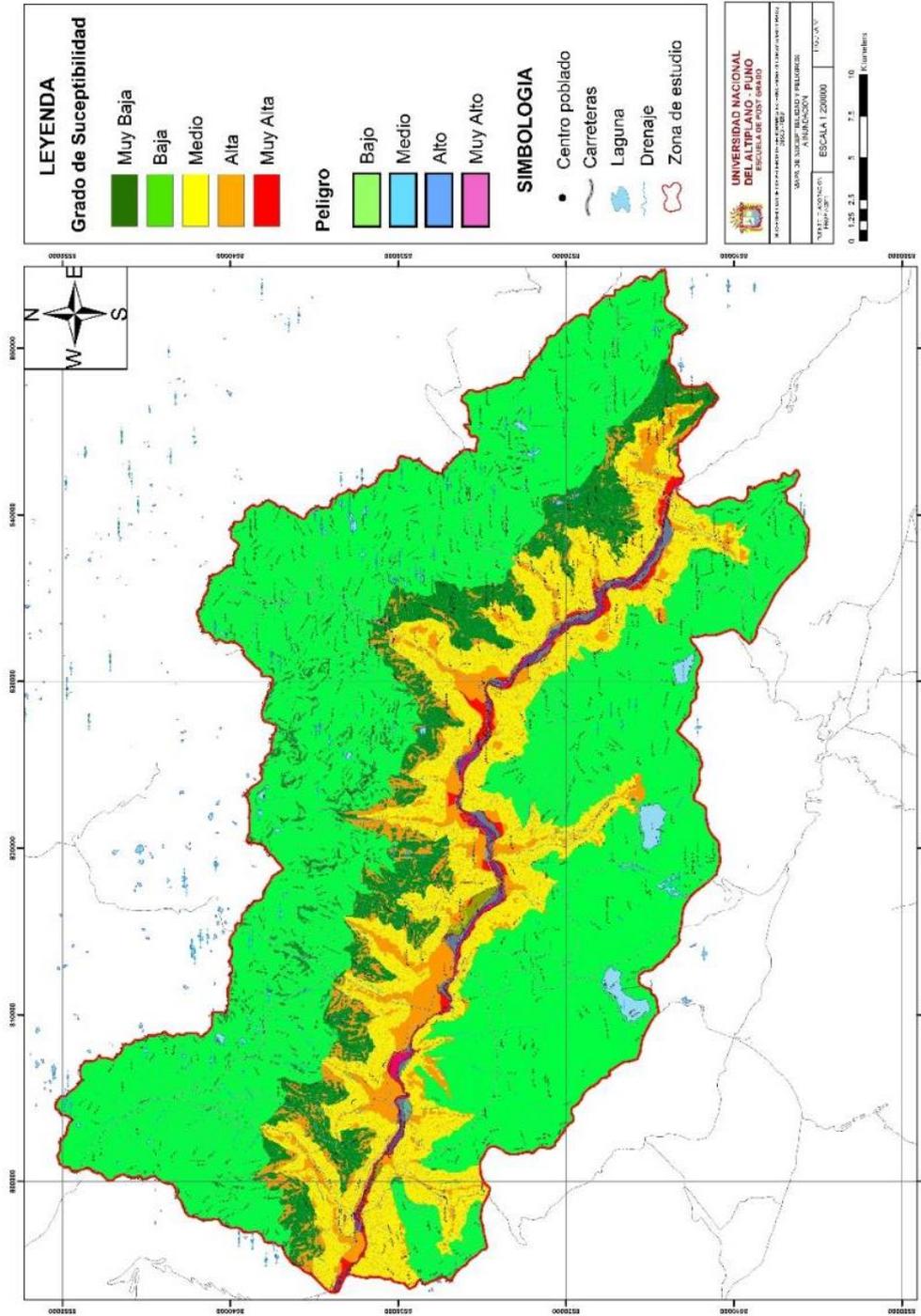


Figura 12. Mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación vs mapa de niveles de peligro por inundación del río Vilcanota.

CONCLUSIONES

1. En la geología se han determinado las unidades litoestratigráficas correspondientes a rocas sedimentarias, rocas metamórficas y rocas ígneas, con edades que van desde el Paleozoico inferior hasta el Cuaternario. En la geomorfología se han determinado 6 unidades geomorfológicas piso de valle, laderas, montaña, meseta, lomadas y abanico aluvial. En la pendiente se ha considerado 5 rangos de pendiente: Plana a ligeramente inclinada ($<5^\circ$), moderada a ligeramente inclinada ($5^\circ-15^\circ$), Moderadamente empinada ($15^\circ-35^\circ$), Empinada ($35^\circ-45^\circ$), Muy empinada ($> 45^\circ$). En la cobertura vegetal se han determinado 14 unidades de cobertura vegetal con sus características propias de flora para cada unidad.
2. La susceptibilidad a movimientos en masa se zonificó en áreas de muy alta susceptibilidad que abarca el 8.38% de la zona de estudio, la zona de susceptibilidad alta con 38.85%, la zona con susceptibilidad media abarca el 31.69%, la zona con susceptibilidad baja comprende el 14.14%, y la zona con susceptibilidad muy baja abarca el 6.93%. Se concluye que la zona de estudio tiene una mayor susceptibilidad entre alta y media por lo que deben tomarse medidas de prevención y mitigación en estas zonas. La zonificación de la susceptibilidad a inundación muy alta abarca el 2.37% de la zona de estudio, la zona con susceptibilidad alta abarca el 17.34 %, la zona con susceptibilidad media abarca el 7.40%, la zona con susceptibilidad baja abarca el 9.36 % y la zona con susceptibilidad muy baja abarca el 63.53%. Se concluye que la mayor susceptibilidad corresponde a muy baja con 63.53%, sin embargo se debe considerar la susceptibilidad alta que puede subir a una susceptibilidad muy alta, sino se toman las medidas preventivas y de mitigación.
3. Los niveles de peligro de geodinámica externa por inundación, aluvión y deslizamiento. El nivel de peligro por inundación indica un peligro muy alto con 0.53% de la zona de estudio, el nivel de peligro alto con 0.59%, el nivel de peligro medio con 0.58% y el nivel de peligro bajo 0.19%. El nivel de peligro por aluvión indica un peligro muy alto con 0.19% de la zona de estudio, el nivel de peligro alto con 0.74%, el nivel de peligro medio bajo con 3.09 %. El nivel de peligro por deslizamiento indica áreas con peligro alto con 0.94 % de la zona de estudio, el nivel de peligro medio con 1.38 % de la zona de estudio, el nivel de peligro bajo con 6.68 %. Cabe destacar que las áreas que abarcan



