



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**ÁREAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA
PACHACOTO, DISTRITO DE CÁTAC, PROVINCIA DE RECUAY, REGIÓN ÁNCASH**

Línea de investigación:

**Desarrollo urbano-rural, Catastro, Prevención de riesgos, Hidráulica y
geotecnia**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniería Geográfica

Autor:

Suarez Salazar, Erick Eduard

Asesor:

Martínez Cabrera, Ruben
(ORCID: 0000-0002-4561-5627)

Jurado:

Mendoza García, José Tomas
Vásquez Aranda, Ahuber Omar
Gonzales Alarcón, Angelino Oscar

Lima - Perú

2023

REPORTE DE ANÁLISIS DE SIMILITUD

Archivo:	1A - Suarez Salazar Erick Eduard - Titulo profesional - 2023
Fecha del análisis:	12/05/2023
Operador del programa informático:	Gamarra Jiménez, David Milton
Correo del operador del Programa informático:	dgamarra@unfv.edu.pe
Porcentaje:	3 %
Título	ÁREAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA PACHACOTO, DISTRITO DE CÁTAC, PROVINCIA DE RECUAY, REGIÓN ÁNCASH
Asesor:	Martínez Cabrera, Rubén
Enlace:	https://secure.arkund.com/old/view/159494081-151840-499810#HY9LjIQxEATv0usQsutfcxXEAo0A9YLZzBJxd7J5Vtr57KhF/Hn8/ny8fT1crrbzyqua4kooqZTSyijLFfLC/59Cr9ArVFVNRSoaKNEIWoMtukW3kBbTgIpUC+vXu9AWqmMx7GAXU3EssMQKa2ywxGDX9xw9cATL7zxwZcgDnEJl5zQbxJFNDHEkuQhL2mkk0Hqpsgmh1yK0tSljHlqqKR02chlQo10ZCMZuUhfJhKRhzRkMcxhLmOMM8EkU0wzelq0DntZY50NNtlimx12v/H4fP76eP58vn//eP/xeDtfjm1MpeubPJbmf/8B


Mg. Jhoana Juliana Rivera Murillo

Jefa de la Oficina de Grados y Gestión del Egresado



FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

“ÁREAS SUSCEPTIBLES A MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA
PACHACOTO, DISTRITO DE CÁTAC, PROVINCIA DE RECUAY, REGIÓN ÁNCASH”

Línea de Investigación:

Desarrollo urbano-rural, Catastro, Prevención de riesgos, Hidráulica y geotecnia

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniería Geográfica

Autor:

Suarez Salazar, Erick Eduard

Asesor:

Martínez Cabrera, Ruben

(ORCID: 0000-0002-4561-5627)

Jurado:

Mendoza García, José Tomas

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

Gonzales Alarcón, Angelino Oscar

Lima - Perú

2023

Índice

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción y formulación del problema	2
1.1.1 Descripción del problema.....	2
1.1.2 Formulación del problema	4
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Antecedentes nacionales	4
1.2.2 Antecedentes internacionales	7
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Justificación.....	11
1.4.1 Justificación teórica.....	11
1.4.2 Justificación metodológica.....	11
1.4.3 Justificación práctica	11
1.5 Hipótesis.....	12
1.5.1 Hipótesis afirmativa	12
1.5.2 Hipótesis nula.....	12

II	MARCO TEÓRICO.....	13
2.1	Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	13
2.1.1	Susceptibilidad	13
2.1.2	Movimientos en masa.....	13
2.1.3	Susceptibilidad a movimientos en masa.....	21
2.1.4	Cuenca y subcuenca hidrográfica.....	21
2.1.5	Factores físicos.....	22
2.1.6	Factores condicionantes	22
2.1.7	Factores desencadenantes.....	23
2.1.8	Estratificación.....	24
2.1.9	Zonificación	24
III	MÉTODO	25
3.1	Tipo de investigación	25
3.2	Ámbito temporal y espacial.....	25
3.2.1	Ámbito temporal	25
3.2.2	Ámbito espacial.....	25
3.3	Variables.....	26
3.3.1	Operacionalización de variables.....	26

3.4	Población y muestra	27
3.4.1	Población.....	27
3.4.2	Muestra.....	27
3.5	Instrumentos	28
3.5.1	Instrumentos de recolección de datos.....	28
3.5.2	Materiales	28
3.5.3	Equipos.....	28
3.5.4	Programas.....	29
3.6	Procedimientos	29
3.6.1	Procedimiento para realizar el diagnóstico de la subcuenca Pachacoto...	29
3.6.2	Elaboración y preparación de ficha para levantamiento de información y salida a campo.....	31
3.6.3	Procedimiento para la estimación de la susceptibilidad y realizar la estratificación de la susceptibilidad	32
3.6.4	Procedimiento para realizar la zonificación según el grado de susceptibilidad.....	33
3.7	Análisis de datos.....	34
3.7.1	Análisis de datos del diagnóstico de la subcuenca Pachacoto	34
3.7.2	Análisis de datos para la estimación de la susceptibilidad.....	57

3.7.3	Establecimiento de prioridades	57
3.7.4	Comparaciones pareadas	57
3.7.5	Matriz de comparaciones pareadas por pares.....	58
3.7.6	Consistencia	59
3.7.7	Análisis de los factores físicos mediante el Proceso Analítico Jerárquico	
(PAJ)	60	
3.7.8	Zonificación según el grado de susceptibilidad	67
IV	RESULTADOS.....	73
4.1	Resultados del diagnóstico de la subcuenca Pachacoto	73
4.1.1	Ubicación geográfica.....	73
4.1.2	Superficie y límites.....	73
4.1.3	Altitud.....	74
4.1.4	Vías de acceso	74
4.1.5	Geología	75
4.1.6	Geomorfología	76
4.1.7	Pendientes.....	78
4.1.8	Cobertura vegetal	79
4.1.9	Anomalía de precipitación	81

4.2	Resultados de la estimación de la susceptibilidad.....	82
4.2.1	Matriz de comparación por pares de los factores condicionantes.....	82
4.2.2	Matriz de comparación por pares para el factor desencadenante.....	88
4.2.3	Matriz de factores condicionantes y sus descriptores	92
4.2.4	Matriz del factor desencadenante y sus descriptores	93
4.2.5	Ponderación del factor condicionante vs factor desencadenante	93
4.2.6	Estimación de la susceptibilidad de los parámetros físicos.....	94
4.2.7	Estratificación de la susceptibilidad.....	97
4.3	Resultados de la zonificación de la susceptibilidad	97
V	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	99
VI	CONCLUSIONES	101
VII	RECOMENDACIONES	103
VIII	REFERENCIAS	104
IX	ANEXOS	107

Lista de tablas

Tabla 1	<i>Clasificación de movimientos en masa</i>	14
Tabla 2	<i>Componentes ambientales para el medio físico</i>	22
Tabla 3	<i>Factores condicionantes de peligro</i>	23
Tabla 4	<i>Factores desencadenantes del peligro</i>	24
Tabla 5	<i>Tabla de operacionalización de variables</i>	26
Tabla 6	<i>Tabla de clasificación según la pendiente en grados de la subcuenca Pachacoto</i>	46
Tabla 8	<i>Escala de preferencias según Saaty</i>	57
Tabla 9	<i>Criterio de comparación por pares o pareadas</i>	58
Tabla 9	<i>Parámetros físico geográficos de la subcuenca Pachacoto con sus respectivos descriptores</i>	60
Tabla 10	<i>Comparación de pares para los factores condicionantes de la subcuenca Pachacoto</i>	62
Tabla 11	<i>Suma de valores y la inversa de la suma de valores por cada columna</i>	63
Tabla 12	<i>Normalización de los factores condicionantes</i>	64
Tabla 13	<i>Vector priorización (ponderación) de los factores condicionantes</i>	64
Tabla 14	<i>Matriz para hallar el vector suma ponderado</i>	65
Tabla 15	<i>Matriz vector suma ponderado</i>	66

Tabla 16 <i>Vector suma ponderado entre vector priorización</i>	66
Tabla 17 <i>Valores del Índice aleatorio para diferentes “n”</i>	67
Tabla 18 <i>Coordenadas en Datum WGS – 84, Zona 18 sur de la subcuenca Pachacoto</i>	73
Tabla 19 <i>Vías de acceso a la subcuenca Pachacoto desde la ciudad de Lima</i>	74
Tabla 20	75
Tabla 21 <i>Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas a los movimientos en masa</i>	77
Tabla 22 <i>Susceptibilidad de las pendientes a los movimientos en masa</i>	78
Tabla 23	80
Tabla 24 <i>Susceptibilidad de la anomalía de precipitación a los movimientos en masa</i>	81
Tabla 25 <i>Matriz de comparación por pares de los factores condicionantes</i>	82
Tabla 26 <i>Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro</i> <i>“Litología”</i>	83
Tabla 27 <i>Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro</i> <i>“Pendientes”</i>	85
Tabla 28 <i>Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro</i> <i>“Geomorfología”</i>	86

Tabla 29 <i>Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro</i> <i>“Anomalía de precipitación”</i>	89
Tabla 30 <i>Matriz de factores condicionantes y sus descriptores con sus respectivas</i> <i>ponderaciones</i>	92
Tabla 31 <i>Matriz del factor desencadenante y sus descriptores con sus respectivas</i> <i>ponderaciones</i>	93
Tabla 32 <i>Matriz de los factores condicionantes y sus descriptores con sus respectivas</i> <i>ponderaciones</i>	95
Tabla 33 <i>Matriz del factor desencadenante con el valor del factor desencadenante y</i> <i>el peso del factor desencadenante</i>	96
Tabla 34 <i>Matriz de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca</i> <i>Pachacoto</i>	96
Tabla 35 <i>Estratificación de la susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca</i> <i>Pachacoto</i>	97

Lista de figuras

Figura 1 <i>Caída de rocas</i>	15
Figura 2 <i>Vuelco de rocas</i>	16
Figura 3 <i>Deslizamiento rotacional</i>	17
Figura 4 <i>Deslizamiento rotacional en el Cerro Mizhquiyacu en Ecuador en el año 1993</i>	17
Figura 5 <i>Deslizamiento traslacional</i>	18
Figura 6 <i>Expansión lateral</i>	19
Figura 7 <i>Flujo de detritos en la cuenca del río Checras</i>	20
Figura 8 <i>Movimiento complejo</i>	21
Figura 9 <i>Columna Lito-estratigráfica de la hoja N° 20i – Cuadrángulo de Recuay</i> ...	35
Figura 10 <i>Unidad litológica Formación Chicama dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto</i>	37
Figura 11 <i>Unidad litológica Grupo Calipuy superior presente dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto</i>	38
Figura 12 <i>Depósitos morrénicos dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto</i>	40
Figura 13 <i>Montañas con escasa cobertura glacial y presencia del nevado Pastoruri</i>	42
Figura 14 <i>Montaña estructural en roca volcánica</i>	43
Figura 15 <i>Morrenas en la base del nevado Pastoruri</i>	44

Figura 16 <i>Áreas altoandinas con escasa y sin vegetación</i>	48
Figura 17 <i>Glaciar Pastoruri</i>	49
Figura 18 <i>Pajonales en la subcuenca Pachacoto</i>	50
Figura 19 <i>Matorral arbustivo junto a pajonales y vestigios de flujo de detritos</i>	51
Figura 20 <i>Bofedales con presencia de montañas estructurales y con cobertura glaciar de fondo</i>	52
Figura 21 <i>Laguna en la subcuenca Pachacoto</i>	53
Figura 22 <i>Anomalía de precipitación del mes de marzo del año 2022</i>	55
Figura 23 <i>Anomalía de precipitación del mes de mayo del año 2022.</i>	56
Figura 24 <i>Nuevo atributo de la ponderación de cada descriptor para cada parámetro físico geográfico</i>	68
Figura 25 <i>Transformación a ráster de los factores físico geográficos</i>	69
Figura 26 <i>Superposición ponderada para hallar el factor condicionante</i>	70
Figura 27 <i>Reclasificación del Factor Condicionante según intervalos</i>	71
Figura 28 <i>Estimación de la susceptibilidad en la subcuenca Pachacoto</i>	72

RESUMEN

Objetivo: Identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto. **Método:** Investigación de tipo cuantitativa, diseño no experimental y nivel explicativo. Se realizó el diagnóstico en la subcuenca Pachacoto con la finalidad de identificar los factores físicos que influyen en la generación a los movimientos en masa. Posteriormente, se realizó el Proceso Analítico Jerárquico para determinar los valores de susceptibilidad, comparando su importancia o jerarquía de los factores condicionantes y desencadenante, así como también a sus descriptores para luego con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica realiza una superposición ponderada que nos permitió reconocer las áreas susceptibles a los movimientos en masa. **Resultado:** Se obtuvieron cinco niveles de susceptibilidad en la subcuenca Pachacoto a partir de la estimación, estratificación y el mapa de zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa. **Conclusiones:** La Subcuenca Pachacoto presentaría áreas susceptibles muy altas y altas a los movimientos en masa en el 47.30% de su extensión y el 40.62% presentaría una susceptibilidad media, entre los cuales podrían originarse movimientos en masa de tipo deslizamientos, caídas y avalancha de rocas.

Palabras clave: Movimientos en masa, áreas susceptibles, Proceso Analítico Jerárquico.

ABSTRACT

Objective: Identify areas susceptible to landslides in the Pachacoto sub-basin. **Method:** Quantitative research, non-experimental design and explanatory level. The diagnosis was made in the Pachacoto sub-basin in order to identify the physical factors that influence the generation of mass movements. Subsequently, the Hierarchical Analytical Process was carried out to determine the susceptibility values, comparing their importance or hierarchy of the conditioning and triggering factors, as well as their descriptors, and then with the help of the Geographic Information Systems, performing a weighted superposition that allowed us to. Recognize areas susceptible to landslides. **Result:** Five susceptibility levels were obtained in the Pachacoto sub-basin from the estimation, stratification and zoning map of susceptibility to landslides. **Conclusions:** The Pachacoto Sub-basin would present very high and high susceptible areas to mass movements in 47.30% of its extension and 40.62% would present a medium susceptibility, among which gradual mass movements, falls and rock avalanches could originate. . .

Keywords: Mass movements, susceptible areas, Hierarchical Analytical Process.

I. INTRODUCCIÓN

Identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto consistió en un conjunto de procesos que nos permitió lograr el objetivo de la investigación. La subcuenca Pachacoto no contempla mucha información en cuanto a la gestión de riesgos nos referimos, más aún cuando se encuentra presente un Área Natural Protegida como es el Parque Nacional del Huascarán y atractivos turísticos como el glaciar de Pastoruri.

El identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto permitirá desarrollar planes de mitigación, una adecuada gestión de riesgos y salvaguardar tanto vidas humanas como pérdidas socios económicos. Es por ello que, para la identificación de las áreas susceptibles, se realizó el diagnóstico en la subcuenca Pachacoto con la finalidad de identificar a los factores físicos que influyen a la generación de los movimientos en masa. Luego, se realizó el Proceso Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy Process (de ahora en adelante “PAJ”) para determinar los pesos o ponderaciones de cada uno de los factores que condicionan y desencadenan los movimientos en masa dentro de la subcuenca Pachacoto. Con esto se puede estimar la susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto, de manera que se clasificarán en cinco tipos según su grado de susceptibilidad a través de una estratificación. Seguido a ello, se podrá dar como producto final un mapa temático donde se pueda evidenciar las áreas susceptibles a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.

En la subcuenca Pachacoto se logró identificar cinco grados o niveles de susceptibilidad a movimientos en masa, así como también de nombra a algunos movimientos en masa que se pueden generar en determinadas áreas dependiendo de su litología.

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

El planeta Tierra está sujeto a eventos geodinámicos tanto internos como externos, causados por las condiciones físicas y climáticas de ciertas áreas, lo que resulta en diferentes tipos de desplazamientos de movimientos en masa, causando daños económicos, sociales y medioambientales.

Cada año decena de billones de dólares son valuados en pérdidas humanas y daños en las infraestructuras a causa del uno de los procesos geológicos más destructivos que existen, como son los deslizamientos de tierra. (Brabb & Hrod, 1989).

Cuando nos referimos a los andes, se puede afirmar tectónicamente que son jóvenes. Su recurrente actividad sísmica, así como su relieve topográfico y el vulcanismo presente apuntan a una propensa y alta incidencia de amenazas por los movimientos en masa. Recurriendo a la historia, los peores desastres que han suscitado en la región Andina justamente han sido asociados a los movimientos en masa, tales como el flujo de detritos de Vargas ocurrido en el país de Venezuela en el año 1999 tomando las vidas de 15 000 personas. Por otro lado, en el país de Colombia ocurrió el lahar de Armero, el cual tomó la vida de 23 000 personas en el año 1992. (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas, 2007).

La ocurrencia de movimientos en masa en el país de Colombia ha ido incrementando en las últimas décadas, siendo el fenómeno de La Niña en los años 2010 - 2011 el evento que causó mayor afectación en los sectores productivos, así como también en los sectores de vivienda e infraestructura de transporte, tales como las carreteras y vías de comunicación. (Servicio Geológico Colombiano , 2017).

El Perú se encuentra ubicado en la zona oriental del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico, el cual, debido a sus características geográficas, geológicas e hidrometeorológicas lo hacen muy susceptible a la ocurrencia de sismos. Los sismos y las precipitaciones, considerados los principales factores desencadenantes, originan fenómenos de geodinámica externa, como son los movimientos en masa. (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2015).

La región Ancash, la cual se encuentra ubicada en la región centro occidental del Perú, posee un alto índice de ocurrencia de eventos desastrosos, como los movimientos en masa, los cuales son desencadenados por lluvias y sismos. El tipo de movimiento en masa que ha ocurrido en mayor cantidad han sido los aluviones. (Zavala et al., 2008).

En la cuenca del río Santa han ocurrido con frecuencia diversos fenómenos naturales, en ocasiones de magnitudes catastróficas, resaltando a aquellos que se encuentran catalogados como fenómenos de geodinámica externa. Estos fenómenos comprometen a la población, infraestructuras y terrenos de cultivo haciendo de carácter prioritario el realizar estudios para evaluar los riesgos con la finalidad de adoptar medidas con las cuales se reduce o mitiga el peligro. En esta cuenca, la historia geológica demuestra que han ocurrido y seguirán ocurriendo diversos tipos de fenómenos de geodinámica externa, los cuales se encargarán de modificar la superficie debido a la presencia de factores físicos condicionantes. (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET], 1989).

En la visita de campo realizada para la investigación se registró dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto veinticinco movimientos en masa, entre los cuales se identificaron los de tipo deslizamiento y pequeños flujos de detritos en laderas. Además, se consultó a personas que se encontraron dentro del área de estudio al momento de realizar la visita de campo sobre la incidencia a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto, siendo la respuesta de manera

negativa dando alusión a que en ese lugar no ocurre ese tipo de eventos o que no conocen o no saben nada al respecto de la ocurrencia de los movimientos en masa. Esa actitud y carencia de importancia hacia los daños que puede causar los movimientos en masa podría conllevar a pérdidas humanas, daños en infraestructuras e impactar negativamente en el ambiente.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general.

¿Cuáles son las áreas susceptibles a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto, distrito de Cátac, provincia de Recuay, región Áncash?

1.1.2.2 Problemas específicos.

- ¿Mediante un diagnóstico se pueden identificar los factores físicos presentes la subcuenca Pachacoto que hacen posible la generación de los movimientos en masa?
- ¿De qué manera se puede agrupar y/o clasificar la susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto?
- ¿Cuál sería la zonificación según el grado de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes nacionales

Sosa (2016) Análisis de susceptibilidad a los peligros geológicos por movimientos en masa - poblados de Pampamarca y Acobamba, región Huánuco. Indica que, a consecuencia del fenómeno de inmigración poblacional, se han generado asentamientos humanos en zonas vulnerables a la ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa; condición que se

observa en los poblados de Pampamarca y Acobamba, región Huánuco. Por ello, se tiene como objetivo principal identificar los factores condicionantes que favorecen a la ocurrencia de los eventos de tipo movimiento en masa y determinar los factores detonantes de los eventos identificados. La metodología que se usó en el trabajo de investigación, comprende de tres etapas, etapa de preparación y recolección de datos (Gabinete I), etapa de campo y etapa de procesamiento de datos (Gabinete II). Para esta investigación se utilizó el método de Análisis Estadístico Bivariante el cual requiere preparar previamente mapas temáticos de cada factor condicionante que genera los movimientos en masa, por lo cual se ponderan por separado. Estos mapas de los factores condicionantes serían el mapa litológico, geomorfológico, pendiente, hidrogeológico y cobertura vegetal. Por consiguiente, se establece los diferentes grados de susceptibilidad a movimientos en masa derivado de los valores asignados a las unidades de cada factor condicionantes. Se realiza un análisis automatizado de los datos aplicando el Método Bivariante arrojando como producto el mapa de susceptibilidad. En el mapa se identifica que el 33.11% del territorio comprendido en la zona estudiada presenta muy baja susceptibilidad, el 25.8 % baja susceptibilidad, el 4.22 % moderada susceptibilidad, el 21.73 % alta susceptibilidad y 15.06 % presenta muy alta susceptibilidad.