los peligros por inundación con 1.89% de la zona de estudio, peligro por aluvión con 4.02 % y la mayor área de peligro por deslizamiento con 9%. Se concluye que después de haber obtenido los datos de los niveles de peligro por inundación, los niveles de peligro muy alto, alto y medio son similares y de alta peligrosidad. En los niveles de peligro por aluvión el peligro alto es el de mayor peligrosidad. En los niveles de peligro por deslizamiento el peligro alto es el de mayor peligrosidad, sin embargo se debe tomar en cuenta los datos de peligro de mayor peligro alto a medio.

A partir de lo anterior se concluye que los mapas de susceptibilidad y de niveles de peligros de geodinámica externa entre Písaq y Ollantaytambo obtenidos se utilizarán en la seguridad física de las poblaciones mediante el plan de gestión de riesgos y la planificación del territorio, en el marco del ordenamiento territorial (POT) y de la zonificación ecológica y económica (ZEE); lo que permitirá un desarrollo sostenible de este valle con trabajos de mitigación que eviten los desastres naturales identificados en el presente estudio. Todo esto permitirá la protección de la vida humana, las ciudades, las inversiones en vivienda, la agricultura, ganadería, el transporte y también el turismo, que es una de las fuentes económicas importantes.

RECOMENDACIONES

Los resultados de este trabajo de investigación deben ser aplicados por las autoridades regionales y principalmente provinciales y distritales para la implementación de los estudios de planificación y planes de desarrollo, incluyendo la planificación urbana.

Adoptar urgentemente medidas de prevención y mitigación de peligros a movimientos en masa e inundación, en las localidades con zonificación muy alta y alta.

Aplicación por parte de Defensa Civil para la planificación, prevención y mitigación ante los movimientos en masa.

Tomar en cuenta también los factores desencadenantes, como los sismos y climatología para la mejora y más a detalle de la elaboración de los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa e inundación.

Utilizar otros métodos de obtención de mapas de susceptibilidad a deslizamientos de tierra, como máquina de vectores de soporte (SVM) que es un algoritmo de aprendizaje automático que utiliza una pequeña cantidad de muestras para la predicción y se ha utilizado ampliamente en los últimos años. Otros métodos como el proceso de jerarquía analítica, regresión logística, redes neuronales artificiales y bosques aleatorios (Huang & Zhao, 2018).

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, L., Hölbling, D., Albrecht, F., Dias, H. C., Dabiri, Z., Reischenböck, G., & Tešić, D. (2022). Mass movement susceptibility assessment of alpine infrastructure in the Salzkammergut area, Austria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 76, 103009 Contents. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103009>
- Agro Fergi. (2022). *Giant White Corn*. Editorial Information. http://www.agrofergi.com.pe/superfoods/giant_white_corn.html
- Alemayehu, T., Assogba, G. M., Gabbert, S., Giller, K. E., Hammond, J., Arouna, A., Dossou-Yovo, E. R., & van de Ven, G. W. J. (2022). Farming systems, food security and farmers' awareness of ecosystem services in inland valleys: A study from Côte d'Ivoire and Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 892818. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.892818>
- Allmendinger, R. W., Jordan, T. E., Kay, S. M., & Isacks, B. L. (1997). The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25, 139–174. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.139>
- Almaguer-Carmenates, Y., Rodríguez-Díaz, M. Á., del Rosario-Moradas, M., & Aguilar-Sánchez, A. M. (2014). Evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 30(2), 19–41. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223531569002>
- Alperin, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. In M. Alperin (Ed.), *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos* (Primera). Edulp. <https://doi.org/10.35537/10915/34221>
- Amorós, J. L. (1996). *Geología, COU*. Ediciones Anaya.
- Ayala-Carcedo, F. J. (2002). Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera. Su naturaleza, funciones, problemática y límites. In F. J. Ayala-Carcedo & J. Coraminas (Eds.), *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones en España* (pp. 7–20). Instituto Geológico y Minero de España. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=4082365&pid=S0004-4822201200030000700001&lng=es
- Batista, R. Y., & Montecelos, Y. (2011). Evaluación de la peligrosidad por deslizamiento con el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) del municipio Bartolomé

- Masó. Provincia Granma. *IX Congreso Cubano de Geología (Geología '2011). III Simposio de Riesgos Geológicos y Sismicidad*, 29. <https://docplayer.es/64735810-Evaluacion-de-la-peligrosidad-por-deslizamientos-con-el-uso-de-los-sistemas-de-informacion-geografica-del-municiipo-bartolome-maso.html>
- Benavente, C. L., & Delgado, F. (2011). *Evaluación de peligros geológicos en la Microcuenca de Ccochoc, Provincia de Calca – Región Cusco* (INGEMMET: Informe Técnico N° A6460).
https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1674/1/A6460-Evaluacion_microcuenca_Ccochoc_Calca-Cusco.pdf
- Beresford-Jones, D., Pullen, A., Chauca, G., Cadwallader, L., García, M., Salvatierra, I., Whaley, O., Vásquez, V., Arce, S., Lane, K., & French, C. (2018). Refining the maritime foundations of Andean civilization: How plant fiber technology drove social complexity during the preceramic period. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 25(2), 393–425. <https://doi.org/10.1007/s10816-017-9341-3>
- Blodgett, T. A., & Isacks, B. L. (2007). Landslide erosion rate in the Eastern Cordillera of northern Bolivia. *Earth Interactions*, 11(19), 1–30.
<https://doi.org/10.1175/2007EI222.1>
- Boschman, L. M. (2021). Andean mountain building since the Late Cretaceous: A paleoelevation reconstruction. *Earth-Science Reviews*, 220, 103640.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103640>
- Brain, M. J., & Rosser, N. J. (2022). Mass movements. *Geological Society Memoir*, 58(1), 227–239. <https://doi.org/10.1144/M58-2021-32>
- Bran, D. M., Lozano, J. G., Winocur, D., Menichetti, M., Onnis, L., Lodolo, E., & Tassone, A. (2020). The Cerro Guanaco mass movements: A geophysical and morphometric approach on a megalandslide in the Fuegian Andes (Southern Patagonia). *Journal of South American Earth Sciences*, 101, 102617.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102617>
- Branca, D., & Haller, A. (2021). Cusco: Profile of an Andean city. *Cities*, 113, 103169.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103169>
- Brown, D., Juhlin, C., Ayala, C., Tryggvason, A., Bea, F., Alvarez-Marron, J., Carbonell, R., Seward, D., Glasmacher, U., Puchkov, V., & Perez-Estaun, A. (2008). Mountain building processes during continent-continent collision in the Uralides. *Earth-Science*

- Reviews*, 89(3–4), 177–195. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.05.001>
- Camino, G. A., & Zapata, A. (2020). Andenes incas: estudio estructural del material adherente. *Ingeniería Civil: Revista DigitalCedex*, 196, 85–90.
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2422#:~:text=La técnica tradicional de construcción,pueden limitar su capacidad drenante.>
- Caminos, R., Cingolani, C. A., Hervé, F., & Linares, E. (1982). Geochronology of the pre-Andean metamorphism and magmatism in the Andean Cordillera between latitudes 30° and 36°S. *Earth Science Reviews*, 18(3–4), 333–352.
[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(82\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0012-8252(82)90043-5)
- Cappelli, S. L., Domeignoz-Horta, L. A., Loaiza, V., & Laine, A. L. (2022). Plant biodiversity promotes sustainable agriculture directly and via belowground effects. *Trends in Plant Science*, 27(7), 674–687. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.02.003>
- Cardozo, C. P. (2013). *Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina)* [Universidad Nacional de Córdoba].
https://ig.conae.unc.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010_Cardozo-Paola.pdf
- Carlotto, V. (1998a). *Evolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13°–16°S), Pérou: Enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique* [Université Joseph-Fourier - Grenoble I].
<https://theses.hal.science/tel-00517507>
- Carlotto, V. (1998b). *Evolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13°–16°S, Pérou). (Tesis doctoral)*. Université de Grenoble.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Chávez, R., & Gil, W. F. (1995). Sedimentología de la formación Huancané (Neocomiano) de la región de Cusco y su relación con las variaciones del nivel del mar. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 24(1), 1–21. <https://doi.org/10.3406/bifea.1995.1170>
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Concha, R., Astete, I., del Castillo, B., García, B., & Tito, V. (2012). Geología y geodinámica de la quebrada Chicón: El aluvión del 17 de octubre del 2010 que afectó Urubamba-Cusco. *Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, 2012. Resúmenes Extendidos*, 6.
https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1129/1/Carlotto-Geologia_geodinamica_quebrada_Chicon.pdf

- Carlotto, V., Cárdenas, J., Concha, R., Astete, I., Del Castillo, B., García, B., & Tito, V. (2010). Evaluación geológica y geodinámica en la quebrada Chicón: Aluvión del 17 de octubre del 2010 que afectó Urubamba-Cusco. In *Informe Técnico* (Vol. 4, Issue 1). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1908#files>
- Carlotto, V., Cerpa, L., Cárdenas, J., Díaz, E., & Bermúdez, O. (2003). Puesta en evidencia de depósitos glaciomarineros y resedimentados de posible edad Devónico Superior-Carbonífero basal en la Cordillera Oriental del sur del Perú: Región de Cusco. *Simposio Argentino Del Paleozoico Superior*, 3, 1p.
- Carlotto, V., Gutiérrez, S., Montañez, A., Acurio, H., & Cárdenas, J. (2005a). Estudio: Mapa de Peligros de la Ciudad de Calca. In *Informe Final: PROYECTO INDECI-PNUD PER/02/051 CIUDADES SOSTENIBLES*. <https://docplayer.es/30725758-Estudio-mapa-de-peligros-de-la-ciudad-de-pisac-proyecto-indeci-pnud-per-02-051-ciudades-sostenibles.html>
- Carlotto, V., Gutiérrez, S., Montañez, A., Acurio, H., & Cárdenas, J. (2005b). *Estudio: Mapa de peligros de la ciudad de Ollantaytambo*. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Cusco/urubamba/ollantaytambo_mp.pdf
- Carlotto, V., Gutiérrez, S., Montañez, A., Acurio, H., & Cárdenas, J. (2005c). *Estudio: Mapa de Peligros de la Ciudad de Pisac*. <https://docplayer.es/30725758-Estudio-mapa-de-peligros-de-la-ciudad-de-pisac-proyecto-indeci-pnud-per-02-051-ciudades-sostenibles.html>
- Carlotto, V., Gutiérrez, S., Montañez, A., Acurio, H., & Cárdenas, J. (2005d). Mapa de peligros de la ciudad de Urubamba. In *Informe final: PROYECTO INDECI-PNUD PER/02/051 CIUDADES SOSTENIBLES*. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Cusco/urubamba/urubamba_mp.pdf
- Carlotto, V. S., Gil, W. F., Cárdenas, J. D., & Chávez, R. (1998). No Title. *INGEMMET. Boletín, Serie A*, 65.
- Carlotto, V. S., Willy, G., Cárdenas, J., & Chávez, R. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca, Hojas: 27-r y 27-s* (Boletín N° 65; Serie A: Carta Geológica Nacional). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/187#:~:text=Los>