Tacilla (2019) Estimación de áreas susceptibles por movimientos de masa en la cuenca hidrográfica del río Chonta - Cajamarca. El objetivo de esta investigación fue analizar el impacto de los procesos geodinámicos, como los deslizamientos y derrumbes, en la Cuenca Hidrográfica del Río Chonta y evaluar la susceptibilidad de áreas específicas a estos movimientos de masa. Se empleó el Método de Evaluación Multicriterio para ponderar factores condicionantes como la litología, la pendiente, la geomorfología y la cobertura vegetal, y se procesaron los datos a través de los Sistemas de Información Geográfica. Los resultados mostraron que el 3.78% del área total, ubicada en los alrededores del Río Chonta, al noreste del Centro Poblado de Otuzco y en la parte central de la Cuenca entre los Centros Poblados de

Combayo y Sangal, presentan alta susceptibilidad a movimientos de masa debido a su composición de depósitos cuaternarios, alta pendiente, pobre cobertura vegetal y unidades de colinas y lomadas. Además, se identificaron 46 procesos geodinámicos ocurridos en el área, la mayoría de los cuales fueron de tipo deslizamiento. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la seguridad de la población local y sugieren la necesidad de tomar medidas preventivas para minimizar el riesgo de futuros eventos.

Aricochea (2016) Zonificación de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la cuenca del Río Omayá, Distrito de Pichari, Provincia de La Convención – Región Cusco. La investigación se enfoca en la cuenca del río Omayá, ubicada en el distrito de Pichari, en el extremo oeste de la provincia de La Convención, departamento de Cusco. Esta zona ha sido afectada históricamente por movimientos de remoción en masa, los cuales han generado pérdidas económicas significativas en la población y en los campos agrícolas de la cuenca. El objetivo principal del estudio es la zonificación de susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la cuenca del río Omayá, a una escala de 1:25,000. Para ello, se empleó el Sistema de Información Geográfica (SIG) ARCGIS versión 10.2 para elaborar los mapas de susceptibilidad, así como los de sus parámetros: geológico, geomorfológico, pendiente, uso actual del suelo y características taxonómicas del suelo. Se utilizó el método estadístico bivariante para determinar la susceptibilidad de la zona, el cual emplea la densidad del área de los movimientos de remoción en masa que han ocurrido en la zona de estudio para asignar un peso según las características que presenta cada parámetro por movimiento. Finalmente, se sumaron los mapas por cada tipo de movimiento en masa para obtener un mapa de susceptibilidad final, valorizada de 1 a 5, donde 1 corresponde a muy baja susceptibilidad y 5 a muy alta susceptibilidad. El área de estudio comprende una superficie total de 30,160,469 km² (medida en el SIG) y se encuentra ubicada en las coordenadas UTM: N 8, 613,000.000 - E 632,004.000 (WGS_1984_UTM_Zone_18S). Los resultados obtenidos pueden ser de gran

utilidad para la prevención y mitigación de los riesgos asociados a los movimientos de remoción en masa en la zona de estudio.

León y Montenegro (2021) Análisis y determinación de zonas susceptibles para mitigar los efectos de movimientos en masa, Caserío Jancos, Provincia San Pablo, Región Cajamarca, 2021. El propósito de esta investigación es determinar y analizar las zonas de los taludes del caserío Jancos en la provincia de San Pablo, Región Cajamarca, que son susceptibles a movimientos en masa con el objetivo de proponer medidas de mitigación. La investigación tiene un enfoque descriptivo y un diseño no experimental y de corte transversal. Se realizaron dos calicatas de suelo en cuatro estaciones, de donde se extrajeron muestras representativas de roca para analizar sus propiedades físicas y mecánicas. También se recolectaron datos sobre las características geomorfológicas, la cobertura vegetal, la litología, las pendientes y las precipitaciones. Estos datos fueron procesados mediante el método de Análisis Jerárquico para obtener un índice de susceptibilidad a los movimientos en masa. Los resultados indicaron que las cuatro estaciones tienen un índice de susceptibilidad alta y muy alta, y se propusieron medidas de mitigación que incluyen cambios en la geometría del talud, la aplicación de geomallas y geoceldas, y la construcción de zanjas de coronación en los taludes cercanos a las quebradas.

1.2.2 Antecedentes internacionales

Ibadango y Segovia (2017) Zonificación y evaluación de amenazas por deslizamientos y caídas de roca en el cantón Guano - Provincia de Chimborazo, escala 1: 25 000. Universidad Central del Ecuador, Ecuador. En la investigación se describe el estudio realizado en el cantón Guano de la provincia de Chimborazo, como parte del proyecto "Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio a Nivel Nacional escala 1: 25 000". El objetivo principal de la investigación es mejorar el modelo utilizado por el Instituto Espacial

Ecuatoriano (IEE) para el análisis y zonificación de amenazas por deslizamientos y caídas de roca en el cantón Guano, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica. Se ha utilizado el método Mora-Vahrson modificado y se ha calibrado con observaciones realizadas en campo. Los resultados se han clasificado en 4 categorías de amenaza (alto, medio, bajo y nulo) y se han comparado con los modelos generados por el IEE en el año 2012. Se ha concluido que la actualización cartográfica a escala 1:25, 000 ha mejorado significativamente la descripción de las geoformas presentes en el cantón, así como las características de génesis, morfología, geología, desnivel relativo y pendiente.

Contreras (2021) Evaluación de susceptibilidad a movimientos de masas en la microcuenca honda del cantón Zaruma, provincia de El Oro, Ecuador. Universidad de Guayaquil, Ecuador. En esta investigación se analiza la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, los cuales se originan a partir de la relación entre factores intrínsecos del terreno y factores desencadenantes. Para llevar a cabo el análisis se utilizó un enfoque de análisis espacial multicriterio, aplicando los criterios de Mora-Vahrson y los parámetros de geología, pendiente, geomorfología y uso del suelo como factores condicionantes, y la precipitación como factor desencadenante. A través de la ponderación de criterios y el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se identificaron áreas de mayor o menor susceptibilidad, representadas en un mapa de Susceptibilidad, utilizando la tabla de clasificación de susceptibilidad de Mora. El área de menor susceptibilidad cubre 5.07 Km², mientras que las áreas moderadas abarcan 4.1 km², donde se registran la mayoría de los procesos de remoción en masa. Se empleó la Tabla Saaty y el juicio de expertos para asignar ponderaciones a los criterios de acuerdo a su importancia.

Rojas (2019) Susceptibilidad por movimientos en masa, usando sistemas de alta precisión en el municipio de San Eduardo, Boyacá. Universidad de los Andes, Colombia. Nos

indica que se utilizó Sistemas de Información Geográfica (SIG) y fotogrametría para crear un mapa de susceptibilidad de movimientos en masa. Se utilizó una red neuronal artificial, la cual fue entrenada y simulada con nueve parámetros altamente relacionados con los riesgos de movimientos en masa. El modelo se construyó con 18 neuronas y se utilizó el algoritmo Bayesian Regulator para alcanzar los valores óptimos de R^2 y el MSE. El resultado final es un modelo de clasificación de cinco categorías, en el que la categoría de baja susceptibilidad es la de mayor porcentaje (53,81%) y abarca la zona rural de San Eduardo. En segundo lugar, con un porcentaje del 23,14%, se encuentra el rango de susceptibilidad muy alto, el cual corresponde a las áreas donde se han producido deslizamientos masivos y, por lo tanto, existe un alto riesgo de recurrencia

Osorio (2019) Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno a los Deslizamientos. Caso de Estudio: Nariño – Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. El objetivo principal de esta tesis es realizar una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizamientos en el corredor vial Cano-Mojarras, una zona de 89 km de longitud ubicada en los departamentos de Cauca y Nariño en el suroccidente de Colombia. Para lograr esto, se propone el concepto de corredor hidro-geomorfométrico, una metodología que utiliza el paisaje para delimitar áreas de estudio enfocadas en proyectos de susceptibilidad en corredores viales. Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) para calcular los puntos de acumulación y microcuencas que se superponen con el eje de la vía. El Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos (LSI) se obtuvo mediante un método estadístico bivariado propuesto por Van Westen (2000), utilizando el 80% de los registros de un inventario de deslizamientos en el área de estudio. Para determinar los factores condicionantes de la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos, se utilizaron la pendiente, el aspecto, la curvatura, el índice topográfico de humedad (TWI), la densidad de drenajes, la cobertura del suelo, la litología y el número de curva de escorrentía. Estos factores geomorfométricos se calcularon mediante

geoprocesamiento utilizando un DEM (Alos Palsar) con una resolución espacial de 12.5 m. La cobertura del suelo se obtuvo aplicando la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia y la litología se obtuvo del mapa geológico nacional (1:100.000; Servicio Geológico Colombiano). El número de curva de escorrentía se obtuvo mediante la metodología propuesta por Natural Resources Conservation Service, EE. UU (2004). De los 89 km de vía estudiados, se encontró que 45 km se encuentran en zonas de susceptibilidad alta o muy alta a los deslizamientos, mientras que los 44 km restantes están en zonas de susceptibilidad moderada, baja o muy baja.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Identificar las áreas susceptibles a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diagnóstico de la subcuenca Pachacoto con la finalidad de identificar a los factores físicos que influyen a la generación de los movimientos en masa.
- Realizar la estratificación con la finalidad de agrupar y clasificar la susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.
- Zonificar según el grado de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación teórica

Para identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa se necesita de las ponderaciones, las cuales se obtienen mediante el PAJ para su próxima superposición ponderada obteniendo la estimación de la susceptibilidad en la Subcuenca Pachacoto. Es por ello que, este proceso efectivamente permite estimar la susceptibilidad y poder predecir qué áreas son mayormente susceptibles a los movimientos en masa.

1.4.2 Justificación metodológica

La presente investigación contribuirá con una metodología la cual está basada en el PAJ que podrá ser utilizada en las subcuencas vecinas y para áreas de estudio que se encuentren dentro del ámbito del Callejón de Huaylas, permitiendo proponer planes para la mitigación y/o protección ante el evento de movimiento en masa.

1.4.3 Justificación práctica

La presente investigación permitirá identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto mediante un mapa de zonificación según el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa con la finalidad de contribuir con información técnico-científica para uso preventivo, de mitigación y protección.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis afirmativa

Las áreas susceptibles altas y muy altas a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto serán influenciadas por la unidad litológica de mayor ponderación, siendo esta la unidad litológica de la Formación Chicama en conjunto con las pendientes mayores a los 45°.

1.5.2 Hipótesis nula

Las áreas susceptibles altas y muy altas a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto no serán influenciadas por la unidad litológica de mayor ponderación, siendo esta la unidad litológica de la Formación Chicama en conjunto con las pendientes mayores a los 45°.

II MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1 *Susceptibilidad*

La susceptibilidad es la probabilidad de experimentar y/o recibir una determinada acción o evento la cual se desarrolla sobre una persona o cosa. (Real Academia Española, 2005).

Dependiendo de los factores condicionantes y desencadenantes del fenómeno y del ámbito de estudio, se tiene a la susceptibilidad como la predisposición, séase alta o baja, de que un determinado evento se manifieste en algún determinado ámbito geográfico. (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2015).

2.1.2 *Movimientos en masa*

Un movimiento en masa es un movimiento externo que tiene por agente de transporte el agua que impregna y dirige material litológico pendiente abajo. (Crozier, 1986).

Los movimientos en masa son todos aquellos movimientos de ladera hacia abajo de una masa de roca, detritos o tierras a favor de la gravedad. (Cruden D. , 1991).

2.1.2.1 **Clasificación de movimientos en masa.**

Se presenta cinco tipos de movimientos en masa que se desarrollan en rocas o suelos complementándose con características cinemáticas, asociándose a posibilidades de prevención. Los principales criterios utilizados en la clasificación son de tipo de movimiento principalmente seguido por el tipo de material. Principalmente, se divide en cinco grupos y se

encuentra un sexto grupo el cual es denominado movimiento complejo incluyendo dos o más tipos de movimientos en masa. (Varnes, 1978).

Tabla 1

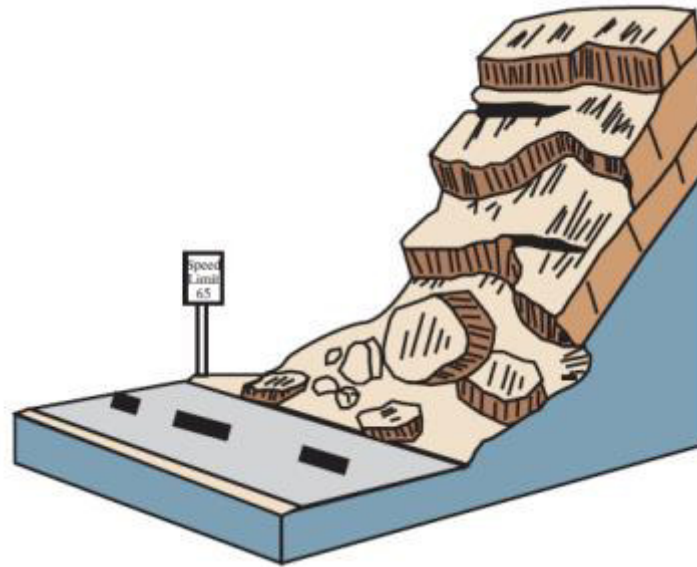
Clasificación de movimientos en masa

Tipo de movimiento		Tipo de material	
		Roca	Suelo
			Predominante grueso Predominante fino
Caída		Caída de roca	Caída de detritos
Vuelco		Vuelco de roca	Vuelco de detritos
Deslizamiento	Rotacional	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos
	Traslacional		
Expansiones Laterales		Extensión lateral en roca	Expansión lateral en detritos
Flujo		Extensión en roca (arrastramiento profundo)	Flujo de detritos
Complejo		Combinación de dos o más principales tipos de movimientos	

Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

2.1.2.1.1 Caída

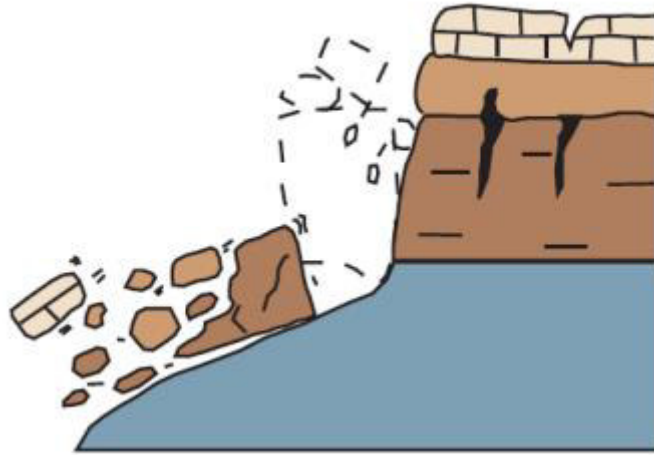
Se trata de un tipo de fenómeno de remoción en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se separan de una pendiente, sin que haya un desplazamiento cortante significativo a lo largo de la superficie. Luego de desprenderse, el material cae y se desplaza principalmente por el aire, lo que puede generar impactos, rebotes y rodaduras. (Varnes, 1978).

Figura 1*Caída de rocas*

Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

2.1.2.1.2 Vuelco

Se refiere a un movimiento de masa en el cual se produce la rotación de una masa de suelo, roca o detritos en torno a un eje o pivote definido por su centro de gravedad. Este movimiento se produce hacia la parte exterior de la masa y puede implicar basculamiento o inclinación, pero no necesariamente resulta en un colapso completo de la masa. Con frecuencia, este tipo de movimiento ocurre en uno o más planos de falla en materiales que presentan sistemas preferenciales de discontinuidades, tales como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares. (Varnes, 1978).

Figura 2*Vuelco de rocas*

Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

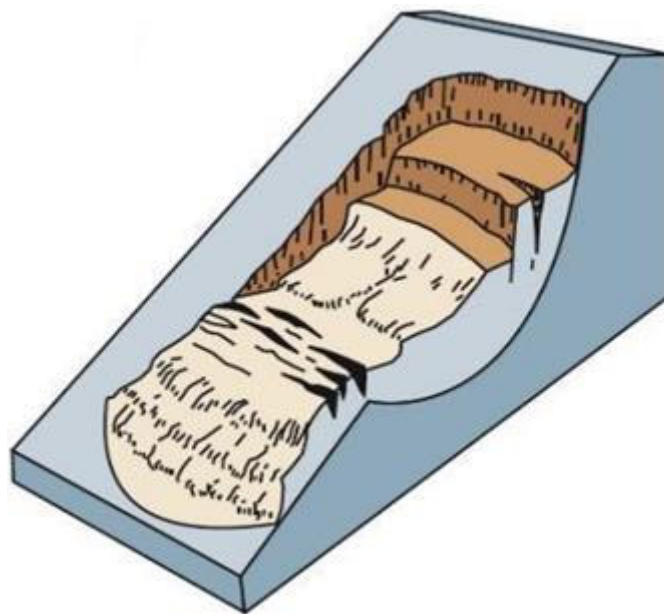
2.1.2.1.3 Deslizamientos

En el sistema de Varnes se clasifican los deslizamientos según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales. También optan por reconocer al deslizamiento de tipo compuesto. Este tipo de movimientos en masa involucran rocas sedimentarias detríticas, intercalaciones de suelos de origen cuaternario como coluvio-deluviales, deluviales y proluviales. (Varnes, 1978).

Los deslizamientos rotacionales son aquellos que se producen en forma cóncava a lo largo de una superficie curvilínea. El centro de gravedad del material litológico deslizado experimenta un giro según su eje. El material de cabecera efectúa una inclinación contra ladera, generando depresiones donde se acumula el agua e induce nuevas reactivaciones. Especialmente en los materiales arcillosos hay presencia de agua, el cual se puede transformar en un deslizamiento de tierras. (Coraminas & García, 1997).

Figura 3

Deslizamiento rotacional



Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

Figura 4

Deslizamiento rotacional en el Cerro Mizhquiyacu en Ecuador en el año 1993

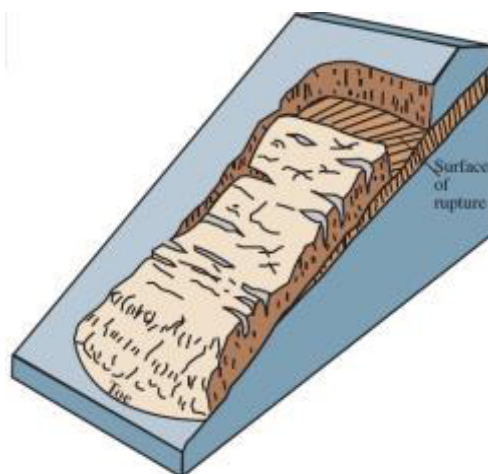


Nota. Tomada de Proyecto Multianual Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, 2007.

Los deslizamientos traslacionales son aquellos que se producen sobre una superficie plana y perpendicular. Este tipo de deslizamiento suele ser más superficial que el rotacional y el desplazamiento del material litológico se produce a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas y planos de estratificación entre la roca y el suelo residual que yace sobre ella. (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 5

Deslizamiento traslacional



Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

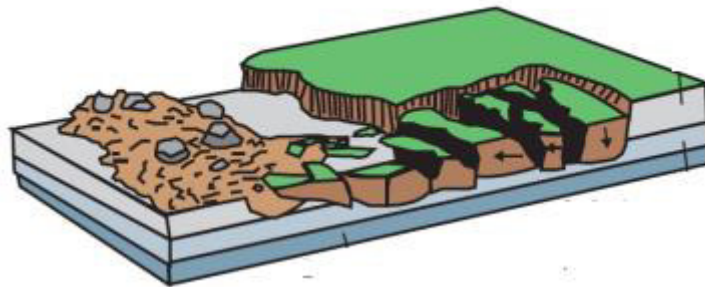
2.1.2.1.4 Expansiones laterales

Este tipo de movimiento en masa se caracteriza principalmente por su deformación interna ocasionada por el estiramiento o la expansión del material litológico. Al momento de originarse un deslizamiento o flujo implican algún grado de expansión. Estos, a su vez, se consideran la última etapa de movimientos de deformación interna, la cual predomina sobre

otro tipo de mecanismos de desplazamiento como los que predominan el deslizamiento o flujo. (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas, 2007).

Figura 6

Expansión lateral



Nota. Adaptada de “Slope movement types and processes”, Varnes, 1978.

2.1.2.1.5 Flujos

Son movimientos espacialmente continuos, de poca duración y difíciles de observar. La distribución de velocidades no es homogénea y suelen involucrar todos los tipos de materiales y se clasifican en función de su contenido, por lo tanto, se dividen en flujos de rocas, flujos o corrientes de derrubios o detritos y flujos de arena o suelo. (Cruden & Varnes, 1996).

Figura 7

Flujo de detritos en la cuenca del río Checras



Nota. Proyecto Multianual Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, 2007.

2.1.2.1.6 Movimientos complejos

Deformación en la ladera la cual es producida por combinación en conjunto y de manera sucesiva de los diferentes tipos de movimientos en masa a través de un período en el cual se encuentra desarrollándose el movimiento. En su mayoría se encuentra asociado a movimientos de tipo no tan superficiales y con mayor volumen de material litológico, como es el caso de los deslizamientos y flujos. (Chacón, 2012).

Figura 8

Movimiento complejo



Nota. Proyecto Multianual Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, 2007.