- Cuadrángulos de Urubamba y Calca abarcan parte de la,al Valle del Vilcanota-Urubamba.
- Carreño, R. (2006). Diagnóstico de peligros geodinámicos en los parques arqueológicos de P'ísaq y Ollantaytambo-Cusco. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 35(2), 97–120. <https://doi.org/10.4000/bifea.4491>
- CENEPRED. (2014). Manual Para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales. In *Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (02 Versión)*. <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/257>
- Cenki, B., Jaillard, E., & Carlotto, V. S. (1999). Estudio petrográfico-geoquímico del volcanismo Pre-Huancané en la región de Cusco-Sicuani (sur del Perú): interpretación geodinámica. *Sociedad Geológica Del Perú. Boletín*, 89(diciembre), 45–56.
- Chevarría-Lazo, M., Gouley, C., Hammond, M., Hernández, J. G., Legoas, J., Monroe, J., Paucarmayta, V., Orcotoma, J., Solís, J., & Zeisser, M. (2003, October). Evaluación Social e Institucional y Análisis de Riesgos en el Valle del Vilcanota - Cusco. *Centro Bartolomé de Las Casas*, 179. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Geral-14.pdf>
- Chipana, J., Gamarra, A., & Huaman, Jacqueline Samohuallpa, Y. (2016). *Aspectos que limitan la producción del maíz blanco gigante Cusco* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8242>
- Cieza de León, P. (1553). La Crónica del Perú. In *Primera Parte*. <https://www.biblioteca-antologica.org/es/wp-content/uploads/2018/03/CIEZA-DE-LEÓN-Crónica-del-Perú-.pdf>
- Combey, A., Tricoche, A., Audin, L., Gandreau, D., Benavente Escóbar, C., Bastante Abuhadba, J., Tavera, H., & Rodríguez-Pascua, M. Á. (2021). Monumental Inca remains and past seismic disasters: A relational database to support archaeoseismological investigations and cultural heritage preservation in the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 111(103447), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103447>
- Cornejo, M. A. (2014). El Tahuantinsuyo y el patrón de asentamiento provincial. *Revista de Arqueología Americana*, 31, 113–167. <https://www.jstor.org/stable/45154833>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G.,

- Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Cueto, C. J. (2015). *Estudio de la susceptibilidad a deslizamientos en la antigua provincia de Pinar del Río* [Universidad de Pinar del Río “Hnos. Saíz Montes de Oca”]. [https://rc.upr.edu.cu/bitstream/DICT/1784/1/Tesis_Carlos Javier.pdf](https://rc.upr.edu.cu/bitstream/DICT/1784/1/Tesis_Carlos%20Javier.pdf)
- Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., Liu, L., Li, C., & Lei, Y. (2021). Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2(3), 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.09.001>
- Dalmayrac, B., Laubacher, G., & Marocco, R. (1977). *Géologie des Andes péruviennes : caractères généraux de l'évolution géologique des andes péruviennes*. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- Dalmayrac, B., Laubacher, G., & Marocco, R. (1980). *Géologie des Andes Péruviennes: Caractères généraux de l'évolution géologique des Andes péruviennes*. O.R.S.T.O.M. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/LIB-200.pdf>
- Dávila, A. F. (2017). Habitabilidad y vida más allá de la Tierra. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 25(2), 119–129. <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/328887>
- de Molina, C. (1573). *Cristobal de Molina (del Cuzco). Ritos y fabulas de los incas 1573 (1947)*. Kuprienko. <https://kuprienko.info/cristobal-de-molina-del-cuzco-ritos-y-fabulas-de-los-incas-1573-1947/>
- de Oliveira, B. P. (2022). Outlining Agents and Policies of Value in the Touristic Economy of the Sacred Valley of Cusco. *Anuário Antropológico*, 47(1), 228–243. <https://doi.org/10.4000/aa.9511>
- Dechkamfoo, C., Sitthikankun, S., Kridakorn, T., Ayutthaya, N., Manokeaw, S., Timprae, W., Tepweerakun, S., Tengtrairat, N., Aryupong, C., Jitsangiam, P., & Rinchumphu, D. (2022). Impact of Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Risk on Mountain Roadside in Northern Thailand. *Infrastructures*, 7(17), 1–18. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7020017>
- Díaz, P. B., Verdugo, C. M., Arguello, C. S., & Jara, C. A. (2016). Caracterización ecológica de bofedales, hábitat de vicuñas aplicando metodologías de teledetección y

- SIG estudio de caso: Reserva de Producción de Fauna Chimborazo. *European Scientific Journal, ESJ*, 12(35), 105–130.
<https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n35p105>
- Dossou-Yovo, E. R., Baggie, I., Djagba, J. F., & Zwart, S. J. (2017). Diversity of inland valleys and opportunities for agricultural development in Sierra Leone. *PLoS ONE*, 12(6), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180059>
- Durán, V. H., & Rodríguez, C. R. (2008a). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 65–86.
<https://doi.org/10.1051/agro:2007062>
- Durán, V. H., & Rodríguez, C. R. (2008b). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag (Germany)*, 28(1), 65–86. <https://doi.org/10.1051/agro>
- El Mujtar, V., Muñoz, N., Prack Mc Cormick, B., Pulleman, M., & Tiftonell, P. (2019). Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? *Global Food Security*, 20, 132–144.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007>
- El Peruano. (2011). Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). *Normas Legales*, 436456–436463.
<https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29664.pdf>
- Fernández, D. S. (2017). Análisis de susceptibilidad de movimientos de remoción en masa a escala regional en un sector de la Puna Argentina. *Serie Correlacion Geologica*, 33(1–2), 15–26. <http://www.scielo.org.ar/pdf/scg/v33n1/v33n1a02.pdf>
- Fidel, L., Villacorta, S., Zavala, B., Vilchez, M., Valderrama, P., Nuñez, S., Luque, G., Rosado, M., Medina, L., Vásquez, J., & Ochoa, M. (2010). Map of susceptibility to mass movements in Peru. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos*, 9, 308–311. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-075.pdf>
- Gade, D. W. (2016). Spell of the Urubamba: Anthropogeographical Essays on an Andean Valley in Space and Time. In *Spell of the Urubamba*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-20849-7>
- García, N., & Restrepo, A. (2016). *La integración de las medidas estructurales y no estructurales para la gestión del riesgo de desastres por deslizamiento en Colombia. (Tesis de grado)*. Universidad Católica de Manizales.

- García, P. (2018). Archaeological restoration and heritage actions in ollantaytambo. *Heritage, 1*, 392–413. <https://doi.org/10.3390/heritage1020027>
- García, P. (2019). Desarrollo turístico e identidad indígena: Cuzco y el nuevo aeropuerto de Chinchero. *Revista Andaluza de Antropología, 17*, 72–93. <https://doi.org/10.12795/raa.2019.17.04>
- García, W., Lima, S., & Herbas, E. (2017). Evaluación del riesgo y medidas de mitigación para eventos de inundación en el Municipio de Santa Ana Del Yacuma (Beni, Bolivia) Risk assessment and mitigation measures for flood events in the Municipality of Santa Ana Del Yacuma (Beni, Bolivia). *Acta Nova, 8*, 1683–0768.
- GEMMA. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (Publicación). Geociencias para las Comunidades Andinas. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2830>
- Geocatmin. (2022). *Catastrro Minero*. Geoportal. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- González, F. M. (2018). *Estudio y modelación 2D del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/151303>
- GRC. (2011). *Plan de acondicionamiento territorial 1ra etapa provincias de Calca y Urubamba - diagnostico*. https://www.academia.edu/29678466/Plan_de_acondicionamiento_territorial_1ra_etapa_provincias_de_calca_y_urubamba_diagnostico
- Harrison, J. V. (1940). The geology of the central Andes in part of the province of Junin, Peru. *Quarterly Journal of the Geological Society, 99*, 1–36. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1943.099.01-04.05>
- Harvey, A. M. (2012). The coupling status of alluvial fans and debris cones: A review and synthesis. *Earth Surface Processes and Landforms, 37*, 64–76. <https://doi.org/10.1002/esp.2213>
- Hata, K., Osawa, T., Hiradate, S., & Kachi, N. (2019). Soil erosion alters soil chemical properties and limits grassland plant establishment on an oceanic island even after goat eradication. *Restoration Ecology, 27*(2), 333–342. <https://doi.org/10.1111/rec.12854>
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile : versión actualizada*. Servicio Nacional

- de Geología y Minería.
- Huang, Y., & Zhao, L. (2018). Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *Catena*, 165, 520–529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>
- INDECI. (2020). *Tabla: Matriz de Base de Datos de Emergencias y Daños ocurridos en el Perú: 2003-2020*.
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2564#files>
- INEI. (2020). PERU: Estimaciones y Proyecciones de Población por Departamento, Provincia y Distrito, 2018-2020. In *Boletín Especial N° 26*.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/1ibro.pdf
- Irawan, L. Y., Sumarmi, Panoto, D., Pradana, I. H., Faizal, R., Devy, M. M. R., & Putra, D. B. P. (2022). The identification of flood susceptibility and its contributing factors in Sampang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1089(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012013>
- Izquierdo, W. A. (2021). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos mediante técnicas de evaluación espacial multicriterio-GIS en la carretera San Juan-Cajamarca [Universidad Privada del Norte]. In *Facultad de Ingeniería*.
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/28765>
- Jenks, W. F. (1951). Triassic to tertiary stratigraphy near Cerro de Pasco, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, 62(2), 202–220. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1951\)62\[202:TTTSNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1951)62[202:TTTSNC]2.0.CO;2)
- Kalafatovich, C. (1977). *Informe sobre la geología del grupo arqueológico de los andenes incaicos Qosqa-sector Chongo, Písaq* (PER-39; Informe de Consultoría).
- Knight, D. W., Cottrell, S. P., Pickering, K., Bohren, L., & Bright, A. (2017). Tourism-based development in Cusco, Peru: comparing national discourses with local realities. *Journal of Sustainable Tourism*, 25(3), 344–361.
<https://doi.org/10.1080/09669582.2016.1213269>
- Kontak, D. J., Clark, A. H., Farrar, E., Archibald, D. A., & Baadsgaard, H. (1990). Late Paleozoic-early Mesozoic magmatism in the Cordillera de Carabaya, Puno, southeastern Peru: Geochronology and petrochemistry. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(4), 213–230. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90004-K](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90004-K)
- Li, Y., & Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A