2.1.3 Susceptibilidad a movimientos en masa

Está referido a la probabilidad de ocurrencia del movimiento en masa en una región bajo un ambiente geológico específico y condiciones desencadenantes, lo cual hace crucial la prevención y el control de riesgo por movimiento en masa. (Chang et al., 2022).

2.1.4 Cuenca y subcuenca hidrográfica

Se tiene a la cuenca hidrográfica como el área de terreno cuya escorrentía superficial se desplaza a través de una red de lagos, quebradas y ríos con dirección hacia una única desembocadura, por lo general desembocan en algún océano o mar en forma de delta o estuario, siendo esta una unidad de gestión del recurso a la cual se le considera indivisible. En segundo

orden, se tiene a la subcuenca hidrográfica, la cual tiene como definición área de terreno cuya escorrentía superficial se desplaza a través de una red de lagos, quebradas y ríos con dirección hacia un determinado punto de un curso de agua que, por lo general, se trata de un lago o alguna confluencia de ríos. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.).

2.1.5 Factores físicos

También denominados como factores abióticos, son todos aquellos que se encuentran dentro de un ecosistema, los cuales se caracterizan principalmente porque son abióticos (sin vida) o inertes. (Ministerio de Educación [MINEDU], 2005).

Tabla 2

Componentes ambientales para el medio físico

Medio	Componente ambiental	Factores ambientales
Físico	Fisiografía	Geomorfología
		Geología
		Geoquímica
		Sismotectónica
		Topografía
	Aire	Clima y meteorología
		Calidad de aire
		Ruido
		Vibraciones
		Radiaciones No Ionizantes
	Agua superficial	Caudal
		Calidad
	Agua subterránea	Calidad
		Hidrogeología
	Suelos	Suelo/Calidad de suelo
		Uso actual/Capacidad de uso mayor de tierras

Nota. Adaptada del Ministerio del Ambiente, 2009.

2.1.6 Factores condicionantes

Son aquellos factores propios del ámbito geográfico, el cual aporta de manera favorable, en algunos casos no, al desarrollo de los fenómenos de origen natural. Estos parámetros han estado y seguirán presentes, dando así un reconocimiento y particularidad a

dicho ámbito geográfico. (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2015).

Tabla 3

Factores condicionantes de peligro

Factores condicionantes	Descripción
Geología	Esta disciplina se enfoca en el análisis de la estructura externa e interna de la Tierra, la composición de sus materiales y la forma en que se formaron, así como en los cambios y modificaciones que han ocurrido en estos procesos desde su origen.
Geomorfología	Disciplina que se enfoca en el estudio de las características y formas superficiales del terreno, buscando describirlas, clasificarlas y explicar su origen y evolución a través del tiempo.
Fisiografía	Descripción de los aspectos naturales del paisaje terrestre; relieve, modelado, vegetación, suelos, etc.
Hidrología	Esta disciplina se enfoca en la exploración de las características y dinámicas del agua, tanto en términos de su distribución espacial y temporal, como de sus propiedades físicas y químicas. Incluye el análisis de fenómenos como la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la estabilidad de las masas de hielo glaciar.
Edafología	Esta área de estudio se enfoca en la comprensión de la naturaleza y características de los suelos, y su interacción con los organismos vivos que habitan en ellos.

Nota. Adaptada del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), 2015.

2.1.7 Factores desencadenantes

Son aquellos parámetros que desencadenan eventos y/o sucesos asociados que pueden dar origen a un desastre natural en un determinado ámbito geográfico. Entre los factores desencadenantes más conocidos tenemos a la precipitación y a los sismos. (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2015).

Tabla 4*Factores desencadenantes del peligro*

Factores condicionantes	Descripción
Hidrometeorológicos	Lluvias, temperatura, viento, humedad del aire, brillo solar, etc.
Geológicas	Colisión de placas tectónicas, zonas de actividad volcánica, fallas geológicas, movimientos en masas, desprendimientos de grandes bloques, etc.
Inducidas por el ser humano	Actividades económicas, sobre explotación de recursos naturales, infraestructura, asentamientos humanos, crecimiento demográfico, etc.

Nota. Adaptada del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), 2015.

2.1.8 Estratificación

Es la organización en diferentes partes de algo en capas o grupos separados. (Cambridge University Press, s.f.).

2.1.9 Zonificación

Es la división de un ámbito o área geográfica en formas heterogéneas las cuales se dividen bajo ciertas características, como puede ser la intensidad de una amenaza y grado de riesgo. (National Academy of Sciences, 2009).

III MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

Se trata de una investigación de tipo cuantitativa, ya que representa un conjunto de procesos secuenciales con la finalidad de probar la hipótesis. (Hernández et al., 2014).

En cuanto al diseño es no experimental, ya que se observaron eventos ya existentes, como son los movimientos en masa ocurridos dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto, los cuales son producto de los factores físico del área de estudio. En este tipo de investigaciones las variables independientes, en este caso los movimientos en masa, simplemente ocurren y no se pueden manipular ni influir sobre ellas porque ya ocurrieron. (Hernández et al., 2014).

Por otro lado, la investigación tendría un nivel explicativo, ya que nos centraremos en investigar las causas que originan o condicionan el origen de los movimientos en masa. (Hernández et al., 2014).

3.2 Ámbito temporal y espacial

3.2.1 *Ámbito temporal*

La realización de la presente investigación se encuentra ubicada temporalmente desarrollada a principios del año 2022 hasta inicios del año 2023.

3.2.2 *Ámbito espacial*

El área de estudio se encuentra delimitada por la subcuenca Pachacoto, políticamente esta subcuenca se encuentra en el distrito de Cátac, provincia de Recuay, región de Ancash y ubicada dentro del Callejón de Huaylas, en la parte sur del flanco oriental de la cordillera Blanca.

Hidrográficamente pertenece a la cuenca del río Santa, la cual a su vez pertenece a la cuenca hidrográfica del Pacífico.

3.3 Variables

3.3.1 Operacionalización de variables

Tabla 5

Tabla de operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual de variables	Dimensiones	Indicadores / Descriptores	Unidad
Variable dependiente: Áreas susceptibles	Área que está referida a una mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra (CENEPRED, 2015).	Litología	Fm. Chicama Grp. Goyllarisquizga Depósitos morrénicos Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial Grupo Calipuy Depósitos aluviales	Hectáreas (Ha)
		Geomorfología	Montaña con cobertura glacial Montaña estructural Morrenas Detrito Fluvio Glacial Valle glacial con lagunas Terraza aluvial	Hectáreas (Ha)
		Pendiente	Escarpada Muy fuerte Fuerte Moderada Suave Casi a nivel	Grados (°)
		Cobertura vegetal	Área altoandina con escasa y sin vegetación Glaciar Pajonal andino Matorral arbustivo Bofedal Lagunas, lagos y cochas	Hectáreas (Ha)

		Anomalía de precipitación	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	Porcentaje (%)
Variable independiente: Movimientos en masa	Aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efecto de la gravedad (Cruden, 1991).	Caída Vuelco Deslizamiento Expansiones laterales Flujo	Material litológico	Metros cúbicos (m ³)

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

Se consideró como población al área en hectáreas de la subcuenca Pachacoto. Para ello se tiene como población a las 20 262.72 Ha de la subcuenca Pachacoto.

3.4.2 Muestra

Se tiene como muestra el campo de visión del investigador, para lo cual se tiene 50 metros alrededor del campo de visión del investigador a través del tramo de carretera que va desde la Carretera Longitudinal de la Sierra Norte hacia el nevado Pastoruri, comprendiendo de una distancia de 28.6 km. Esto se entendería como un área delimitada por un “buffer” de 50

metros alrededor de la carretera recorrida por el investigador, por lo cual se tiene como muestra 294.04 Ha.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Instrumentos de recolección de datos

- Ficha de levantamiento en campo para recojo de información de tipos de movimientos en masa llamada “Inventario de movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto”. Ver Anexo I.

3.5.2 Materiales

- Hoja geológica N°20i Recuay a escala 1:100,000.
- Archivo shapefile de Geomorfología extraído del geoportal GEOCATMIN del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), el cual está basado en el Mapa Geomorfológico del Perú (2016).
- Modelo de Elevación Digital (DEM) del sensor ALOS-PALSAR con resolución espacial de 12.5m.
- Mapa Nacional de Cobertura Vegetal del Ministerio del Ambiente (MINAM).
- Mapas de anomalía de precipitación mensual de los meses de enero a junio del año 2022 obtenidos en la página oficial del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.5.3 Equipos

- Cámara fotográfica de celular Poco X4 Pro de 108 Megapíxeles.
- Laptop Toshiba i5.
- GPS de aplicativo móvil “Time Stamp”

3.5.4 Programas

- Google Earth Pro.
- ArcMap 10.5.
- Microsoft Word.
- Microsoft Excel.

3.6 Procedimientos

3.6.1 Procedimiento para realizar el diagnóstico de la subcuenca Pachacoto

En este apartado se realizó la búsqueda, recolección y revisión de material bibliográfico de los gobiernos locales, regionales e instituciones técnicas científicas, tales como el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), Ministerio del Ambiente (MINAM) y del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), así como también la descarga de los diferentes insumos de shapefiles y el Modelo de Elevación Digital (DEM) con la finalidad de describir las características físicas del área de estudio.

3.6.1.1 Geología

Con la hoja geológica N° 20i en escala 1:1000 obtenida a través del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), hoja en la cual se encuentra ubicada la subcuenca Pachacoto, se identificaron seis unidades litológicas dentro de la subcuenca Pachacoto las cuales se enlistan a continuación.

- ✓ Formación Chicama
- ✓ Grupo Goyllarisquizga
- ✓ Depósitos morrénicos

- ✓ Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial
- ✓ Grupo Calipuy
- ✓ Depósitos aluviales

3.6.1.2 Geomorfología

Por medio del insumo de shapefile de Geomorfología, el cual tiene como fuente de descarga el geoportal GEOCATMIN del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) donde se identificaron, al igual que en la temática de geología, seis unidades geomorfológicas las cuales se enlistan a continuación.

- ✓ Montaña con cobertura glacial
- ✓ Montaña estructural
- ✓ Morrenas
- ✓ Detrito Glacio Fluvial
- ✓ Valle glacial con lagunas
- ✓ Terraza aluvial

3.6.1.3 Cobertura vegetal

De igual manera, se tiene al Mapa Nacional de Cobertura Vegetal del Ministerio del Ambiente (MINAM) en el cual identificaron los diferentes tipos de cobertura vegetal que se encuentran presentes en la subcuenca Pachacoto, por lo cual se tiene seis tipos de cobertura vegetal enlistados a continuación.

- ✓ Área altoandina con escasa y sin vegetación
- ✓ Glaciar
- ✓ Pajonal andino
- ✓ Matorral arbustivo

- ✓ Bofedal
- ✓ Lagunas, lagos y cochas

3.6.1.4 Pendientes

Se realizó la búsqueda y descarga del Modelo de Elevación Digital (DEM) del sensor ALOS-PALSAR el cual cuenta con una resolución espacial de 12.5m con la finalidad de obtener información de curvas de nivel y pendientes para la subcuenca Pachacoto. Para el ámbito de estudio se tiene la siguiente clasificación de pendientes.

- ✓ Pendiente escarpada (mayor a 45°)
- ✓ Pendiente muy fuerte (entre 25° y 45°)
- ✓ Pendiente fuerte (entre 15° - 25°)
- ✓ Pendiente moderada (entre 5° - 15°)
- ✓ Pendiente suave (1° - 5°)
- ✓ Pendiente casi a nivel (Menores a 1°)

3.6.1.5 Anomalía de precipitación

Para finalizar, se realizó la búsqueda y recolección de información respecto a la anomalía de la precipitación entre los meses de enero hasta junio del 2022. Dicha información es consultada en la página web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

3.6.2 *Elaboración y preparación de ficha para levantamiento de información y salida a campo*

Finalizado el diagnóstico e identificadas las diferentes características físicas de la subcuenca Pachacoto se elaboró la ficha de levantamiento de campo, instrumento que nos

permitió identificar y ubicar los diferentes movimientos en masa que han ocurrido en la subcuenca Pachacoto. Para ello se tiene la ficha de levantamiento “Inventario de movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto”, la cual se visualiza en el Anexo I.

Posteriormente, se programó la visita de campo al área de estudio para la recolección y ubicación de los diferentes tipos de movimientos en masa, verificación de las unidades litológicas, unidades geomorfológicas, unidades de cobertura vegetal e información histórica proveniente de las personas flotantes que se encontraron en la subcuenca Pachacoto. Mientras se realizó el inventariado de los tipos de movimientos en masas en la subcuenca Pachacoto, se tomaron coordenadas UTM de cada movimiento en masas encontrado y se les realizó un registro fotográfico, los cuales se pueden visualizar en el Anexo III.

Terminada la visita de campo se vació la información en medios digitales para su fácil manejo y análisis. Para el inventario realizado de movimientos en masa se arrojó la información en una hoja de cálculo Excel para georreferenciarlas en un Sistema de Información Geográfica, como es el ArcMap 10.5, para reconocer que unidades de los parámetros físicos presentes determinan y caracterizan a los diferentes tipos de movimientos en masa inventariados. Paralelamente, se realizó la verificación de la información obtenida en el diagnóstico con la información presente en campo. El inventario se podrá visualizar en el Anexo IV.

3.6.3 Procedimiento para la estimación de la susceptibilidad y realizar la estratificación de la susceptibilidad

La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores físicos que contribuyen a la formación de los movimientos en masa. Por ello, los mapas de susceptibilidad se realizan a partir de insumos cartográficos de tipo topográficos (pendientes), geomorfológico, litológico-estructural, vegetación y otros. Por ello, se considera que, a partir

del análisis de los factores físico presentes, extrapolando los resultados a partir de este análisis, se elabora el mapa de susceptibilidad. (Carcedo & Corominas, 2003).

Por lo tanto, en primera instancia, se analizaron los parámetros físicos mediante el PAJ en una hoja de cálculo Excel, para luego analizar los descriptores mediante el mismo proceso para obtener la ponderación o relevancia de cada factor físico con sus respectivos descriptores. Realizado todo esto, se obtuvo una matriz la cual contiene las ponderaciones de cada uno de los factores físicos y sus respectivos descriptores, así como también se tiene los rangos decimales que representarían los grados de susceptibilidad en la subcuenca Pachacoto.

3.6.4 Procedimiento para realizar la zonificación según el grado de susceptibilidad

Para obtener la zonificación de la susceptibilidad nos basaremos en el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto. Para ello, se agregó un nuevo atributo a los shapefiles de los factores condicionantes, así como al shapefile del factor desencadenante el cual tiene el valor de su respectiva ponderación, el cual se conoce a través del Proceso Analítico Jerárquico realizado anteriormente.

Seguidamente, se realizó la transformación a ráster de los shapefiles teniendo como valor a la ponderación. Obtenido todo los ráster de cada shapefile se realiza el geoproceto denominado “Weighted Overlay” el cual nos arrojó un ráster producto con los valores de celda las cuales están entre los rangos de valores que se hallaron en el Proceso Analítico Jerárquico, permitiéndonos clasificar según el grado de susceptibilidad e identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa.

Finalmente, se obtuvo como producto final el mapa de zonificación según el grado de susceptibilidad el cual refleja las áreas susceptibles a los movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto.

3.7 Análisis de datos

En este apartado se analizaron los datos del diagnóstico, así como también los datos obtenidos posteriormente. Se utilizaron estos datos para estimar la susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto mediante el PAJ.

3.7.1 *Análisis de datos del diagnóstico de la subcuenca Pachacoto*

3.7.1.1 Geología

La subcuenca Pachacoto se ubica dentro del cuadrángulo de Recuay, correspondiente a la hoja geológica N° 20i en la escala 1: 100 000, la cual nos indica que se encuentran presentes unidades geológicas tales como el batolito de cordillera Blanca, complejo plutónico el cual aflora en la zona norte de la subcuenca Pachacoto, presentando rocas ígneas como la granodiorita y tonalita.

Desde el punto de vista estratigráfico y basándonos en el mapa geológico del cuadrángulo de Recuay, la edad de las rocas data de las eras mesozoica y cenozoica, entre los sistemas del Jurásico, Cretáceo y Cuaternario.

Litológicamente, las rocas que predominan en el cuadrángulo de Recuay corresponden a rocas ígneas (intrusivas y volcánicas), depósitos inconsolidados de la era del cuaternario y rocas de tipo sedimentarias.

Presentes también algunas formaciones que no pertenecen a un grupo en concreto, como las formaciones Celendín, Chulec, Jumasha, Pariatambo y Pariahuanca, que se caracterizan principalmente por la presencia de calizas, roca sedimentaria compuesta por carbonato de calcio, las cuales se pueden encontrar hacia la parte este y noreste de la subcuenca Pachacoto.

Figura 9

Columna Lito-estratigráfica de la hoja N° 20i – Cuadrángulo de Recuay

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS			ROCAS IGNEAS		
C E N O Z O I C A	CUATERNARIO		Depósito Aluvial		Qh-al	Intrusivos Neógenas	N-rd	Riodacitas
			Depósito Glaciofluvial		Qh-gf		N-rd/da	Riodacitas/dacitas
			Depósitos Morénicos		Q-mo		N-mzgr	Monzogranito
					Q-mo1		Nm-cb/gd,to	Granodiorita
					Q-mo2			Tonalita
GRUPO CALIPUY	superior	PN-ca_s						
	medio	PN-ca_m						
	inferior	PN-ca_i						
M E Z O Z O I C A	CREATACEO	SUPERIOR	Formación Celendín		Ks-ce			
			Formación Jumasha		Ks-ju			
			Formación farrat		Ki-fa			
		INFERIOR	GRUPO GOYLLARISQUIZGA	Formación chulec			Ki-chu	
				Formación Pariatambo			Ki-pt	
				Formación Pariahuanca			Ki-ph	
				Formación Carhuaz			Ki-ca	
				Formación Santa		Ki-sa		
				Formación Chimú		Ki-chi		
				Formación Oyón		Ki-oy		
		JURASICO	SUPERIOR	Formación Chicama		Js-chic		

Nota. Extraído del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

3.7.1.1.1 Formación Chicama

Se encuentra conformada principalmente por rocas de tipo sedimentarias, como son las lutitas grises a oscuras negras, también algunas de tipo metamórficas como pizarras con intercalaciones delgadas de areniscas, areniscas grises, areniscas cuarzosas, sublíticas a

subarcólicas, interestratificadas con lutitas gris oscuras, pizarrosas en estratos cuyos grosores varían entre 10 a 80 cm en promedio.

Se encuentra conformada principalmente por rocas de tipo sedimentarias, como son las lutitas grises a oscuras negras, también algunas de tipo metamórficas como pizarras con intercalaciones delgadas de areniscas, areniscas grises, areniscas cuarzosas, sublíticas a subarcólicas, interestratificadas con lutitas gris oscuras, pizarrosas en estratos cuyos grosores varían entre 10 a 80 cm en promedio.

Las rocas sedimentarias de lutita de la Formación Chicama están ubicadas en la misma capa que las areniscas y han sufrido cierto grado de metamorfismo debido a una falla regional en la Cordillera Blanca. A pesar del metamorfismo, todavía conservan características de su formación original, como la presencia de pirita y algunos nódulos ferruginosos, principalmente en el área oriental. (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET], 2003).

Las rocas de la formación Chicama son blandas, debido a la cantidad del material limo arcilloso, por lo cual son propensos a desarrollarse donde hay una combinación de taludes empinados e inestables. Este tipo de formación y litología se pueden encontrar en la parte norte dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Figura 10

Unidad litológica Formación Chicama dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

En este cuadrángulo se encuentran presentes dos grandes grupos, los cuales tienen formaciones que se encuentran no solo en este cuadrángulo, sino que también en otras zonas adyacentes a la cordillera de los Andes, como son los grupos Calipuy y Goyllarisquizga.

3.7.1.1.2 Grupo Calipuy Superior

Para el grupo Calipuy, en el cuadrángulo de Recuay, consiste de por lo menos 2,000 m y en algunos lugares más de 3,000 m de estratos volcánicos variados. Se encuentran conformados por rocas piroclásticas gruesas de composición andesítica y con abundantes lavas andesíticas e ignimbritas dacíticas.

Este grupo descansa con gran discordancia sobre las formaciones mesozoicas, como la formación Chicama, la cual es la más antigua. Así como también suprayace en discordancia angular fuerte a las secuencias del Cretáceo inferior e infrayace a mantos lávicos. De igual manera, Este grupo está compuesto mayormente por tobas, piroclásticos gruesos, aglomerados, lavas, Su composición varía de andesítica-dacítica a riolítica. El grupo Calipuy superior se encuentra dentro de la parte sureste de la subcuenca Pachacoto y también se le puede encontrar al este de esta misma.

Figura 11

Unidad litológica Grupo Calipuy superior presente dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.1.3 Grupo Goyllarisquizga

El grupo Goyllarisquizga se encuentra compuesto por cinco formaciones, siendo estas la formación Carhuaz, Chimú, Farrat, Oyón y Santa, siendo características por su presencia

rocas de tipo sedimentarias, como son las areniscas blancas friables de 500 metros, con miembros de estratificación cruzada de 2 metros de grosor; partes de la formación están en capas más delgadas y lajas que pueden tener lutitas interestratificadas.

Además, el grupo Goyllarisquizga aparece solamente en la región del Bloque del Maraón y es la formación base del Cretácico en dicha área. Esta formación se ubica directamente encima de todas las formaciones subyacentes, que incluyen esquistos del Complejo del Maraón, areniscas de Ambo y grupos Mitu y Pucará.

Litológicamente, están compuestos por cuarcitas blancas masivas y areniscas generalmente de grano medio y color blanquecino. Este grupo y sus formaciones se encuentran presentes en grandes áreas al este y noreste de la subcuenca Pachacoto.

3.7.1.1.4 Depósitos inconsolidados

Por último, tenemos a los depósitos inconsolidados provenientes de la era del cuaternario, como son los depósitos aluviales, coluviales y morrénicos. Estos abarcan casi el 80%, a simple vista, del cuadrángulo de Recuay, encontrándose también dentro de la subcuenca Pachacoto.

3.7.1.1.5 Depósitos aluviales

En su mayoría, los depósitos aluviales se encuentran conformados por clastos redondeados y tiene una notable variación en tamaño y en mezcla de fracciones clásticas que dependen de la roca madre, de la pendiente y la intensidad del medio energético que intervienen en su acumulación y también de las características de la meteorización.

3.7.1.1.6 Depósitos morrénicos

Este tipo de depósito no consolidado muestra una morfología de lomadas y colinas de las cumbres rodeadas con cierta resistencia, las cuales se encuentran cerca de un glaciar. Estos muestran rasgos de deformación Neotectónica, ya que han sido afectados por la falla de la cordillera Blanca. También presentan ciertas formas de crestas o depósitos alargados e inconsolidados de extensión más reducida.

Ver mapa N° 5: Mapa de unidades litológicas de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

Figura 12

Depósitos morrénicos dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.2 Geomorfología

La geomorfología se relaciona con la clase de rasgos litológicos y tectónicos donde los procesos geodinámicos superficiales, como la erosión y los movimientos de masas, los modifican específicamente, formando nuevos accidentes geográficos.

Valderrama et al. (2013) nos dice que, en el departamento de Ancash, se presenta una notable configuración geomorfológica en la Cordillera Occidental, la cual se divide en dos segmentos: al este se encuentra la Cordillera Blanca, que destaca por la presencia de cumbres glaciares permanentes en las partes más altas; y al oeste se encuentra la Cordillera Negra, que no cuenta con estas características glaciares. Ambas cordilleras conforman el Callejón de Huaylas.

La subcuenca Pachacoto se ubica en la zona sur de la cordillera Blanca, ésta a su vez pertenece al pico sur del Nevado del Huascarán, presentando de suaves a empinadas pendientes. Esta cordillera presenta un gran número de diques morrénicos o rocosos, originados por la acción del hielo y por los agentes externos.

Según el insumo de shapefile de Geomorfología por parte del geoportal GEOCATMIN del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), el cual toma como fuente al Mapa Geomorfológico del Perú (2016), se tiene para la subcuenca Pachacoto las siguientes unidades geomorfológicas.

3.7.1.2.1 Montañas con cobertura glacial

Esta unidad de geomorfología se encuentra desarrollada ampliamente en las divisorias continentales de aguas, tanto de la vertiente del Pacífico como de la vertiente del Atlántico, correspondientes a cabeceras de cuencas y subcuencas, teniendo cotas máximas por encima de los 5000 m.s.n.m. Estas presentan coberturas de hielo a manera de picos y/o nevados.

Figura 13

Montañas con escasa cobertura glacial y presencia del nevado Pastoruri



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

A los alrededores de la Cordillera Blanca y dentro de la subcuenca Pachacoto, se pueden identificar unidades de glaciares, nevados (siendo estas montañas las cuales se encuentran cubiertas por material glacial) y los valles glaciares con lagunas originadas por los glaciares y las erosiones presentes en estas zonas por miles de años.

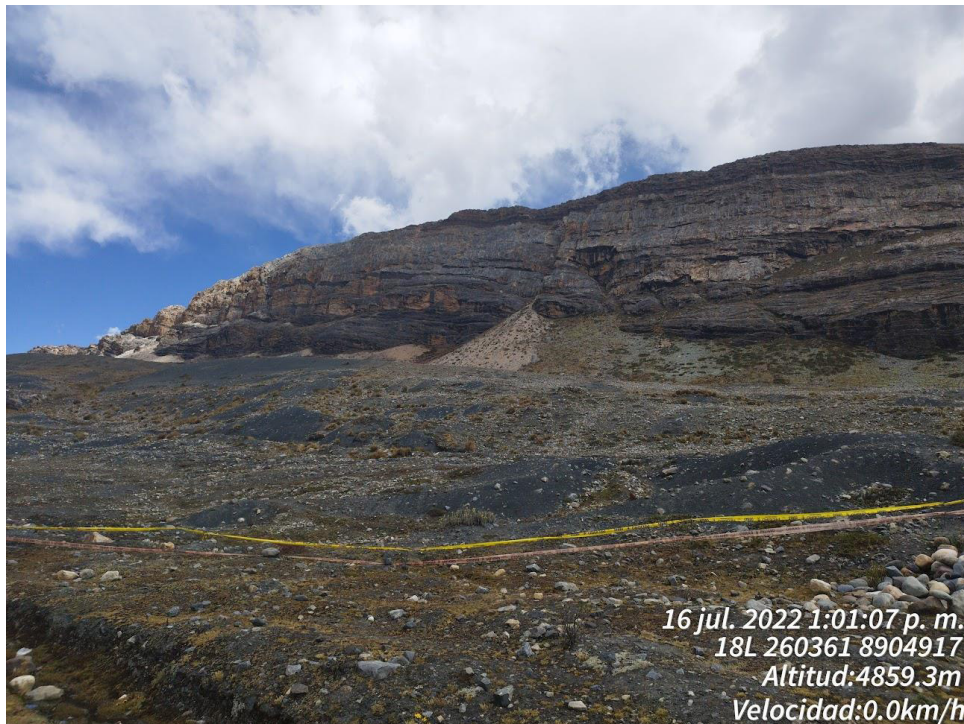
3.7.1.2.2 Montaña estructural en roca volcánica

Unidad geomorfológica con afloramientos volcánicos, tales como tobas, tufos, derrames lávicos andesíticos y brechas), litológicamente corresponden y abarca, dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto, a las unidades geológicas Formación Chicama y Grupo Calipuy superior. Alcanzando elevaciones hasta por encima de los 5000 m.s.n.m., presentando laderas con pendientes suaves a muy fuertes, desde los 5° hasta los 45°. Esta unidad geomorfológica abarca

un 60% aproximadamente de la superficie total de la subcuenca Pachacoto, distribuyéndose a lo largo de la parte alta de la subcuenca.

Figura 14

Montaña estructural en roca volcánica



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.2.3 Morrenas

Unidad geomorfológica de depósitos glaciares en forma de lomadas alargadas y colinadas. Estos depósitos se encuentran acumulados, a través del tiempo, en las laderas superiores de las montañas, los márgenes de valles glaciares o bordeando lagunas.

Figura 15

Morrenas en la base del nevado Pastoruri



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

Las áreas principales con acumulación de morrenas se ubican entre Recuay al sur (ubicación donde se encuentra el área de estudio) y Yungay al norte.

3.7.1.2.4 Depósitos glacio-fluvial

Unidad geomorfológica que se deposita en zonas montañosas, específicamente en sus laderas, y en los valles. Estas a su vez son originadas por procesos de desglaciación del Pleistoceno y remociones de depósitos morrénicos, distribuyéndose por el valle del río Santa,

bordeando las zonas montañosas y glaciares, cabeceras de cuencas y subcuencas y muchas veces ocupando terrenos pastizales e incluso terrenos de cultivo en los niveles inferiores.

En la región del valle del río Santa y la Cordillera Blanca, se ubica una extensa área de depósitos fluvio-glaciares y glaciares. Estos depósitos están compuestos por materiales no consolidados, como clastos angulosos de varios tamaños, que se originaron a partir de la descomposición de las rocas preexistentes. Estos materiales no consolidados están compuestos principalmente de arena y arcilla. (Véliz, 1967).

Dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto, esta unidad geomorfológica se encuentra emplazada en la zona baja de la subcuenca, en las zonas laterales del valle y abarcando un 20% aproximadamente de la superficie total de la subcuenca.

3.7.1.2.5 Valle glacial con lagunas

Superficies llanas con características topográficas particulares, encontrándose principalmente en los tributarios y quebradas que descienden de la cordillera Blanca con dirección hacia el río Santa. Debido a su ambiente periglacial, es frecuente encontrar la formación de lagunas de diferentes dimensiones, esto siendo el resultado de la desglaciación y el retiro de los glaciares.

3.7.1.2.6 Terraza aluvial

En la parte alta y cerca a los márgenes del lecho del río Santa, se pueden identificar las terrazas aluviales. Geodinámicamente, esta unidad se encuentra asociada a procesos de erosión fluvial, cuando el río recupera cursos fluviales antiguos. (Vílchez et al. 2019).

Ver mapa N° 6: Mapa de unidades geomorfológicas de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

3.7.1.3 Pendientes y condiciones topográficas

La topografía presente en el distrito de Cátac es muy variada, ya que tenemos altitudes desde los 4000 hasta los 6400 m.s.n.m. Esto nos indica que existe presencia de montañas y glaciares en el área como también la existencia de valles y ríos. Estos factores descritos anteriormente, evidenciarían la existencia de lagos y lagunas en las zonas altas que se formaron en conjunto con los valles. Con la existencia altitudinal presente, se tiene que en el distrito de Cátac y en el área de estudio existen pendientes desde casi planas o llanas hasta pendientes abruptas.

La pendiente es un factor crucial en los movimientos en masa y en la dinámica del terreno, ya que determina la cantidad de energía potencial y cinética de una masa que se encuentra inestable (Sánchez, 2002). Es por ello que, la pendiente es un factor a tomar en cuenta en el análisis para estimar la susceptibilidad.

Para la investigación, se tiene una clasificación de pendientes en base al Boletín N° 38 Serie C, que tiene por nombre “Riesgos Geológicos en la Región Ancash”.

Tabla 6

Tabla de clasificación según la pendiente en grados de la subcuenca Pachacoto

Clasificación	Rango	Descripción
Casi a nivel	0° - 1°	Pendiente asociada a terrenos llanos que a simple vista no presentan ningún tipo de desnivel.
Suave	1° - 5°	Pendiente la cual presenta un ligero desnivel,

Moderada	5°- 15°	Se consideran con susceptibilidad media a los movimientos en masa. Están sujetos a reptación, flujo de detritos, deslizamientos, derrumbes y movimientos complejos.
Fuerte	15°- 25°	Estos terrenos con pendiente fuerte son susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos y movimientos complejos.
Muy fuerte	25°- 45°	Los deslizamientos, movimientos complejos, avalancha de rocas, huaycos y erosión de laderas ocurren en terrenos con pendiente muy fuerte.
Escarpada	Mayores a 45°	Suelen presentarse zonas de arranque de avalancha de rocas. Las caídas de rocas, avalancha de rocas y derrumbes, asociados principalmente a su origen por movimientos sísmicos.

Nota. Elaboración propia ajustado por el investigador, en base al Boletín N° 38 Serie C, INGEMMET (2009).

3.7.1.4 Cobertura vegetal

La presencia de vegetación es crucial para mantener la estabilidad de los taludes, ya que ayuda a prevenir la erosión al retener la humedad y crear una red de raíces que da textura al suelo. La vegetación también juega un papel importante en la regulación de la infiltración, lo que puede afectar directamente el sistema de aguas subterráneas. La falta de cobertura vegetal y forestal puede favorecer la meteorización y el desplazamiento mecánico del material debido a factores desencadenantes. Es importante destacar que la densidad de hojas de las plantas es un factor importante en la capacidad de la vegetación para mitigar la erosión causada por la lluvia y otros fenómenos climáticos.

Para describir las unidades de cobertura vegetal presentes en la subcuenca Pachacoto, nos basamos en el Mapa Nacional de Cobertura Vegetal realizado por el Ministerio del Ambiente (MINAM) en el año 2015.

3.7.1.4.1 Área altoandina con escasa y sin vegetación

Como su nombre lo indica, esta unidad se caracteriza por presentar poca o nula vegetación dentro del ámbito de estudio. En la subcuenca Pachacoto, la unidad se distribuye en la parte alta de la subcuenca, abarcando una superficie de 8376.75 Ha, por lo que representa el 41% de la superficie total de la subcuenca Pachacoto.

Figura 16

Áreas altoandinas con escasa y sin vegetación



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.4.2 Glaciar

Unidad de cobertura vegetal que se ubica por encima de los 5000 m.s.n.m., característica por presentar nula vegetación y comprende material de tipo hielo o nieve permanente. Dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto, esta unidad cuenta con una superficie de 1446.25 Ha, distribuyéndose en las cabeceras de esta subcuenca, y representando el 7% de la superficie total del área de estudio.

Figura 17

Glaciar Pastoruri



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.4.3 Pajonal andino

Este tipo de cobertura vegetal se encuentra conformado, en su mayoría, por herbazales ubicados en la parte alta de la cordillera de los andes, aproximadamente entre los 3800 ms.n.m. y los 4800 m.s.n.m. Este suprayace sobre terrenos que van desde casi planos como las altiplanicies hasta terrenos empinados o escarpados, así como también en las depresiones y en

los fondos de valles glaciares. Esta unidad comprende tres subunidades, tales como el pajonal (hierbas en forma de manojos de hasta 80 cm de alto), césped (hierbas de hasta 15 cm de alto) y tolar (arbustos de hasta 1.20 m de alto).

Figura 18

Pajonales en la subcuenca Pachacoto



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.4.4 Matorral arbustivo

Este tipo de vegetación cubre una amplia zona en la región andina, abarcando desde los 1500 m.s.n.m hasta los 3800 m.s.n.m en la zona central y sur del país. Es un recurso valioso por su uso como fuente de leña y con fines medicinales. Además, se encuentra en áreas aptas

para la forestación comercial y la protección de cuencas, lo que sugiere su potencial para el desarrollo de proyectos forestales con fines de conservación y protección ambiental.

Figura 19

Matorral arbustivo junto a pajonales y vestigios de flujo de detritos



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.4.5 Bofedal

Esta unidad, conocida también como "Oconal", se ubica en la región altoandina del centro y sur del país a partir de los 3800 m.s.n.m. Se trata de un ecosistema hidromórfico que se distribuye en los fondos de valle fluvio-glacial y terrazas aluviales. La fuente de agua para

este tipo de ecosistema es principalmente el deshielo de los glaciares, la precipitación pluvial y el afloramiento de agua subterránea mediante puquios.

Los suelos se mantienen con cierto nivel de agua durante el periodo seco y se han originado a partir de materiales fluvio-glaciares, aluviales y coluviales, ubicados en depresiones de superficies planas o ligeramente inclinadas.

Figura 20

Bofedales con presencia de montañas estructurales y con cobertura glaciar de fondo



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

3.7.1.4.6 Lagos, lagunas y cochas

Esta unidad se distribuye en todos los niveles de la subcuenca, tanto en la parte baja, media como en la parte alta.

Figura 21

Laguna en la subcuenca Pachacoto



Nota. Foto tomada en campo por el investigador.

Ver mapa N° 8: Mapa de cobertura vegetal de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

3.7.1.5 Anomalías de precipitación

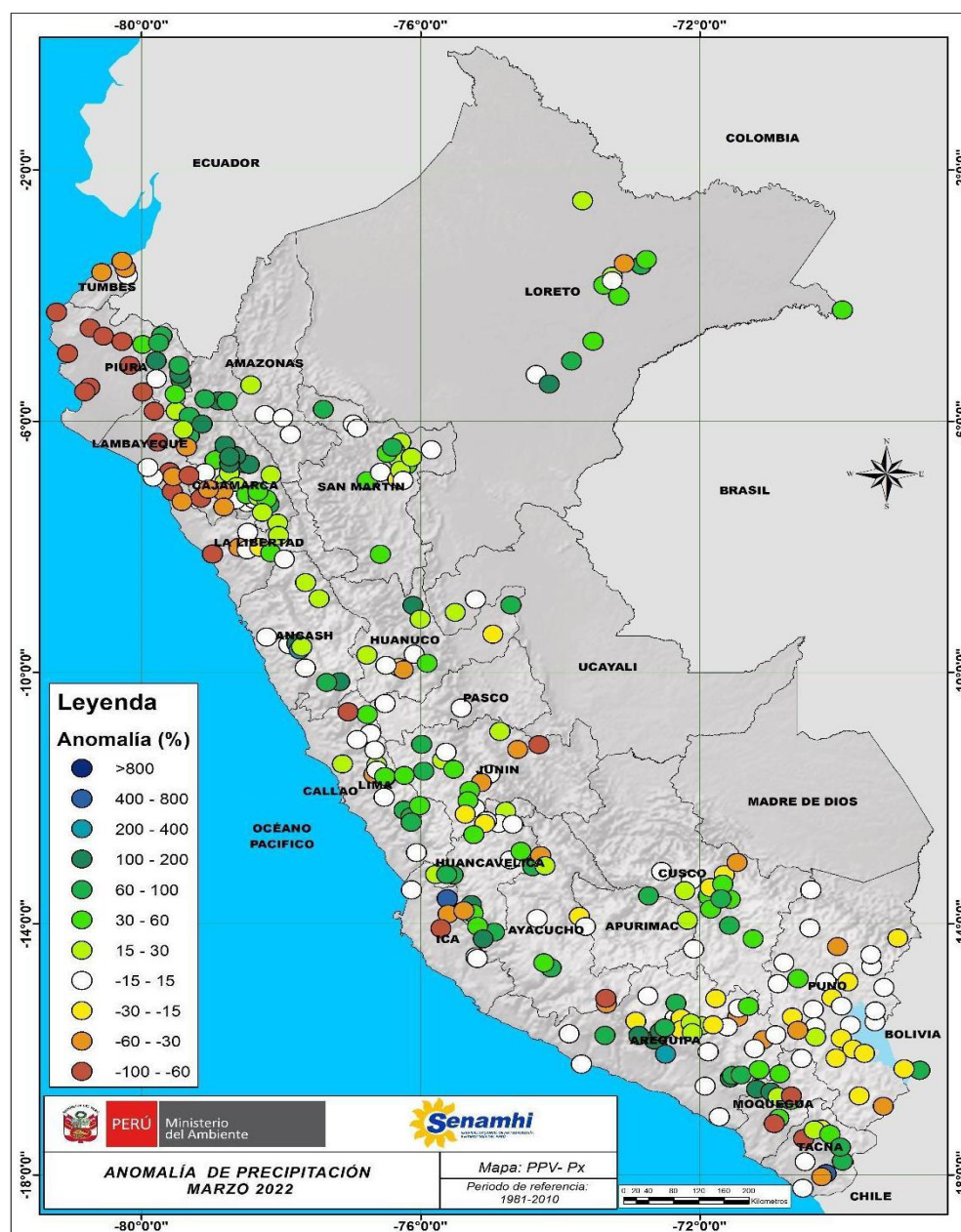
Como su nombre lo indica, una anomalía de precipitación es un evento que ocurre cada cierto tiempo en el cual se ha producido un cambio o desviación con respecto a lo que

habitualmente pasa u ocurre. Es decir, una anomalía de precipitación, es un evento que ocurre en determinado momento debido a diversos factores propios del planeta Tierra, que provocan un aumento en la precipitación. Es por ello que, las estaciones en la región Ancash registraron anomalías en la precipitación en el año 2021 y 2022, siendo estas registradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Para ello, representaron las anomalías por encima de lo normal con el color verde yendo hacia el color azul, mientras que las anomalías por debajo de lo normal se representan por el color amarillo yendo hacia el color marrón.

Bajo esta premisa, la subcuenca Pachacoto presentó anomalías de precipitación por encima de lo normal en los meses de enero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre del año 2021 y en los meses de enero, febrero, marzo, abril y junio del año 2022, siendo los que presentaron una mayor anomalía por encima del 100% al 200% los meses de marzo y mayo del año 2022, los cuales se muestran en las siguientes imágenes.