- critical review. *Geomorphology*, 340, 67–83.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.020>
- Limarino, C. O., & Spalletti, L. A. (2006). Paleogeography of the upper Paleozoic basins of southern South America: An overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 22, 134–155. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.09.011>
- Luirei, K., Bhakuni, S. S., & Kothyari, G. C. (2018). Geomorphologic study of the valley floor in different tectonic segments along Kosi River valley between South Almora Thrust and Himalayan Frontal Thrust: Kumaun Himalaya, India. *Geological Journal*, 53(4), 1500–1515. <https://doi.org/10.1002/gj.2969>
- Luna, C., Almanza, M., & Nina, R. (2020). Peligro de inundación del río Vilcanota en el centro poblado de Písac, Cusco 2018. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), 18–32. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000200018&lng=es&tlng=en.
- Marocco, R. (1978). Geologie des Andes Peruviennes. In *Travaux et Documents de l'ORSTOM* (Travaux et Documents de L'O.R.S.T.O.M. N° 94).
https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Tra_d_cm/09863.pdf
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I., & MacDonell, S. (2020). A review of the current state and recent changes of the Andean cryosphere. *Frontiers in Earth Science*, 8(99), 1–27. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mc Laughlin, D. H. (1924). Geology and physiography of the peruvian cordillera, departments of Junin and Lima. *Bulletin of the Geological Society of America*, 35, 591–632. <https://doi.org/10.1130/GSAB-35-591>
- Mégard, F. (1978). Étude géologique des Andes du Pérou Central: Contribution a L'étude Géologique des Andes N° 1. In *Mémoires Orstom N° 86*. Institut français d'études andines. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/MO-86.pdf>
- Meldrum, G., Mijatović, D., Rojas, W., Flores, J., Pinto, M., Mamani, G., Condori, E., Hilaquita, D., Gruberg, H., & Padulosi, S. (2018). Climate change and crop diversity: farmers' perceptions and adaptation on the Bolivian Altiplano. *Environment, Development and Sustainability*, 20(2), 703–730. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9906-4>

- MINAM. (2015). *Mapa de susceptibilidad física del Perú: zonas propensas a inundaciones y deslizamientos en la costa y sierra frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos* (Documento de trabajo 2015).
<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/01/MAPA-DE-SUSCEPTIBILIDAD-FISICA.pdf>
- Mohammed, N. Z., Ghazi, A., & Mustafa, H. E. (2013). Positional accuracy testing of Google Earth. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 4(6), 6–9. <http://www.ijmse.org/Volume4/Issue6/paper2.pdf>
- Moldes, F. J. (1995). *Tecnología de los sistema de información geográfica*. RA-MA.
<https://www.amazon.com/-/es/Javier-Moldes-Teo/dp/8478971645>
- Naranjo, J. A., & Varela, J. (1996). Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de. Santiago. *SERNAGEOMIN. Boletín*, 047(mayo).
- Nedd, R., Light, K., Owens, M., James, N., Johnson, E., & Anandhi, A. (2021). A synthesis of land use/land cover studies: Definitions, classification systems, meta-studies, challenges and knowledge gaps on a global landscape Ryan. *Land*, 10, 1–30.
<https://doi.org/10.3390/land10090994>
- Newell, N. D., Chronic, J., & Roberts, T. G. (1953). Upper paleozoic of Peru. *Geological Society of America*, 58, 276–277. <https://doi.org/10.1130/MEM58>
- Núñez, S. A., & Chacaltana, C. A. (2020). *Evaluación de peligros geológicos por derrumbe en el cerro Yawarmaqui*.
https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2796/1/A7075-Evaluación_derrumbe_cerro_Yawarmaqui-Cusco.pdf
- Ochoa, F. (2022, January). Cinco años del gran desastre de Villa Santa Lucía: ¿Qué hemos aprendido? *Revista Qué Pasa*, 5. <https://ingcivil.uchile.cl/noticias/200422/columna-felipe-ochoa-cinco-anos-del-desastre-de-villa-santa-lucia>
- Ordoñez, J. J. (2019). Movimiento en masa por lluvias intensas en el Perú. In *Repositorio Institucional - SENAMHI*.
<http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/291#.XuuzTXE3a2o.mendeley>
- Ortloff, C. R. (2022). Inka hydraulic engineering at the Tipon Royal Compound (Peru). *Water (Switzerland)*, 14(1), 102. <https://doi.org/10.3390/w14010102>
- Özpolat, E., Yıldırım, C., Görüm, T., Gosse, J. C., Şahiner, E., Sarıkaya, M. A., & Owen,

- L. A. (2022). Three-dimensional control of alluvial fans by rock uplift in an extensional regime: Aydın Range, Aegean extensional province. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19795-0>
- Pan, X., & Qiu, B. (2022). The impact of flooding on firm performance and economic growth. *PLoS ONE*, 17(7), e0271309. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271309>
- Panca, F., & Breitreuz, C. (2010a). El grupo Mitu (Pérmico Superior-Jurásico Inferior?), sección Pallpa-Oqoruro, lado sureste de Pisac, Cusco, Peru: Facies volcanosedimentarias y geoquímica. *XV Congreso Peruano de Geología*, 9, 959–962. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-223.pdf>
- Panca, F., & Breitreuz, C. (2010b). El grupo Mitu (Permico superior – Jurasico inferior?), Seccion Pallpa – Oqoruro, Lado sureste de Pisac, Cusco, Peru: Facies Volcanosedimentarias y Geoquímica. *XV Congreso Peruano de Geología*, 9, 959–962.
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geograficas*, 92, 1–16. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>
- PMA:GCA. (2007). *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA:GCA)*.
- Ponce, L. A. (2015). Puquios, Qanats Y Manantiales: Gestión Del Agua En El Perú Antiguo. *Agricultura Sociedad Y Desarrollo*, 12(3), 279–296. <https://www.redalyc.org/pdf/3605/360543277002.pdf>
- Portal, C. (2017). The Artificial Mountain: a New Form of “Artialization” of Nature? *Revue de Géographie Alpine*, 105(2), 1–36. <https://doi.org/10.4000/rga.3740>
- Posthumus, H. (2005). Adoption of terraces in the Peruvian Andes [Wageningen Universiteit]. In *Tropical Resource Management Papers* (Vol. 72). <https://edepot.wur.nl/18307>
- Predes. (2008). Plan de Gestión Local del Riesgo de Desastres Calca, Perú. In *Proyecto Piloto Participativo* (Vol. 1, Issue 1). https://www.predes.org.pe/wp-content/uploads/2017/11/plan_gestion_local_riesgo-de-calca.pdf
- Quiroz, N. A. (2019). Análisis de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa. Caso de estudio: subcuenca del río San Francisco, departamento de Risaralda