Figura 22

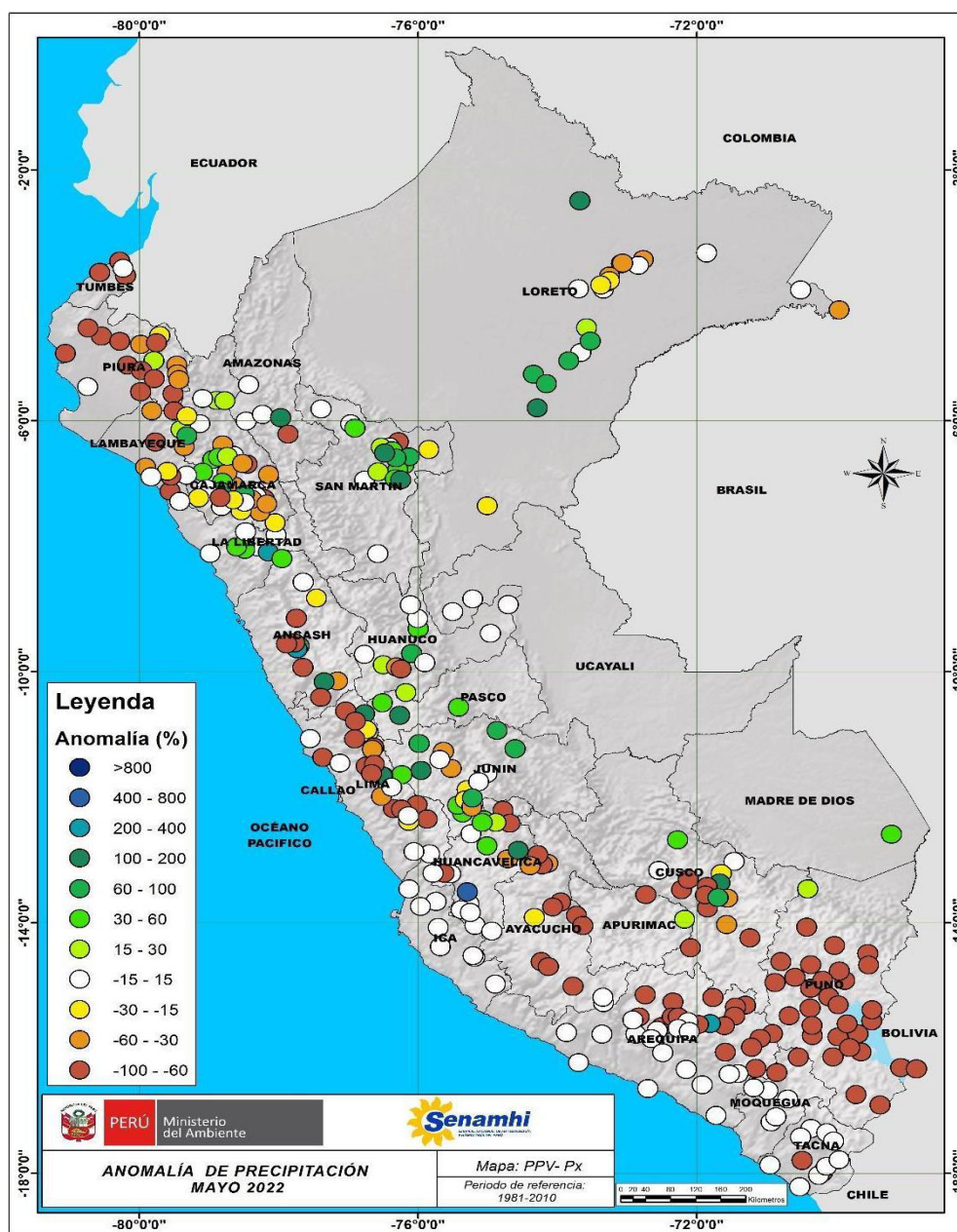
Anomalía de precipitación del mes de marzo del año 2022



Nota. Extraído del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Figura 23

Anomalía de precipitación del mes de mayo del año 2022.



Nota. Extraído del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Ver mapa N° 4: Anomalías de precipitación de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

3.7.2 *Análisis de datos para la estimación de la susceptibilidad*

Para la estimación de la susceptibilidad en la subcuenca Pachacoto se utilizó el PAJ para determinar la importancia o relevancia de cada uno de los factores físicos y sus respectivos descriptores, importancia la cual sirvió como insumo para realizar la superposición ponderada en el programa ArcMap 10.5. Para realizar las ponderaciones utilizamos la metodología empleada por Saaty, metodología la cual nos permitió establecer la importancia relativa de cada criterio, mediante la comparación por pares en una escala de valores del 1 al 9 para calificar y priorizar los elementos.

3.7.3 *Establecimiento de prioridades*

Este método requiere que el evaluador o el tomador de decisiones establezcan una preferencia o prioridad para cada alternativa de decisión siempre que estas preferencias o prioridades contribuyan a cada criterio. Una vez que se ha recopilado la importancia de las prioridades, se utiliza la agregación para resumir y clasificar las prioridades alternativas mediante una jerarquización. (Toskano, 2005).

3.7.4 *Comparaciones pareadas*

Esta parte es fundamental en el método del Proceso Analítico Jerárquico, ya que se establece la importancia relativa de cada criterio, mediante la comparación por pares en una escala de valores del 1 al 9 para calificar y priorizar los elementos.

Tabla 7

Escala de preferencias según Saaty

Valor Numérico	Escala Nominal	Explicación
9	Absolutamente o muchísimo más importante que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.

7	Mucho más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera muchísimo más importante o preferido que el segundo.
5	Más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante que...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Nota. Tabla adaptada de conceptos de Saaty (1980).

3.7.5 Matriz de comparaciones pareadas por pares

Es una matriz la cual contiene comparaciones pareadas o por pares de alternativas o criterios, llenando la importancia relativa con respecto a las otras alternativas y, por consiguiente, se llenarán los valores inversos de la importancia relativa anteriormente asignada.

Tabla 8

Criterio de comparación por pares o pareadas

Parámetro	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	...	Criterio N
Criterio 1	W_1/W_1	W_1/W_2	$W_1/W_3 \dots$	...	W_1/W_N
Criterio 2	W_2/W_1	W_2/W_2	$W_2/W_3 \dots$	...	W_2/W_N
Criterio 3	W_3/W_1	W_3/W_2	$W_3/W_3 \dots$	...	W_3/W_N
...	...	...	...	...	...
Criterio N	W_N/W_1	W_N/W_2	$W_N/W_3 \dots$	...	W_N/W_N

Nota. Tomado de Saaty (1994). W= prioridad que se les da a los factores.

3.7.6 Consistencia

La matriz formada por comparaciones debe tener cierto grado de consistencia, tal que los resultados deben ser confiables. Se debe tener en cuenta que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr y es muy común encontrar la inconsistencia, ya que estos análisis son realizados por el ser humano.

El grado de consistencia se calcula mediante la Razón de Consistencia (RC). Esta Razón de Consistencia es un índice no estadístico que proviene del cociente entre el Índice de Consistencia (IC) y el Índice de Consistencia Aleatorio (ICA).

Por lo tanto, se tiene:

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

Dónde, el Índice de Consistencia (IC) se calcula por la siguiente expresión:

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

Y el Índice de Consistencia Aleatorio (ICA) se calcula por la siguiente expresión;

$$ICA = \frac{1.98(n - 2)}{n}$$

El valor de n_{max} se calcula de $AW = n_{max} * W$; esto significa que el valor de n_{max} se determina al calcular primero el vector columna A y después sumando sus elementos. El resultado de la razón de consistencia debe encontrarse dentro de un rango, tal que a la matriz “A” se le considere *consistente*, se presenta a continuación los rangos que puede tomar la RC para que la matriz sea considerada consistente (Saaty, 1994).

3.7.7 Análisis de los factores físicos mediante el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ)

Realizado el diagnóstico de la subcuenca Pachacoto, se identificaron los parámetros físicos geográficos que están presentes en esta subcuenca. De igual manera, se identificaron los descriptores de cada parámetro, para lo cual se tiene la siguiente tabla.

Tabla 9

Parámetros físico geográficos de la subcuenca Pachacoto con sus respectivos descriptores

Área de estudio	Clasificación	Parámetro Físico Geográfico	Descriptores
Subcuenca Pachacoto	Factores condicionantes	Litología	Formación Chicama
			Grupo Goyllarisquizga
			Depósitos Morrénicos
			Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial
			Grupo Calipuy
			Depósitos aluviales
		Geomorfología	Montaña con cobertura glacial
			Montaña estructural en roca volcánica
			Morrenas
			Detrito Glacio Fluvial
			Valle glacial con lagunas
			Terraza aluvial
		Pendientes	Mayor a 45° (Escarpada)
			25° - 45° (Muy Fuerte)
			15° - 25° (Fuerte)
			5° - 15° (Moderada)
			1° - 5° (Suave)
			0° - 1° (Casi a nivel)
		Cobertura vegetal	Área altoandina con escasa y sin vegetación
			Glaciar
			Pajonal andino
			Matorral arbustivo
			Bofedal
			Lagunas, lagos y cochas
	Factor desencadenante	Precipitación	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal

			Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal
			Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal
			Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal
			Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal
			Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal

3.7.7.1 Ponderación de los parámetros físicos

3.7.7.1.1 Comparación por pares de los factores condicionantes

Como se puede apreciar en la Tabla 9 “*Parámetros físico geográficos de la subcuenca Pachacoto con sus respectivos descriptores*”, se tiene como factores que condicionan a la generación de los movimientos en masa a la litología, geomorfología, cobertura vegetal y a las pendientes del terreno dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto. Para realizar el análisis de comparación por pares de los factores condicionantes, se tomará de base a la escala de Saaty (ver Tabla 8) para asignar valores de ponderación a un factor condicionante frente a otro. Como se tiene cuatro parámetros físicos geográficos como factores condicionantes, se tomará una matriz de 4x4.

En primer lugar, se analiza la litología comparándola frente a los otros factores condicionantes, como son las pendientes, geomorfología y cobertura vegetal, siendo la litología parte de la geología que estudia y evalúa el tipo de material presente (siendo rocas y/o suelos), así como también las características físicas y su textura, las cuales definirían el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa. Bajo la premisa anterior, y en base a la información recogida en campo y los descriptores presentes de la litología en la subcuenca Pachacoto, los cuales presentan un origen sedimentario en su mayoría, se considera a la litología ligeramente

más importante o preferida que las pendientes, más importante o preferida que la geomorfología y mucho más importante o preferida que la cobertura vegetal.

Por otro lado, se tiene a las pendientes dentro del área de estudio, las cuales, por su naturaleza y condiciones del terreno, siendo estas en su mayoría pendientes de 25° a más, favoreciendo a la erosión cuando se producen las precipitaciones. Esto en conjunto con la litología de la subcuenca Pachacoto aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa. Es por ello que se tiene a las pendientes ligeramente menos importante o preferida que la litología, ligeramente más importante o preferida que la geomorfología y más importante o preferida que la cobertura vegetal.

Por último, se tiene la comparación de la geomorfología frente a los otros factores condicionantes, siendo esta denominada en base a lo que se puede observar en el terreno o ámbito de estudio, complementada con información de pendientes y la caracterización de las unidades litológicas para dar una clasificación, se tiene que a la geomorfología menos importante o preferida que la litología, ligeramente menos importante o preferida que las pendientes y más importante o preferida que la cobertura vegetal.

Por ello, se tiene la siguiente tabla matriz de comparación por pares para los factores condicionantes de la subcuenca Pachacoto.

Tabla 10

Comparación de pares para los factores condicionantes de la subcuenca Pachacoto

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal
Litología	1	3	5	7
Pendientes	1/3	1	3	5
Geomorfología	1/5	1/3	1	5
Cobertura vegetal	1/7	1/5	1/5	1

3.7.7.1.2 Normalización y vector priorización (ponderación) de los factores condicionantes

Una vez realizada la comparación por pares, se procederá a calcular la suma de cada columna de la tabla para obtener la inversa de las sumas totales.

Tabla 11

Suma de valores y la inversa de la suma de valores por cada columna

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal
Litología	1.00	3.00	5.00	7.00
Pendientes	0.333	1.00	3.00	5.00
Geomorfología	0.200	0.333	1.00	5.00
Cobertura vegetal	0.143	0.200	0.20	1.00
Suma	1.676	4.533	9.200	18.00
1/Suma	0.597	0.221	0.109	0.056

Una vez realizado lo anterior expuesto, se procederá a realizar la tabla de normalización, esto implica multiplicar el valor inverso de las sumas totales por cada uno de los elementos de su columna correspondiente. Entonces, a manera de ejemplo, se tiene que:

$$1.00 \times 0.597 = 0.597$$

$$0.333 \times 0.597 = 0.199$$

$$0.200 \times 0.597 = 0.119$$

Así sucesivamente hasta multiplicar cada uno de los elementos, respetando el orden de las columnas y teniendo como resultado la siguiente tabla.

Tabla 12*Normalización de los factores condicionantes*

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal
Litología	0.597	0.662	0.543	0.389
Pendientes	0.199	0.221	0.326	0.278
Geomorfología	0.119	0.074	0.109	0.278
Cobertura vegetal	0.085	0.044	0.022	0.056

Luego, se hallará el vector priorización (ponderación), el cual resulta de la suma promedio de cada fila, es así que cada columna debe sumar la unidad. Para ello, se tienen las siguientes tablas. Entonces, a manera de ejemplo, se tiene que:

$$(0.597 + 0.662 + 0.543 + 0.389) / 4 = 0.548$$

Así sucesivamente hasta hallar todos los vectores de priorización para cada fila, para lo que se tendría la siguiente tabla.

Tabla 13*Vector priorización (ponderación) de los factores condicionantes*

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal	Vector priorización
Litología	0.597	0.662	0.543	0.389	0.548
Pendientes	0.199	0.221	0.326	0.278	0.256
Geomorfología	0.119	0.074	0.109	0.278	0.145
Cobertura vegetal	0.085	0.044	0.022	0.056	0.052
Suma	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

3.7.7.1.3 Relación de consistencia

Calculado el vector priorización, se tendrá que corroborar que el análisis hecho hasta el momento es el correcto. Para ello se calculará la relación de consistencia teniendo que ser esta menor al 10% o $RC < 0.1$ indicando que el análisis realizado en la comparación por pares es

consistente. Para su cálculo, previamente deberemos hallar el vector suma ponderado, el cual se obtendrá de multiplicar cada celda de la Tabla 15 “*Suma de valores y la inversa de la suma de valores por cada columna*” por el vector priorización de la Tabla 17 “*Vector priorización (ponderación) de los factores condicionantes*”. Entonces, a manera de ejemplo, se tiene que:

$$1.000 \times 0.548 = 0.548$$

$$0.333 \times 0.548 = 0.183$$

$$0.200 \times 0.548 = 0.110$$

De igual manera se realizará para hallar los valores de la segunda columna, la cual se multiplicará por 0.26 para cada uno de los valores, la tercera columna por 0.14 y la última columna por 0.05.

Tabla 14

Matriz para hallar el vector suma ponderado

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal
Litología	0.548	0.767	0.724	0.362
Pendientes	0.183	0.256	0.434	0.258
Geomorfología	0.110	0.085	0.145	0.258
Cobertura vegetal	0.078	0.051	0.029	0.052

Obtenida la tabla llena con los valores hallados, se realizará la suma de valores de cada fila para hallar el vector suma ponderado. Entonces, a manera de ejemplo, se tiene que:

$$0.548 + 0.767 + 0.724 + 0.362 = 2.401$$

Así sucesivamente para cada una de las filas, para lo cual se tiene la siguiente tabla.

Tabla 15*Matriz vector suma ponderado*

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cobertura vegetal	Vector suma ponderado
Litología	0.548	0.767	0.724	0.362	2.401
Pendientes	0.183	0.256	0.434	0.258	1.131
Geomorfología	0.110	0.085	0.145	0.258	0.598
Cobertura vegetal	0.078	0.051	0.029	0.052	0.210

Una vez hallado el vector suma ponderado, se procederá a calcular λ máximo, para ello se dividirá el vector suma ponderado entre el vector priorización siguiendo su orden. A manera de ejemplo, se tendrá que:

$$2.401 / 0.548 = 4.384$$

Así sucesivamente, hasta hallar los valores para las cuatro filas, para lo cual se tiene la siguiente tabla.

Tabla 16*Vector suma ponderado entre vector priorización*

VSP	VP	VSP / VP
2.401	0.548	4.384
1.131	0.256	4.422
0.598	0.145	4.129
0.210	0.052	4.066
Suma promedio		4.250

Ahora, se procederá a calcular el Índice de Consistencia (IC) para posteriormente poder hallar el valor de la Relación de Consistencia. Entonces para el cálculo del IC se tiene la siguiente expresión:

$$IC = \frac{4.250 - 4}{4 - 1} = 0.083$$

Tomando como valor de cuatro al número de parámetros que se tienen. Posteriormente y para corroborar que el análisis realizado en todo el Proceso Analítico Jerárquico es consistente, se hallará el valor de la Razón de Consistencia (RC), para lo cual se tiene la siguiente expresión:

$$RC = \frac{IC}{0.882} = \frac{0.083}{0.882} = 0.094$$

Siendo el valor 0.882 obtenido a través de los valores del Índice Aleatorio para los diferentes “n”, los cuales se obtienen mediante la simulación de 100,000 matrices (Aguarón y Moreno, Jiménez, 2011), para lo cual se tiene la siguiente tabla.

Tabla 17

Valores del Índice aleatorio para diferentes “n”

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.57	1.583	1.595

Nota. Extraído del Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales, 2º versión del año 2015.

Como se puede apreciar, la Relación de Consistencia (RC) para el análisis realizado para los factores condicionantes dentro de la subcuenca Pachacoto resulta ser de 0.094, siendo este valor menor al 0.1 o 10% indicándonos que el análisis realizado es consistente. De igual manera se realizará para obtener la ponderación de los descriptores de los factores condicionantes (siendo seis descriptores por cada parámetro, lo cual se puede apreciar en la Tabla 13) y para el factor desencadenante con sus respectivos descriptores (seis descriptores).

3.7.8 Zonificación según el grado de susceptibilidad

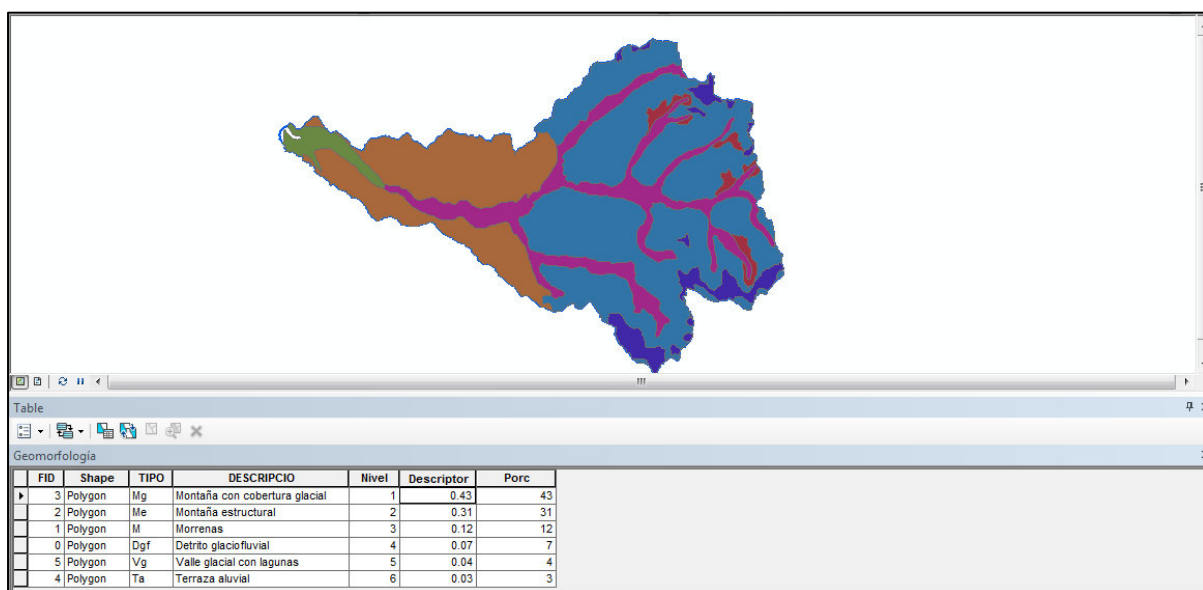
Para la zonificación de la susceptibilidad nos basamos en el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto. Para ello, se realizó una superposición

ponderada en el software ArcGIS 10.5 con los insumos cartográficos necesarios (shapefiles) y se asignó como un nuevo atributo la ponderación realizada mediante el PAJ a cada uno de los parámetros físico geográfica considerados en la investigación.

Por ello, en primera instancia, se agregará como nuevo atributo de cada parámetro físico geográfico a la ponderación de cada uno de los descriptores. Como la ponderación también puede ser expresada en porcentaje, se agregará otro nuevo atributo, pero esta vez en forma de porcentaje. A manera de ejemplo, se tiene la siguiente imagen.

Figura 24

Nuevo atributo de la ponderación de cada descriptor para cada parámetro físico geográfico

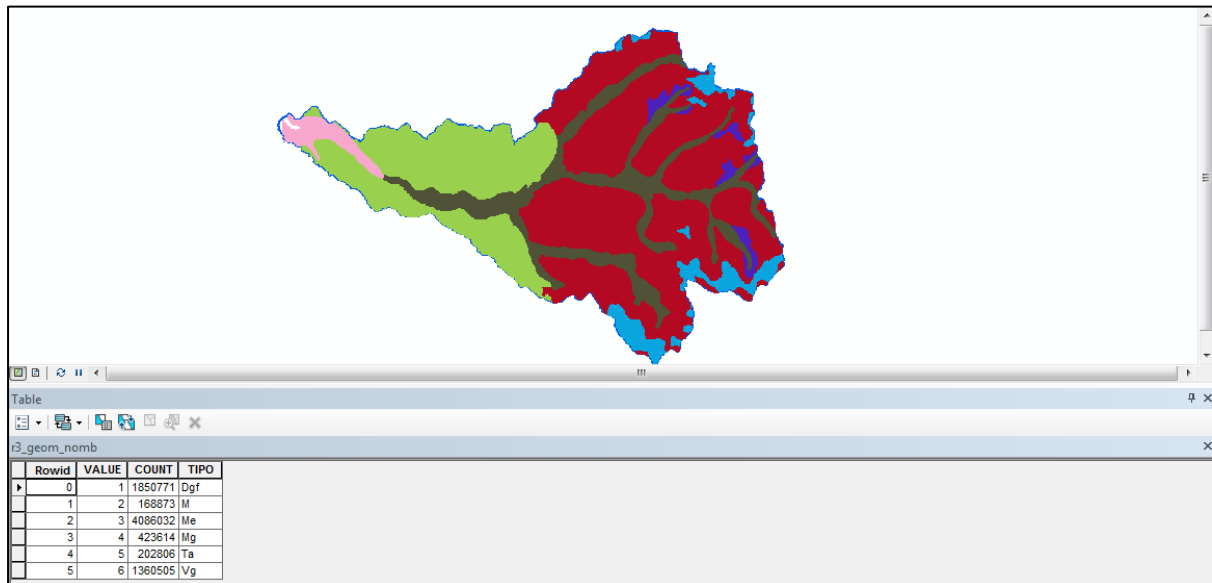


Seguido a ello, se dispondrá de transformar estos shapefiles a formato ráster, ya que el geoproceso que utilizaremos para realizar la superposición ponderada solo permite introducir insumos en formato ráster. Entonces, se transformará a formato ráster los shapefiles mediante un atributo que nos permita reconocer los descriptores de cada parámetro. En este caso, el investigador consideró al atributo “TIPO”, el cual se puede apreciar en la Figura 24 “Nuevo atributo de la ponderación de cada descriptor para cada parámetro físico geográfico”. De igual

manera se realizará para todos los parámetros físicos geográficos. A manera de ejemplo, se tiene la siguiente imagen.

Figura 25

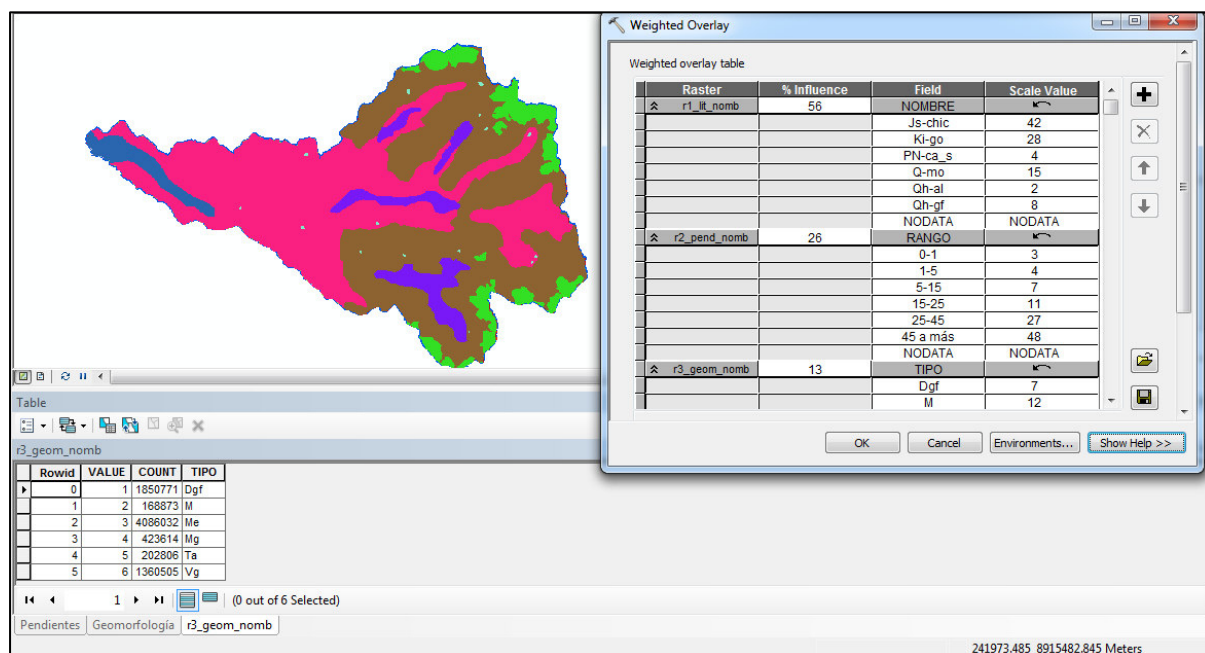
Transformación a ráster de los factores físico geográficos



Entonces, teniendo en formato ráster a todos los factores físico geográficos, se procederá a realizar la superposición ponderada. Para ello, se utilizará el geoproceso denominado “Weighted Overlay” del software ArcGIS 10.5. Una vez dentro del geoproceso, este demandará los insumos en formato ráster y el porcentaje de influencia que representa cada uno de estos en la generación de los movimientos en masa, para lo cual se realizará primero la superposición ponderada para determinar el Factor Condicionante. En este sentido, solamente se introducirán los parámetros de litología, pendientes, geomorfología y cobertura vegetal con sus descriptores y porcentajes. A manera de ejemplo, se tiene la siguiente imagen.

Figura 26

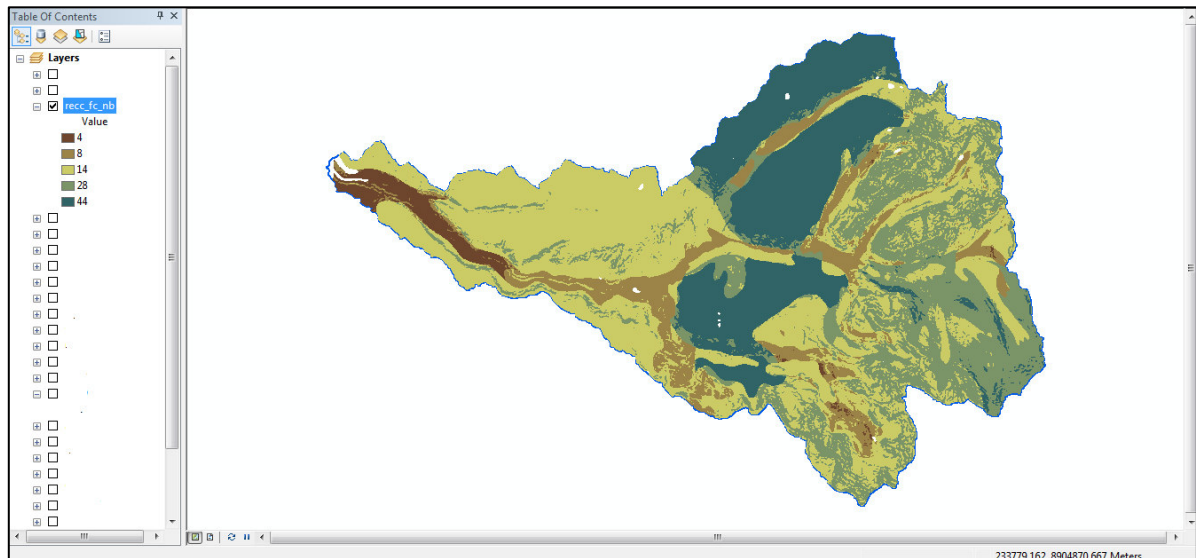
Superposición ponderada para hallar el factor condicionante



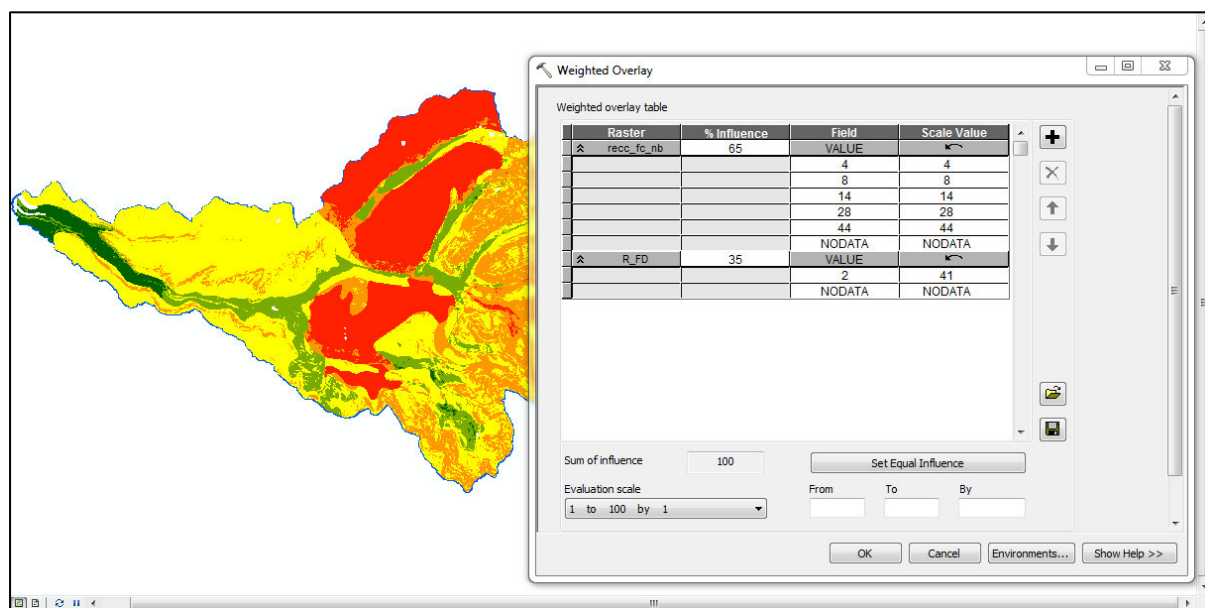
Realizado este geoproceso, resultará como producto en formato ráster el Factor Condicionante. El software nos arrojará en el formato ráster, pero en intervalos, así que tendremos que reclasificar este nuevo ráster de acuerdo a los intervalos que se tiene para el Factor Condicionante. Entonces, se tiene la siguiente imagen, donde se muestra la reclasificación.

Figura 27

Reclasificación del Factor Condicionante según intervalos



Entonces, una vez obtenido el Factor Condicionante reclasificado según intervalos y al Factor Desencadenante, el cual es la anomalía de precipitación por encima del 200% de lo normal, en formato ráster, se dispone a realizar nuevamente la superposición ponderada con sus respectivos porcentajes de influencia. Para ello, se tiene la siguiente imagen. El ráster producto de realizar esta superposición ponderada será el ráster de la susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto.

Figura 28*Estimación de la susceptibilidad en la subcuenca Pachacoto*

IV RESULTADOS

4.1 Resultados del diagnóstico de la subcuenca Pachacoto

4.1.1 Ubicación geográfica

Geográficamente, se encuentra ubicado, tomando como referencia al centroide de la subcuenca Pachacoto, en las siguientes coordenadas UTM: 8'907,235 N y 251,751 E. Espacialmente, se encuentra delimitado por las siguientes coordenadas UTM del Datum WGS-84, ubicado en la Zona UTM 18 Sur. Ver mapa N° 1: Mapa de ubicación de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

Tabla 18

Coordenadas en Datum WGS – 84, Zona 18 sur de la subcuenca Pachacoto

Área de estudio	Coordenadas UTM			
	Vértice	Orientación	Este	Norte
20,262.72 Ha	1	Norte	8'915,300 m	255,014 m
	2	Este	8'903,364 m	261,653 m
	3	Sur	8'898,295 m	255,123 m
	4	Oeste	8'910,489 m	235,828 m

4.1.2 Superficie y límites

La subcuenca Pachacoto cuenta con una superficie de 20,262.72 hectáreas y con un perímetro de 86.85 Km., el cual limita con los siguientes elementos geográficos:

- ✓ Por el Norte: Cordillera Blanca, Subcuenca del río Yanayacu.
- ✓ Por el Este: Cordillera Blanca, Distritos de Chavín de Huantar y Aquia.
- ✓ Por el Sur: Red de quebradas que desembocan en el río Santa.

- ✓ Por el Oeste: Centro Poblado Pachacoto, Río Santa y la carretera longitudinal de la Sierra Norte.

4.1.3 *Altitud*

La subcuenca Pachacoto se encuentra entre los 3692 m.s.n.m. y los 5633 m.s.n.m, esto en base al modelo de elevación digital (DEM) del sensor ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 metros que abarca en su totalidad a la subcuenca Pachacoto, permitiendo obtener estos valores de altitud.

Ver mapa N° 2: Mapa de altitud de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II).

4.1.4 *Vías de acceso*

La principal vía de acceso hacia la subcuenca Pachacoto, sería la de la Carretera Longitudinal de la Sierra Norte, siendo el recorrido de Lima hacia la subcuenca de la siguiente manera.

Tabla 19

Vías de acceso a la subcuenca Pachacoto desde la ciudad de Lima

Ruta	Tipo de vía	Distancia (km)	Tiempo
Lima - Paramonga	Asfaltada	200	3h 26 min
Paramonga - Chaucuyacan	Asfaltada	65.7	1h 4 min
Chaucuyacan - Marcas	Asfaltada	6.3	8 min
Marcas - Conococha	Asfaltada	50.5	1h 20 min
Conococha - Pachacoto	Asfaltada	37.7	33 min

Ver mapa N° 3: Mapa de vías de acceso a la subcuenca Pachacoto (Anexo II).

4.1.5 Geología

Dentro de la subcuenca Pachacoto se identificaron seis unidades litológicas, las cuales fueron identificadas a través de la Hoja geológica N° 20i Recuay con una escala de 1/100,000. Estas unidades se reconocieron y verificaron en la visita a campo con el mapa N° 5 “Mapa de unidades litológicas de la subcuenca Pachacoto”. Con lo descrito anteriormente y contrastando la información disponible con las características presentes en el área de estudio, se puede inferir lo siguiente en cuanto a susceptibilidad a movimientos en masa dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Tabla 20

Susceptibilidad de las unidades litológicas a los movimientos en masa

Unidad geológica	Influencia a la susceptibilidad a los movimientos en masa	Área representativa dentro de la subcuenca Pachacoto (Ha.)	Porcentaje (%) con relación al área total de la subcuenca Pachacoto
Formación Chicama	Las rocas de la formación Chicama son blandas, debido a la cantidad del material limo arcilloso, por lo cual son propensos a desarrollarse donde hay una combinación de taludes empinados e inestables. Este tipo de formación y litología se pueden encontrar en la parte norte dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.	4588.92	22.65
Grupo Goyllarisquizga	La composición litológica de este grupo comprende de rocas de tipo sedimentarias, siendo las principales presentes las areniscas, lutitas y calizas. Teniendo esta composición litológica, para el Grupo Goyllarisquizga, se tiene una alta susceptibilidad a la generación de movimientos en masa de tipo caídas, deslizamientos y flujo de detritos.	1236.78	6.10
Grupo Calipuy Superior	Grupo el cual tiene origen volcánico, cuenta con presencia de tobas de ceniza. Por su litología esta presenta una susceptibilidad baja a los movimientos en masa.	5845.93	28.85

Depósitos morrénicos	Litológicamente se conforma de morrenas, depósitos inconsolidados de origen glaciar debido al proceso de desglaciación afectando los casquetes de la Cordillera Blanca. Por sus características litológicas presenta una susceptibilidad alta a los movimientos en masa de tipo deslizamientos, flujo de detritos y así como también dar origen a movimientos complejos.	5502.86	27.16
Depósitos aluviales	Ubicados en la unidad geomorfológica denominada terraza fluvial. Litológicamente, comprenden de gravas, arenas y cantos redondeados. Esta unidad presenta una susceptibilidad baja a la ocurrencia de derrumbes.	597.04	2.95
Depósitos glacio-fluvial	Como su nombre lo indica, son depósitos inconsolidados provenientes de la desglaciación que han sufrido movimientos por acción del río o por acción de la gravedad. Conformada de gravas, ocupando la zona glacial de la subcuenca Pachacoto, así como el valle fluvial de este. Presenta una susceptibilidad media a los movimientos en masa de tipo derrumbes y deslizamientos.	2490.716707	12.29
Total		20262.72	100.00

Con lo anteriormente expuesto, se obtuvo los grados de importancia o relevancia de las unidades litológicas realizando la comparación por pares entre cada una de las unidades. Posteriormente, se realizó el PAJ para las unidades litológicas presentes en la subcuenca Pachacoto.

4.1.6 Geomorfología

Dentro de la subcuenca Pachacoto se identificaron seis unidades geomorfológicas, las cuales fueron identificadas a través del shapefile extraído del geoportal GEOCATMIN con una escala de 1/100,000. Estas unidades se reconocieron y verificaron en la visita a campo con el mapa N° 6 “Mapa de unidades geomorfológicas de la subcuenca Pachacoto”. Con lo descrito anteriormente y contrastando la información disponible con las características presentes en el

área de estudio, se puede inferir lo siguiente en cuanto a susceptibilidad a movimientos en masa dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Tabla 21

Susceptibilidad de las unidades geomorfológicas a los movimientos en masa

Unidad geomorfológica	Influencia a la susceptibilidad a los movimientos en masa	Área representativa dentro de la subcuenca Pachacoto (Ha.)	Porcentaje (%) con relación al área total de la subcuenca Pachacoto
Montaña con cobertura glacial	Por su naturaleza, esta unidad geomorfológica está asociada a diferentes tipos de movimientos en masa, como son los aludes o avalanchas, derrumbes y caída de rocas, avalanchas de rocas o detritos y movimientos complejos. En la mayoría de casos, se asocia al origen flujos de detritos de gran velocidad, comúnmente conocido como aluviones, el desborde de lagos o lagunas originados por un alud.	1059.05	5.23
Montaña estructural	Su composición litológica es en su mayoría sedimentaria, presentando variación en las pendientes desde moderadas hasta muy suaves, las cuales comprenderían entre los 0° hasta los 25°. Son asociadas a la caída de rocas, derrumbes, deslizamientos y flujo de detritos.	10215.28	50.41
Morrenas	Depósitos inconsolidados que se acumulados en lomas, colinas y laderas superiores de las montañas, bordeando lagunas. Bajo estas características, son propensas a generar flujos de detritos, deslizamientos y movimientos complejos.	422.14	2.08

Detrito Glacio Fluvial	Ocupando las zonas montañosas de la subcuenca y ocupándose en la parte baja, con presencia de pastizales y terrenos de cultivo. Presenta una susceptibilidad media a los movimientos en masa.	4626.83	22.83
Valle glacial con lagunas	Este tipo de unidad geomorfológica al encontrarse conformada por desembocaduras de quebradas y cauces secundarios adyacentes al cauce principal tienden a originarse flujos de detritos o derrumbes.	3401.20	16.79
Terraza aluvial		538.22	2.66
Total		20262.72	100.00

Con lo anteriormente expuesto, se obtuvo los grados de importancia o relevancia de las unidades geomorfológicas realizando la comparación por pares entre cada una de las unidades. Posteriormente, se realizó el PAJ para las unidades geomorfológicas presentes en la subcuenca Pachacoto.

4.1.7 Pendientes

La pendiente del terreno es uno de los factores a tener en cuenta al momento de realizar un análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa. Es por ello que mediante el Modelo de Elevación Digital (DEM) del área de estudio se determinaron seis descriptores los cuales serían rangos de pendientes basados en la clasificación de pendientes del Boletín N° 38 Serie C “Riesgos Geológicos en la Región Ancash”. Es por ello que se puede inferir lo siguiente en cuanto a susceptibilidad a movimientos en masa dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Tabla 22

Susceptibilidad de las pendientes a los movimientos en masa

Pendientes	Influencia a la susceptibilidad a los movimientos en masa	Área representativa dentro de la subcuenca Pachacoto (Ha.)	Porcentaje (%) con relación al área total de la subcuenca Pachacoto
------------	---	--	---

Mayor a 45° (Escarpados)	Pendientes las cuales son más frecuentes a originarse los movimientos en masa de tipo deslizamiento, caída de rocas y derrumbes. En estas pendientes también es usual que se originen los flujos de detritos. Por lo cual presenta una susceptibilidad alta a muy alta a los movimientos en masa.	679.20	3.35
Muy fuerte (25° - 45°)		5821.59	28.73
Fuerte (15° - 25°)	Pendientes en las cuales se suelen generar los flujos de detritos y movimientos complejos, así como también deslizamientos en las laderas. Es por ello que se considera una susceptibilidad de media a alta.	5424.86	26.77
Moderada (5° - 15°)	En estas pendientes se suelen originar los movimientos en masa de tipo reptación y flujo de detritos. Es por ello que se considera con una susceptibilidad media.	6282.39	31.00
Suave (1° - 5°)	Las bajas pendientes son poco susceptibles a los movimientos en masa. Por lo general, son afectados por eventos que se originan en las pendientes de mayor inclinación. En la mayoría de casos son afectadas por flujo de detritos.	1906.22	9.41
Casi a nivel (0° - 1°)		148.45	0.73
Total		20262.72	100.00

Con lo anteriormente expuesto, se obtuvo los grados de importancia o relevancia de las pendientes realizando la comparación por pares entre cada una de las unidades. Posteriormente, se realizó el PAJ para las pendientes presentes en la subcuenca Pachacoto.