- [Universidad de Manizales]. In *Αγαη*.
https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/5903/Quiroz_Hernandez_Nicolas_Andres_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ram, P., Gupta, V., Devi, M., & Vishwakarma, N. (2020). Landslide susceptibility mapping using bivariate statistical method for the hilly township of Mussoorie and its surrounding areas, Uttarakhand Himalaya. *Journal of Earth System Science*, 129(167), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01428-7>
- Ratnayaka, K., Hetzel, R., Hornung, J., Hampel, A., Hinderer, M., & Frechen, M. (2019). Postglacial alluvial fan dynamics in the Cordillera Oriental, Peru, and palaeoclimatic implications. *Quaternary Research (United States)*, 91(1), 431–449. <https://doi.org/10.1017/qua.2018.106>
- RD 988/INC. (2009). *Declaran patrimonio cultural de la Nación al Valle Sagrado de los Incas, ubicado en la Región Cusco*. <https://sni.org.pe/category/reporte-legal/instituciones/instituto-nacional-de-cultura/>
- Reitsma, M. (2012). *Reconstructing the Late Paleozoic: Early Mesozoic plutonic and sedimentary record of south-east Perú: Orphaned back-arcs along the western margin of Gondwana. (Tesis doctoral)*. Université de Genève.
- Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). Drought planning and risk assessment. *Status and Future Directions*, 10(162), 1–28. <https://doi.org/10.3390/land10020162>
- Rodríguez-Catalá, A., & Rodríguez-Infante, A. (2021). Sistema de fallas del yacimiento laterítico niquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, 37(2), 162–180. <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v37n2/1993-8012-mg-37-02-162.pdf>
- Rosas, S., Fontboté, L., & Tankard, A. (2007). Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 24(1), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.002>
- Rugiero, V., & Wyndham, K. (2013). Identificación de capacidades para la reducción de riesgo de desastre: enfoque territorial de la participación ciudadana en la precordillera de comuna de La Florida, Santiago de Chile. *Investigaciones Geográficas*, 46, 57. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2013.30283>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. <https://doi.org/10.1016/0022->

2496(77)90033-5

- Salmoral, G., Viñarta Carbó, A., Zegarra, E., Knox, J. W., & Rey, D. (2020). Reconciling irrigation demands for agricultural expansion with environmental sustainability - A preliminary assessment for the Ica Valley, Peru. *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123544>
- Sánchez, A. (2015). *Guías para la elaboración de mapas y boletines de la Carta Geológica Nacional* (INGEMMET (ed.); Primera Ed). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2170406/Guía_Elaboracion_Carta_Geologica_.pdf.pdf
- Sardon, H., Lavado-Casimiro, W., & Felipe, O. (2022). *Inventario de datos de eventos de inundaciones del Perú*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-99.pdf>
- Scheidegger, A. E. (1987). Geodynamics. In *Structural Geology and Tectonics. Encyclopedia of Earth Science* (pp. 282–287). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-31080-0>
- Schellart, W. P. (2017). Andean mountain building and magmatic arc migration driven by subduction-induced whole mantle flow. *Nature Communications*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01847-z>
- Sempere, T., Carlier, G., Soler, P., Fornari, M., Carlotto, V., Jacay, J., Arispe, O., Neraudeau, D., Cárdenas, J., Rosas, S., & Jiménez, N. (2002). Late Permian-Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean-age tectonics. *Tectonophysics, Elsevier*, 345(1–4), 53–181. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00211-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00211-6)
- Sepúlveda, S. A., & Padilla, C. (2008). Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards*, 47(2), 201–215. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9210-6>
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158(1), 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031>
- Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, 7(4), 483–492. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0203-2>
- SIAR. (2014). Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la cuenca del río