4.1.8 Cobertura vegetal

Para la cobertura vegetal dentro de la subcuenca Pachacoto, se identificaron seis unidades de cobertura vegetal mediante el shapefile del Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. Es por ello que se puede inferir lo siguiente en cuanto a susceptibilidad a movimientos en masa dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Tabla 23*Susceptibilidad de las unidades de cobertura vegetal a los movimientos en masa*

Unidad de cobertura vegetal	Influencia a la susceptibilidad a los movimientos en masa	Área representativa dentro de la subcuenca Pachacoto (Ha.)	Porcentaje (%) con relación al área total de la subcuenca Pachacoto
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Presentan poca o casi nula vegetación, desarrollándose en topografía abrupta y zonas de mayor altitud en las cuales se encuentran las pendientes de mayor valor. Al no presentar follaje no puede mitigar el volumen de la precipitación ni disipar la energía cinética provenientes de estas, por lo que se tendría que esta unidad de cobertura vegetal presenta una susceptibilidad muy alta a los movimientos en masa.	8376.75	41.34
Glaciar		1446.25	7.14
Pajonal andino	Distribuidas en el valle de la subcuenca Pachacoto ocupando pendientes planas y suaves. Este tipo de cobertura vegetal es utilizada para el uso agrícola y ganadero. Es por estas características que presenta una susceptibilidad media a alta a la susceptibilidad a los movimientos.	8551.78	42.20
Matorral arbustivo	Son encontradas en zonas poco accidentadas dentro de la subcuenca Pachacoto, así como también en zonas onduladas. Presentan vegetación moderada a abundante de tipo semi arbustos de 50 centímetros de altura. Este tipo de unidad de cobertura vegetal disipa la energía cinética de la lluvia, permitiendo mitigar la susceptibilidad a los movimientos en masa, por lo que presentaría una susceptibilidad media a baja frente a los movimientos en masa.	578.82	2.86
Bofedal	Unidad de cobertura vegetal con abundante presencia de agua, de movimiento lento que se originan y alimentan de los glaciares cercanos. Presentan abundante vegetación. Sus raíces ayudan a reforzar el suelo, contribuyendo a la estabilización del suelo. Por estas características presenta una baja susceptibilidad a los movimientos en masa.	1278.17	6.31
Lagunas, lagos y cochas	Cuerpos de agua que se encuentra depositados sobre depresiones. Presentan una susceptibilidad muy baja a los movimientos en masa.	30.90	0.15
Total		20262.72	100.00

Con lo anteriormente expuesto, se obtuvo los grados de importancia o relevancia de las unidades de cobertura vegetal realizando la comparación por pares entre cada una de las unidades. Posteriormente, se realizó el PAJ para las unidades de cobertura vegetal presentes en la subcuenca Pachacoto.

4.1.9 Anomalía de precipitación

La subcuenca Pachacoto se encuentra ubicado en el distrito de Cátac, provincia de Recuay. Por su ubicación geográfica presenta deficiencia de lluvias en invierno, pero las anomalías de precipitación en estas áreas se hacen presente durante el transcurso del año. Así como se presenta un déficit ciertos meses del año se presentan un superávit el resto de los meses. La precipitación es uno de los principales factores desencadenantes junto a los sismos, es por ello que es un factor físico a tener en cuenta. Por lo cual se planteó seis descriptores con su respectiva susceptibilidad a originar los movimientos en masa.

Tabla

24

Susceptibilidad de la anomalía de precipitación a los movimientos en masa

Anomalía de precipitación	Influencia a la susceptibilidad a los movimientos en masa
Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	Anomalía absolutamente más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente más importante que la anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal, por lo cual se consideró una muy alta susceptibilidad a originar movimientos en masa.
Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	Anomalía muchísimo más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente más importante que la anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal, por lo cual se consideró una alta susceptibilidad a originar movimientos en masa.
Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	Anomalía mucho más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente más importante que la anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal, por lo cual se consideró una moderada a alta susceptibilidad a originar movimientos en masa.

Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	Anomalía más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente más importante que la anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal, por lo cual se consideró una moderada susceptibilidad a originar movimientos en masa.
Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	Anomalía ligeramente más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente más importante que la anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal, por lo cual se consideró una baja susceptibilidad a originar movimientos en masa.
Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	Anomalía más importante e influyente que la precipitación normal. Considerado ligeramente importante que una precipitación normal, por lo cual se consideró una muy baja susceptibilidad a originar movimientos en masa.

Con lo anteriormente expuesto, se obtuvo los grados de importancia o relevancia de los rangos de las anomalías de precipitación realizando la comparación por pares entre cada una de los rangos. Posteriormente, se realizó el PAJ para las unidades de cobertura vegetal presentes en la subcuenca Pachacoto.

4.2 Resultados de la estimación de la susceptibilidad

Los resultados obtenidos a través del PAJ nos permitieron obtener las ponderaciones de los factores físicos y cada uno de sus respectivos descriptores. Por ello, se muestra las tablas resumen que muestren el procedimiento resumido del Proceso Analítico Jerárquico, siguiendo las operaciones descritas a partir del apartado N° 3.7.2 “Análisis de datos para la estimación de la susceptibilidad”.

4.2.1 Matriz de comparación por pares de los factores condicionantes

Tabla 25

Matriz de comparación por pares de los factores condicionantes

COMPARACIÓN POR PARES

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cob. vegetal
Litología	1.000	3.000	5.000	7.000
Pendientes	0.333	1.000	3.000	5.000

Geomorfología	0.200	0.333	1.000	5.000
Cob. vegetal	0.143	0.200	0.200	1.000
Suma	1.676	4.533	9.200	18.000
1/Suma	0.597	0.221	0.109	0.056

MATRIZ DE NORMALIZACION

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cob. vegetal	Vector Priorización (VP)
Litología	0.597	0.662	0.543	0.389	0.548
Pendientes	0.199	0.221	0.326	0.278	0.256
Geomorfología	0.119	0.074	0.109	0.278	0.145
Cob. vegetal	0.085	0.044	0.022	0.056	0.052
Suma	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

VECTOR SUMA PONDERADO

Factores condicionantes	Litología	Pendientes	Geomorfología	Cob. vegetal	Vectores Suma Ponderado (VSP)
Litología	0.548	0.767	0.724	0.362	2.401
Pendientes	0.183	0.256	0.434	0.258	1.131
Geomorfología	0.110	0.085	0.145	0.258	0.598
Cob. vegetal	0.078	0.051	0.029	0.052	0.210

		VSP / VP
		4.384
		4.422
		4.129
		4.066
Suma		17.000
Suma promedio		4.250
Índice de Consistencia (IC)		0.083
Razón de consistencia (RC)		0.0945
		Consistente

De igual manera, se realizará la matriz de comparación por pares para los descriptores de cada uno de los parámetros. Para ello, se presentan las siguientes tablas.

Tabla 26

Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro “Litología”

COMPARACIÓN POR PARES

Descriptores	Fm. Chicama	Grp. Goyllarisquizga	Depósitos Morrénicos	Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	Grp. Calipuy	Depósitos aluviales
Fm. Chicama	1.000	3.000	4.000	5.000	7.000	9.000
Grp. Goyllarisquizga	0.333	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000

Depósitos Morrénicos	0.250	0.333	1.000	3.000	5.000	7.000
Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	0.200	0.200	0.333	1.000	3.000	5.000
Grp. Calipuy	0.143	0.143	0.200	0.333	1.000	3.000
Depósitos aluviales	0.111	0.111	0.143	0.200	0.333	1.000
Suma	2.037	4.787	8.676	14.533	23.333	34.000
1/Suma	0.491	0.209	0.115	0.069	0.043	0.029

MATRIZ DE NORMALIZACION

Descriptores	Fm. Chicama	Grp. Goyllarisquizga	Depósitos Morrénicos	Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	Grp. Calipuy	Depósitos aluviales	Vector Priorización (VP)
Fm. Chicama	0.491	0.627	0.461	0.344	0.300	0.265	0.415
Grp. Goyllarisquizga	0.164	0.209	0.346	0.344	0.300	0.265	0.271
Depósitos Morrénicos	0.123	0.070	0.115	0.206	0.214	0.206	0.156
Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	0.098	0.042	0.038	0.069	0.129	0.147	0.087
Grp. Calipuy	0.070	0.030	0.023	0.023	0.043	0.088	0.046
Depósitos aluviales	0.055	0.023	0.016	0.014	0.014	0.029	0.025
Suma	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

VECTOR SUMA PONDERADO

Descriptores	Fm. Chicama	Grp. Goyllarisquizga	Depósitos Morrénicos	Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	Grp. Calipuy	Depósitos aluviales	Vectos Suma Ponderado (VSP)
Fm. Chicama	0.415	0.814	0.623	0.436	0.323	0.228	2.837
Grp. Goyllarisquizga	0.138	0.271	0.467	0.436	0.323	0.228	1.863
Depósitos Morrénicos	0.104	0.090	0.156	0.261	0.231	0.177	1.019
Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	0.083	0.054	0.052	0.087	0.139	0.126	0.541
Grp. Calipuy	0.059	0.039	0.031	0.029	0.046	0.076	0.280
Depósitos aluviales	0.046	0.030	0.022	0.017	0.015	0.025	0.157

VSP / VP
6.844
6.870

VECTOR SUMA PONDERADO

Descriptores	Mayor a 45° (Escarpada)	25° - 45° (Muy Fuerte)	15° - 25° (Fuerte)	5° - 15° (Moderada)	1° - 5° (Suave)	0° - 1° (Casi a nivel)	Vector Suma Ponderado (VSP)
Mayor a 45° (Escarpada)	0.467	1.086	0.554	0.442	0.369	0.281	3.198
25° - 45° (Muy Fuerte)	0.117	0.272	0.443	0.368	0.323	0.250	1.772
15° - 25° (Fuerte)	0.093	0.068	0.111	0.147	0.138	0.125	0.682
5° - 15° (Moderada)	0.078	0.054	0.055	0.074	0.092	0.094	0.447
1° - 5° (Suave)	0.058	0.039	0.037	0.037	0.046	0.062	0.279
0° - 1° (Casi a nivel)	0.052	0.034	0.028	0.025	0.023	0.031	0.192

VSP / VP	
	6.853
	6.523
	6.162
	6.072
	6.055
	6.165
Suma	37.830
Suma promedio	6.305
Índice de Consistencia (IC)	0.061
Razón de consistencia (RC)	0.0487
	Consistente

Tabla 28

Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro “Geomorfología”

COMPARACIÓN POR PARES

Descriptores	Montaña con cobertura glacial	Montaña estructural	Morrenas	Detrito Glacio Fluvial	Valle glacial con lagunas	Terraza aluvial
Montaña con cobertura glacial	1.000	3.000	5.000	6.000	7.000	9.000
Montaña estructural	0.333	1.000	5.000	6.000	8.000	9.000
Morrenas	0.200	0.200	1.000	3.000	4.000	5.000
Detrito Glacio Fluvial	0.167	0.167	0.333	1.000	3.000	4.000

Valle glacial con lagunas	0.143	0.125	0.250	0.333	1.000	3.000
Terraza aluvial	0.111	0.111	0.200	0.250	0.333	1.000
Suma	1.954	4.603	11.783	16.583	23.333	31.000
1/Suma	0.512	0.217	0.085	0.060	0.043	0.032

MATRIZ DE NORMALIZACION

Descriptores	Montaña con cobertura glacial	Montaña estructural	Morrenas	Detrito Glacio Fluvial	Valle glacial con lagunas	Terraza aluvial	Vector Priorización (VP)
Montaña con cobertura glacial	0.512	0.652	0.424	0.362	0.300	0.290	0.423
Montaña estructural	0.171	0.217	0.424	0.362	0.343	0.290	0.301
Morrenas	0.102	0.043	0.085	0.181	0.171	0.161	0.124
Detrito Glacio Fluvial	0.085	0.036	0.028	0.060	0.129	0.129	0.078
Valle glacial con lagunas	0.073	0.027	0.021	0.020	0.043	0.097	0.047
Terraza aluvial	0.057	0.024	0.017	0.015	0.014	0.032	0.027
Suma	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

VECTOR SUMA PONDERADO

Descriptores	Montaña con cobertura glacial	Montaña estructural	Morrenas	Detrito Glacio Fluvial	Valle glacial con lagunas	Terraza aluvial	Vectos Suma Ponderado (VSP)
Montaña con cobertura glacial	0.423	0.904	0.620	0.468	0.328	0.239	2.982
Montaña estructural	0.141	0.301	0.620	0.468	0.375	0.239	2.145
Morrenas	0.085	0.060	0.124	0.234	0.187	0.133	0.823
Detrito Glacio Fluvial	0.071	0.050	0.041	0.078	0.141	0.106	0.487
Valle glacial con lagunas	0.060	0.038	0.031	0.026	0.047	0.080	0.282
Terraza aluvial	0.047	0.033	0.025	0.019	0.016	0.027	0.167

VSP / VP	
	7.045
	7.120
	6.637
	6.248
	6.012
	6.279
Suma	39.342
Suma promedio	6.557
Índice de Consistencia (IC)	0.111
Razón de consistencia (RC)	0.0890
	Consistente

4.2.2 Matriz de comparación por pares para el factor desencadenante

Para el factor desencadenante, como solo se está considerando un solo parámetro, el cual es la anomalía de la precipitación, la ponderación de este parámetro automáticamente será igual a la unidad. Por tanto, para sus descriptores, se realizará la comparación por pares y se deberá corroborar con la relación de consistencia. Realizado lo anteriormente expuesto, se dispone de las siguientes tablas.

Tabla 29

Matriz de comparación por pares de los descriptores del parámetro “Anomalía de precipitación”

COMPARACIÓN POR
PARES

Descriptores	Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal
Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	1.000	2.000	3.000	5.000	7.000	9.000
Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	0.500	1.000	2.000	3.000	5.000	7.000
Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000	5.000
Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	0.200	0.333	0.500	1.000	2.000	3.000
Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	0.143	0.200	0.333	0.500	1.000	2.000
Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	0.111	0.143	0.200	0.333	0.500	1.000
Suma	2.287	4.176	7.033	11.833	18.500	27.000
1/Suma	0.437	0.239	0.142	0.085	0.054	0.037

MATRIZ DE
NORMALIZACION

Descriptores	Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	Vector Priorización (VP)
Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	0.437	0.479	0.427	0.423	0.378	0.333	0.413
Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	0.219	0.239	0.284	0.254	0.270	0.259	0.254
Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	0.146	0.120	0.142	0.169	0.162	0.185	0.154
Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	0.087	0.080	0.071	0.085	0.108	0.111	0.090
Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	0.062	0.048	0.047	0.042	0.054	0.074	0.055
Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	0.049	0.034	0.028	0.028	0.027	0.037	0.034
Suma	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

VECTOR SUMA
PONDERADO

Descriptores	Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	Vector Suma Ponderado (VSP)
Anomalía de precipitación mayor al	0.413	0.508	0.462	0.452	0.383	0.305	2.523

200% por encima de lo normal							
Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	0.206	0.254	0.308	0.271	0.273	0.237	1.550
Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	0.138	0.127	0.154	0.181	0.164	0.170	0.933
Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	0.083	0.085	0.077	0.090	0.109	0.102	0.546
Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	0.059	0.051	0.051	0.045	0.055	0.068	0.329
Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	0.046	0.036	0.031	0.030	0.027	0.034	0.204

	VSP / VP	
	6.112	
	6.098	
	6.059	
	6.041	
	6.013	
	6.027	
Suma	36.349	
Suma promedio	6.058	
Índice de Consistencia (IC)	0.012	
Razón de consistencia (RC)	0.0093	Consistente

Por lo tanto, se dispone de la siguiente tabla que contiene a los factores condicionantes y al factor desencadenante con sus respectivos descriptores.

4.2.3 Matriz de factores condicionantes y sus descriptores

Tabla 30

Matriz de factores condicionantes y sus descriptores con sus respectivas ponderaciones

FACTORES CONDICIONANTES											
Litología			Pendiente			Geomorfología			Cobertura Vegetal		
PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd
0.56	Formación Chicama	0.42	0.26	Escarpada (Mayor a 45°)	0.48	0.13	Montaña con cobertura glacial	0.43	0.05	Área altoandina con escasa y sin vegetación	0.46
	Grupo Goyllarisquizga	0.28		Muy Fuerte (25° - 45°)	0.27		Montaña estructural en roca volcánica	0.31		Glaciar	0.28
	Depósitos Morrénicos	0.15		Fuerte (15° - 25°)	0.11		Morrenas	0.12		Pajonal andino	0.12
	Cuatrnario Holoceno Glacio Fluvial	0.08		Moderada (5° - 15°)	0.07		Detrito Glacio Fluvial	0.07		Matorral arbustivo	0.06
	Grupo Calipuy	0.04		Suave (1° - 5°)	0.04		Valle glacial con lagunas	0.04		Bofedal	0.04
	Depósitos aluviales	0.02		Casi a nivel (0° - 1°)	0.03		Terraza aluvial	0.03		Lagunas, lagos y cochas	0.03

Nota. Siendo PP: Peso del parámetro y Pd: Peso del descriptor

De igual manera, se tendrá la siguiente tabla para el factor desencadenante.

4.2.4 Matriz del factor desencadenante y sus descriptores

Tabla 31

Matriz del factor desencadenante y sus descriptores con sus respectivas ponderaciones

FACTOR DESENCADENANTE		
Anomalía de precipitación		
PP	Descriptores	Pd
1.00	Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	0.41
	Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	0.26
	Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	0.15
	Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	0.09
	Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	0.05
	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	0.03

Nota. Siendo PP: Peso del parámetro y Pd: Peso del descriptor

4.2.5 Ponderación del factor condicionante vs factor desencadenante

Para continuar, dispuso a analizar las ponderaciones para el factor condicionante y el factor desencadenante. Poniendo en contexto a los dos factores, el factor condicionante se encuentra en todo momento y es propio de la subcuenca Pachacoto, por lo que tendrá una ponderación mayor que al factor desencadenante, siendo este una anomalía de precipitación por encima de lo normal, el cual se provocaría en ocasiones determinadas bajo ciertas características que dependerán de otros factores externos de la subcuenca Pachacoto. Por ello, se plantea una ponderación del 0.65 (65%) para el factor condicionante y del 0.35 (35%) para el factor desencadenante.

4.2.6 Estimación de la susceptibilidad de los parámetros físicos

Ahora bien, una vez obtenidos las ponderaciones de los factores condicionantes y el factor desencadenante con sus respectivos descriptores, se calculará la susceptibilidad en función a la siguiente expresión, la cual es recogida del Manual para la Evaluación de Riesgos por Fenómenos Naturales, 2° versión del año 2015.

$$\sum_{i=1}^n PP_i * Pdi = Valor$$

Donde PP: Peso del parámetro y Pd: Peso del descriptor.

Para ello, se multiplicarán la ponderación del parámetro con la ponderación de un descriptor del parámetro en forma lineal horizontal sumando a la multiplicación de la ponderación del siguiente parámetro con la ponderación del siguiente descriptor. Entonces, de la Tabla N° X “Matriz de factores condicionantes y sus descriptores con sus respectivas ponderaciones”, a manera de ejemplo, se tiene que:

$$(0.56 \times 0.42) + (0.26 \times 0.48) + (0.13 \times 0.43) + (0.05 \times 0.46) = 0.44$$

Dándonos como resultado 0.44, el cual resultaría el Valor del Factor condicionante (VFC). De igual manera se realizará para cada fila de la matriz de los factores condicionantes y de la matriz del factor desencadenante. Para lo cual se tendría las siguientes tablas.

Tabla 32

Matriz de los factores condicionantes y sus descriptores con sus respectivas ponderaciones

FACTORES CONDICIONANTES													
Litología			Pendiente			Geomorfología			Cobertura Vegetal			VFC	PFC
PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd	PP	Descriptores	Pd		
0.56	Formación Chicama	0.42	0.26	Escarpada (Mayor a 45°)	0.48	0.13	Montaña con cobertura glacial	0.43	0.05	Área altoandina con escasa y sin vegetación	0.46	0.44	0.65
	Grupo Goyllarisquizga	0.28		Muy Fuerte (25° - 45°)	0.27		Montaña estructural en roca volcánica	0.31		Glaciar	0.28	0.28	
	Depósitos Morrénicos	0.15		Fuerte (15° - 25°)	0.11		Morrenas	0.12		Pajonal andino	0.12	0.14	
	Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial	0.08		Moderada (5° - 15°)	0.07		Detrito Glacio Fluvial	0.07		Matorral arbustivo	0.06	0.08	
	Grupo Calipuy	0.04		Suave (1° - 5°)	0.04		Valle glacial con lagunas	0.04		Bofedal	0.04	0.04	
	Depósitos aluviales	0.02		Casi a nivel (0° - 1°)	0.03		Terraza aluvial	0.03		Lagunas, lagos y cochas	0.03	0.03	

Nota. Siendo VFC: Valor del Factor condicionante y PFC: Peso del Factor condicionante.

Tabla 33

Matriz del factor desencadenante con el valor del factor desencadenante y el peso del factor desencadenante

FACTOR DESENCADENANTE				
Anomalía de precipitación			VFD	PFD
PP	Descriptor	Pd		
1.00	Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	0.41	0.41	0.35
	Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal	0.26	0.26	
	Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal	0.15	0.15	
	Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal	0.09	0.09	
	Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal	0.05	0.05	
	Anomalía de precipitación menor al 40% por encima de lo normal	0.03	0.03	

Nota. VFD: Valor del Factor desencadenante y PFD: Peso del Factor desencadenante.

Para finalizar, de igual manera que se determinaron los valores de los factores condicionantes, el factor desencadenante y los valores de los descriptores, se calculará el valor de la susceptibilidad multiplicando el Valor del Factor Condicionante (VFC) por el Peso del Factor Condicionante (PFC) sumando a la multiplicación del Valor del Factor Desencadenante (VFD) por el Peso del Factor Desencadenante (PFD). A manera de ejemplo, se tiene lo siguiente:

$$(0.44 \times 0.65) + (0.41 \times 0.35) = 0.430$$

Por lo cual, se dispone de la siguiente tabla.