- Urubamba. In *Repositorio de Documentos*. Ministerio del Ambiente.
<http://siar.regioncusco.gob.pe/documentos/atlas-climatico-precipitacion-temperatura-aire-cuenca-rio-urubamba>
- Sipaucar, J. C. (2019). *Incorporación de un sendero interpretativo de la flora nativa en la comunidad de Huancalle para diversificar la oferta turística en el circuito Valle Sagrado* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].
https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4421/253T20190447_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Somos-Valenzuela, M. A., Oyarzun-Ulloa, J. E., Fustos-Toribio, I. J., Garrido-Urzuza, N., & Chen, N. (2020). The mudflow disaster at Villa Santa Lucía in Chilean Patagonia: Understandings and insights derived from numerical simulation and postevent field surveys. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(8), 2319–2333.
<https://doi.org/10.5194/nhess-20-2319-2020>
- Stanley, T., & Kirschbaum, D. B. (2017). A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards (Dordr)*, 87(1), 145–164.
<https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y>
- Steinmann, G., Stappenbeck, R., Sieberg, A. H., & Lissón, I. (1929). *Geologie von Peru* (C. W. Heidelberg (ed.)). WorlCat. <https://search.worldcat.org/es/title/geologie-von-peru/oclc/5687298>
- Sun, X., Chen, J., Bao, Y., Han, X., Zhan, J., & Peng, W. (2018). Landslide susceptibility mapping using logistic regression analysis along the Jinsha river and its tributaries close to Derong and Deqin County, southwestern China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(11), 1–29. <https://doi.org/10.3390/ijgi7110438>
- Tamayo, J. (2016). *Los desastres del Valle Sagrado de los Incas*. Valicha: Portal Del Cusco.
<https://valicha.com/web/economia/38-economia-2010/131-los-desastres-del-valle>
- Tapia, J., Murray, J., Ormachea-Muñoz, M., & Bhattacharya, P. (2022). The Unique Altiplano-Puna Plateau: Environmental Perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*, 115, 103725. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103725>
- Tariq, A., Yan, J., Ghaffar, B., Qin, S., Mousa, B. G., Sharifi, A., Huq, M. E., & Aslam, M. (2022). Flash flood susceptibility assessment and zonation by integrating analytic hierarchy process and frequency ratio model with diverse spatial data. *Water (Switzerland)*, 14(19), 3069. <https://doi.org/10.3390/w14193069>

- Tavera, H. (2008). La sismicidad en el mundo. *Revista Del Capítulo de Ingeniería Geológica, 1*, 25–27.
- Terrizzano, C. M., Fazzito, S. Y., Cortés, J. M., & Rapalini, A. E. (2012). Electrical resistivity tomography applied to the study of neotectonic structures, northwestern Precordillera Sur, Central Andes of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences, 34*, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.10.002>
- Titko, M., & Ristvej, J. (2020). Assessing importance of disaster preparedness factors for sustainable disaster risk management: The case of the Slovak Republic. *Sustainability (Switzerland), 12*, 9121. <https://doi.org/10.3390/su12219121>
- Trogrlić, R. Š., Donovan, A., & Malamud, B. D. (2022). Invited perspectives: Views of 350 natural hazard community members on key challenges in natural hazards research and the Sustainable Development Goals. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 22*(8), 2771–2790. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2771-2022>
- Valderrama, P. A. (2006). *Geología, Geodinámica y Simulación de Flujos en Urubamba y Ollantaytambo* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0083.pdf>
- Valderrama, P. A., Araujo, G. E., Dueñas, S., Silva, R. C., & Fídel, L. (2016). Inventario de movimientos en masas, peligros geológicos y simulación de aluviones en la Cordillera Blanca, Ancash - Perú. *Congreso Peruano de Geología, 18, Lima 16-19 Octubre 2016. Resúmenes, 5*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2752>
- Valderrama, P., & Roa, J. (2011). Evaluación de Peligros Geológicos en el Valle Sagrado de los Incas, Río Vilcanota: Distritos Urubamba y Ollantaytambo, provincia Cusco, región Cusco. In *Informe Técnico N° A6457*. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1671/1/A6457-Evaluacion_peligros_geologicos_Valle_Sagrado-Cusco.pdf
- Vanacker, V., Molina, A., Rosas-Barturen, M., Bonnesoeur, V., Román-Dañobeytia, F., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2022). The effect of natural infrastructure on water erosion mitigation in the Andes. *Soil, 8*, 133–147. <https://doi.org/10.5194/soil-8-133-2022>
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and Control. Special report N° 176* (pp. 11–33).

- National Academy of Sciences. <http://www.engr.hk/T05/176-002.pdf>
- Velarde, M. F. (2014). *Estudio de investigación para la el tratamiento de soluciones residuales del proceso de cianuración mediante la aplicación de sistemas pasivos de la empresa minera el Misti Gold S.A.C.* [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2614/IMveammf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vílchez, M., Chira, J., Pari, W., Villacorta, S., & Peña, F. (2007). *Estudio geoambiental de la cuenca de los ríos Jequetepeque y Loco de Chaman.*
<http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/279>
- Vilchez, M., Sosa, N., Pari, W., & Peña, F. (2020). *Peligro Geológico en la Región Cusco.*
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2564#files>
- Villacorta, S., Fidel, L., & Zavala, B. (2012). Mapa de Susceptibilidad Por Remoción en Masa de Suelos y Rocas. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 393–399. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/694#files>
- Vivier, G., Audebaud, E., & Vatin, N. (1976). Le magmatisme tardi–hercynien et andin le long d’une transversale sud–péruvienne: bilan géochimique des éléments incompatibles. *Réunion Annuelle Des Sciences de La Terre*, 396.
- Volgina, L., & Sergeev, S. (2021). Determination of the mean velocity of mudflows (debris flows) taking into account their life cycle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1030(1), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012150>
- Wilcox, A. C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., Castro, L., Gironás, J., Cienfuegos, R., & Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035–8043.
<https://doi.org/10.1002/2016GL069751>
- Wright, K. R. (2021). The masterful water engineers of machu picchu. *Water (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213049>
- Yaranga, R. (2020). High-Andean wetland of Peru: Floristic diversity, primary net aerial productivity, ecological condition, and carrying capacity. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 213–221. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.08>



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo José Dionicio Cárdenas Roque,
identificado con DNI 23073595 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa
entre Ollantaytambo y Pisac, Cusco-Perú"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 8 de enero del 20 24


FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



VRI
Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo José Dionicio Cárdenas Roque
identificado con DNI 22 873 595 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Susceptibilidad de los peligros de geodinámica externa
entre Ollantaytambo y Pisac, Cusco - Perú"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 8 de enero del 20 24

FIRMA (obligatoria)



Huella