Tabla 34

Matriz de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto

VALORES DESUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA PACHACOTO				
FACTOR CONDICIONANTE		FACTOR DESENCADENANTE		Valor Susceptibilidad
VFC	PFC	VFD	PFD	
0.44	0.65	0.41	0.35	0.430

0.28	0.65	0.26	0.35	0.271
0.14	0.65	0.15	0.35	0.142
0.08	0.65	0.09	0.35	0.081
0.04	0.65	0.05	0.35	0.047
0.03	0.65	0.03	0.35	0.028

4.2.7 Estratificación de la susceptibilidad

Hallado lo valores de la susceptibilidad a través del Pr PAJ mediante el método de Saaty se realizará la estratificación, el cual consiste en dividir los valores de la susceptibilidad por niveles, o en este caso se les denominará estratos, y agrupar estos con las características de los descriptores. Para ello, se dispone de la siguiente tabla.

Tabla 35

Estratificación de la susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto

Nivel de susceptibilidad	Descripción	Rango
Muy alta	Litología: Formación Chicama. Pendientes escarpadas (mayores a 45°). Geomorfología de montañas con cobertura glacial. Cobertura vegetal: Áreas altoandinas con escasa y sin vegetación. Anomalía de precipitación mayor al 200% por encima de lo normal	$0.271 \leq P \leq 0.430$
Alta	Litología: Grupo Goyllarisquizga. Pendientes muy fuertes (25° - 45°). Geomorfología de montañas estructurales en roca volcánica. Cobertura vegetal: Glaciares. Anomalía de precipitación del 160% al 200% por encima de lo normal.	$0.142 \leq P < 0.271$
Media	Litología de depósitos morrénicos. Pendientes fuertes (15° - 25°). Geomorfología de morrenas. Cobertura vegetal de pajonal andino. Anomalía de precipitación del 120% al 160% por encima de lo normal.	$0.081 \leq P < 0.142$
Baja	Litología del Cuaternario Holoceno Glacio Fluvial. Pendientes moderadas (5° - 15°). Geomorfología de Detrito Glacio Fluvial. Cobertura vegetal de tipo matorral arbustivo. Anomalía de precipitación del 80% al 120% por encima de lo normal.	$0.047 \leq P < 0.081$
Muy baja	Litología Grupo Calipuy superior y Anomalía y depósitos aluviales. Pendientes suaves y casi a nivel (0° - 5°). Geomorfología de valle glacial con lagunas y terraza aluvial. Cobertura vegetal de bofedal y lagos, lagunas y cochas. Anomalía de precipitación del 40% al 80% por encima de lo normal y menor al 40% por encima de lo normal.	$0.028 \leq P < 0.047$

4.3 Resultados de la zonificación de la susceptibilidad

Para la zonificación de la susceptibilidad, se realizó en base el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.

El ráster producto obtenido fue el de susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto. Para poder manejar y analizar mejor la información se transformará a shapefile, de esta manera se podrá calcular tanto áreas como porcentajes. De igual manera, este producto nos permitió realizar la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto y poder representarla en un nuevo producto, como es el mapa de zonificación. Ver mapa N° 9: Mapa de zonificación según el grado de susceptibilidad de la subcuenca Pachacoto (Anexo II).

V DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La investigación realizada por Sosa (2016) Análisis de susceptibilidad a los peligros geológicos por movimientos en masa - poblados de Pampamarca y Acobamba, región Huánuco utiliza el método Bivariante para la zonificación de la susceptibilidad de terreno a los movimientos en masa dentro de SIG. Mediante este método Sosa pudo determinar los cinco niveles de susceptibilidad, desde muy baja hasta muy alta susceptibilidad, representando muy baja susceptibilidad el 25.8 %, baja susceptibilidad el 4.22 %, moderada susceptibilidad el 21.73 %, alta susceptibilidad y 15.06 % presenta muy alta susceptibilidad. De igual manera, el método utilizado en esta investigación es el PAJ el cual nos permitió zonificar la susceptibilidad a movimientos en masa comparando un par frente a otro y asignarle su nivel de importancia o jerarquización, disminuyendo procesos y agilizando la estimación sin perder el criterio ni la lógica realista del ámbito de estudio. Al igual que en la investigación de Sosa (2016) se logró establecer que en la subcuenca Pachacoto el 2.45% de la subcuenca representa una susceptibilidad muy baja a los movimientos en masa, el 9,63% representa una susceptibilidad baja, el 40.62% de la subcuenca presenta una susceptibilidad media a los movimientos en masa, el 25.49% representa una susceptibilidad alta y el 21.81% representa la susceptibilidad muy alta a los movimientos en masa. Esto evidencia que los dos métodos empleados nos permiten estimar la susceptibilidad apoyándonos en los Sistemas de Información Geográfica para su estimación, pero se diferencian en los procesos demostrando que el PAJ es una método más óptimo en cuanto a disminución de procesos, disminución de tiempo y rápida estimación de la susceptibilidad, mientras que el método Bivariante acumula shapes para cada temática versus los movimientos en masa, así como también involucra un mayor tiempo y demanda para su estimación.

Por otro lado, León y Montenegro (2021) en su investigación Análisis y determinación de zonas susceptibles para mitigar los efectos de movimientos en masa, Caserío Jancos, Provincia San Pablo, Región Cajamarca, 2021, la cual tiene como finalidad analizar y determinar las zonas susceptibles para mitigar los movimientos en masa en los taludes del caserío Jancos, ubicado en la provincia de San Pablo en la región de Cajamarca. Es por ello que analizan los factores condicionantes mediante el Proceso Analítico Jerárquico obteniendo así que cuatro estaciones presentan alta y muy alta susceptibilidad, para lo cual proponen medidas de mitigación. Si bien es cierto, tanto en su investigación como en la presente investigación se pudo determinar las áreas susceptibles a los movimientos en masa, León y Montenegro realizaron calicatas en el suelo con la finalidad de conocer las propiedades físicas y mecánicas, así como también la cohesión, peso unitario y ángulo de fricción de las rocas permitiendo realizar el Proceso Analítico Jerárquico desde otro punto de vista, así como también permitir proponer medidas de mitigación a los movimientos en masa en el caserío Jancos.

Tacilla (2019) en su investigación Estimación de áreas susceptibles por movimientos de masa en la cuenca hidrográfica del río Chonta – Cajamarca estima la susceptibilidad a partir de los factores presentes en la cuenca del río Chonta como son la litología, pendiente, geomorfología y cobertura vegetal por medio del PAJ. En su investigación, de igual manera, presenta los mismos factores a diferencia que se tiene en cuenta la anomalía de precipitación como factor desencadenante para la estimación de la susceptibilidad, siendo este el responsable de originar eventos en la mayoría de casos en la región Andina. Es así que al considerar a la anomalía de precipitación en la estimación de la susceptibilidad se tendría un mejor escenario y mayor exactitud en identificar las áreas susceptibles a los movimientos en masa.

VI CONCLUSIONES

Realizado el diagnóstico en la subcuenca Pachacoto, se identificaron a los parámetros físicos geográficos presentes en esta subcuenca siendo litología, pendientes, geomorfología y la cobertura vegetal los parámetros que condicionan el terreno a la generación de los movimientos en masa, mientras que una anomalía de precipitación desencadenaría el evento de movimientos en masa. Se consideró a la litología como el parámetro más influyente, dado que estudia y evalúa el tipo de material presente (rocas o suelos), la composición mineral y textura, las cuales definirían el grado de susceptibilidad a los movimientos en masa. Adicional a ello, los descriptores presentes de la litología en la subcuenca Pachacoto, los cuales presentan litologías sedimentarias como las lutitas, cuarcitas y areniscas, las cuales están presentes en los descriptores como son la Formación Chicama y el Grupo Goyllarisquizga, aumentan la relevancia de este parámetro por encima de los otros parámetros.

El PAJ es un óptimo método para cuantificar y dar un panorama de jerarquización entre variables, debido a que se pudo obtener las ponderaciones de los elementos necesarios para la estimación de la susceptibilidad. Con esta estimación, se pudo identificar las áreas susceptibles mediante la superposición ponderada de los parámetros con sus respectivos descriptores. Adicionalmente, se pudo realizar la estratificación de la susceptibilidad a los movimientos en masa en la subcuenca basándonos en los resultados obtenidos en el PAJ. Esto permitió obtener el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto.

Según el Mapa N° 10: Mapa de zonificación según el grado de susceptibilidad de la subcuenca Pachacoto. (Anexo II), se puede apreciar que las áreas de susceptibilidad alta se encuentran, en su mayoría, en las zonas de mayor altitud de la subcuenca Pachacoto. Esto junto a la presencia de pendientes mayores a los 25 ° conlleva a que estas áreas serían susceptibles a los movimientos en masa de tipo avalancha de detritos. El 47.30% del área total de la subcuenca

Pachacoto presentaría niveles de susceptibilidad altos y muy altos, siendo casi la mitad del área de estudio. La superficie sería la de 9,546.93 Ha, distribuyéndose en la zona norte y en la parte media y alta de la subcuenca. Las áreas con niveles muy altos se adaptan a la forma de la unidad litológica Formación Chicama. Por otro lado, el 40.62% de la superficie total de la subcuenca Pachacoto estaría en un nivel de susceptibilidad media, esto representando 8,197.25 Ha del total, distribuyéndose en su mayoría en la parte media y baja, a los laterales del recorrido del río Pachacoto. En las áreas de susceptibilidad muy alta, presentarían una susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa de tipo deslizamientos, caídas y avalancha de rocas. Esto debido a la presencia de areniscas, lutitas y cuarcitas, las cuales están presentes en las unidades litológicas Formación Chicama y Grupo Goyllarisquizga. En las áreas de susceptibilidad media, concretamente en la parte baja de la subcuenca Pachacoto, estarían susceptibles a pequeños flujos de detritos que ocurren en las laderas, esto debido a la presencia e influencia de la unidad geomorfológica denominada detrito glacio fluvial y por la presencia de pendientes entre los 5° a los 15°.

VII RECOMENDACIONES

El mapa de zonificación según el grado de susceptibilidad a movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto servirá como herramienta cartográfica en la Gestión de Riesgos de Desastres, tanto para la Municipalidad Distrital de Cátac, como para la Municipalidad Provincial de Recuay y al Gobierno Regional de Ancash, así como también a los entes competentes que velan por la seguridad y administración del Parque Nacional Huascarán como es el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP).

Se recomienda analizar también como factor desencadenante a la aceleración sísmica, ya que esta es dependiente de la magnitud del sismo y de la distancia desde donde se generó el sismo con respecto al área de estudio, teniendo como primera consideración que un sismo mayor a 8 y menor a 9 en la Escala de Richter podría darse a lo largo de la costa peruana, la cual tiene un silencio sísmico de 276 años aproximadamente, desencadenando los movimientos en masa dentro del ámbito de la subcuenca Pachacoto.

Por otro lado, se puede complementar esta información con las consideraciones geotécnicas del área de estudio, ya que con estas consideraciones se tendría una aproximación de la resistencia a la compresión, la cual nos indicaría que clase sería, yendo desde un suelo de arcilla muy blando hasta una roca muy dura en base a la “Clasificación de resistencia de compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo” realizado por Ramírez y Alejano (2004).

VIII REFERENCIAS

- Brabb, E., & Hrod, B. (1989). *Landslides: extent and economic significance*.
- Cambridge University Press. (s.f.). *Cambridge Dictionary*. Obtenido de <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/stratify>
- Carcedo, F., & Corominas, J. (2003). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas sig : Fundamentos y aplicaciones en España*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (2015). *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales - 2da. versión*. Lima.
- Chacón, J. (2012). Movimientos de ladera: clasificación, descripción y evolución espacial y temporal. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (28), 73-89
- Chang, L., Zhang, R., & Wang, C. (2022). Evaluation and Prediction of Landslide Susceptibility in Yichang Section of Yangtze River Basin Based on Integrated Deep Learning Algorithm. *Remote Sensing*, 14(11).
- Coraminas, J., & García, Y. (1997). *Terminología de los movimientos de ladera*. Granada.
- Crozier, M. J. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*.
- Cruden, D. (Abril de 1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27–29 <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de investigación*.

MccGraw-Hill.

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (1989). *Estudio geodinámico de la cuenca del río Santa*. Lima.

Ministerio de Educación (MINEDU). (2005). *Ecosistema saludable y seguro para la vida*. Lima.

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2009). *Guía para la identificación y caracterización de impactos ambientales*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Cuencas y subcuencas hidrográficas*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/cuencas-y-subcuencas.aspx>

National Academy of Sciences. (2009). *Urban Stormwater Management in the United States*

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas. (2007).

MOVIMIENTOS EN MASA: UNA GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZAS.

Real Academia Española. (2005). *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA*. Obtenido de <https://www.rae.es/dpd/susceptible>

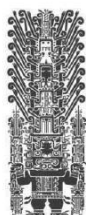
Servicio Geológico Colombiano . (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*.

Toskano, G. (2005). *El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma decisiones en la selección de proveedores*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. En: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., *Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176 (pp. 11-33). National Academy of Sciences.
- Véliz, J. (1967). *Geología del área de Yungay, departamento Ancash y el Alúd de Ranrahirca*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Zavala, B., Fidel, L., & Valderrama, P. (2008). *Movimientos en masa detonados por sismos en la Región Ancash: tipología y distribución*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

IX ANEXOS

Anexo A: Ficha de levantamiento en campo para recojo de información de tipos de movimientos en masa llamada “Inventario de movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto”.



ANEXO I

Tesis: “Áreas susceptibles a movimientos en masa en la subcuenca Pachacoto, distrito de Cátaç, provincia de Recuay, región Áncash”

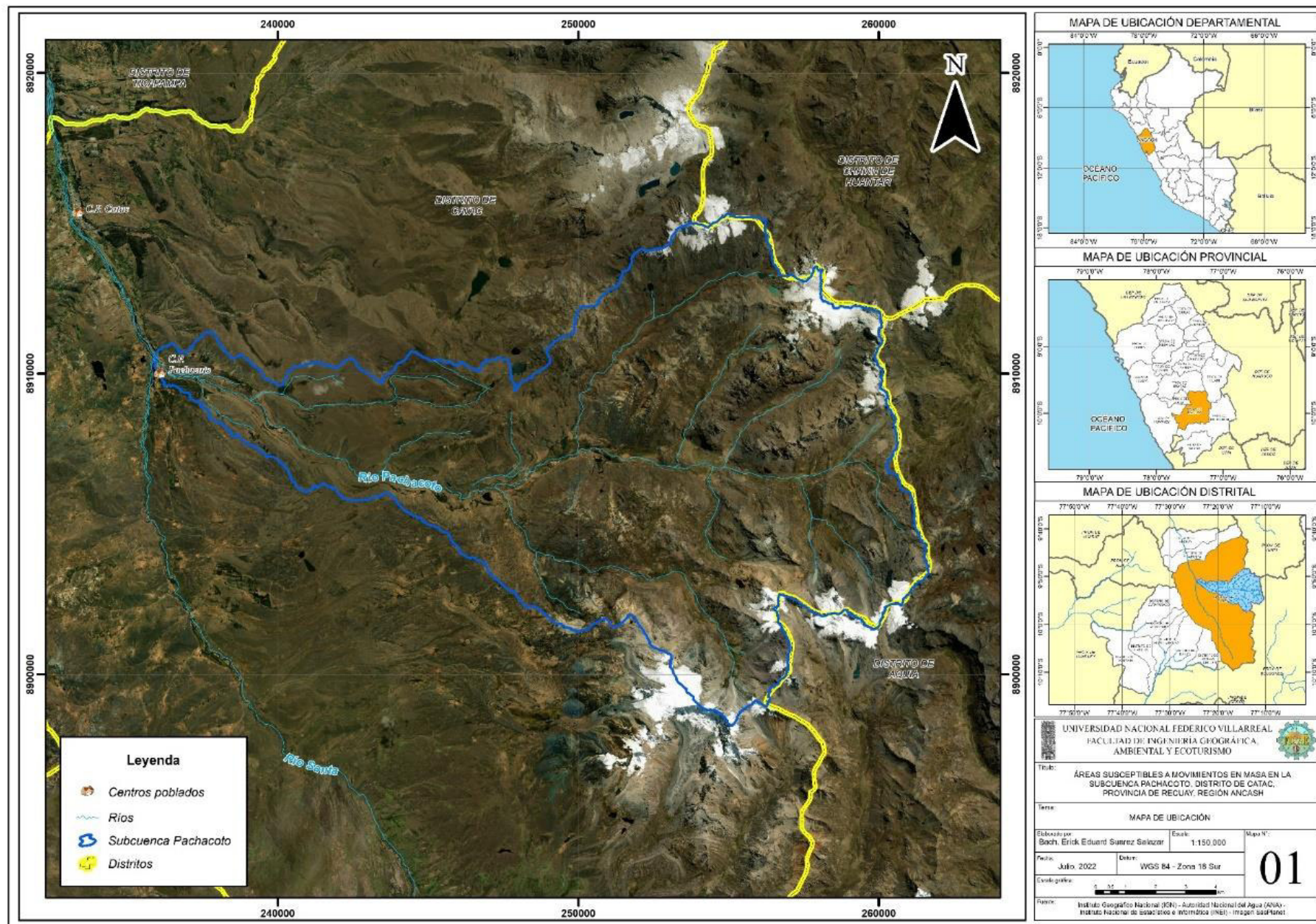


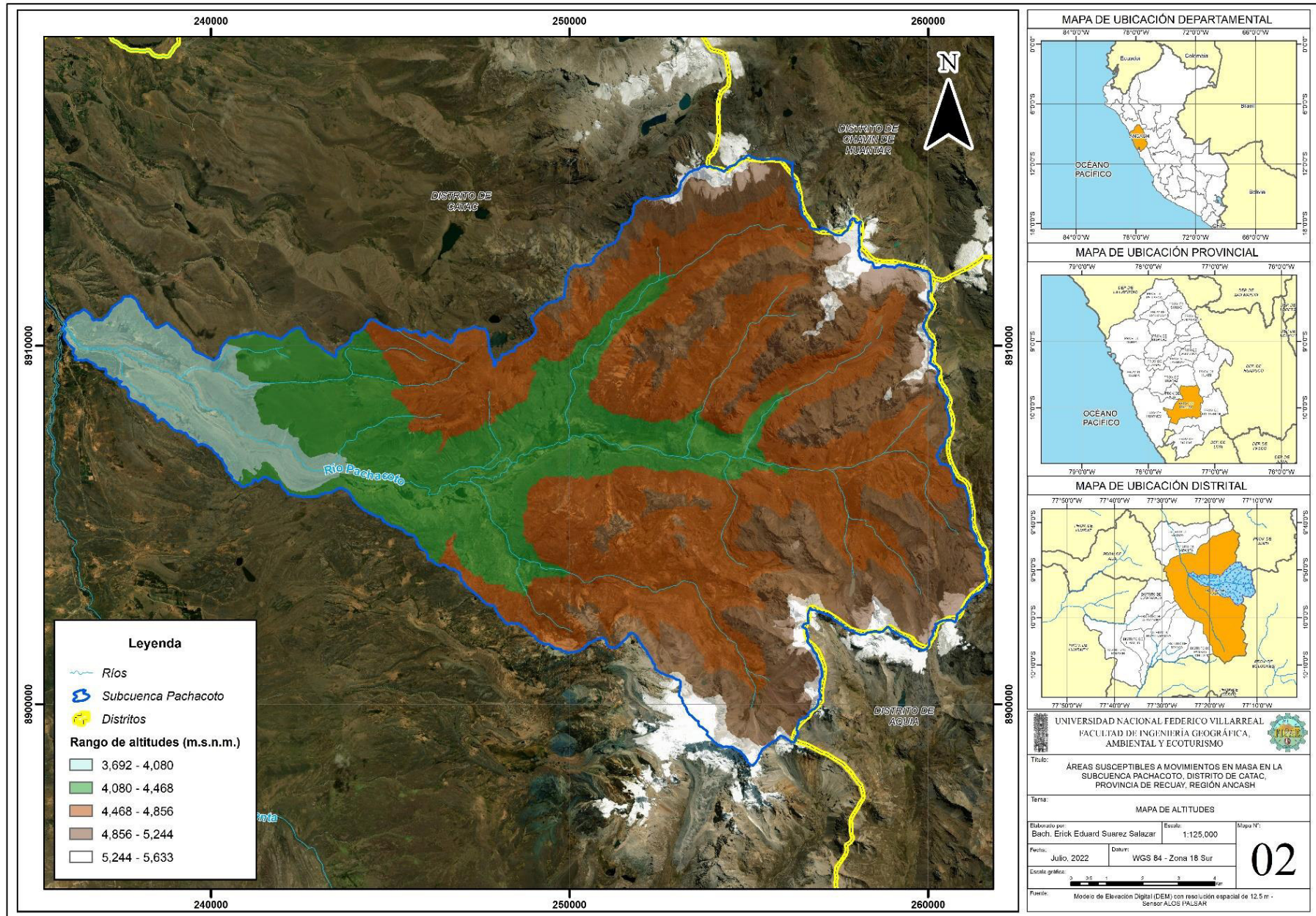
Ficha “Inventario de movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto”

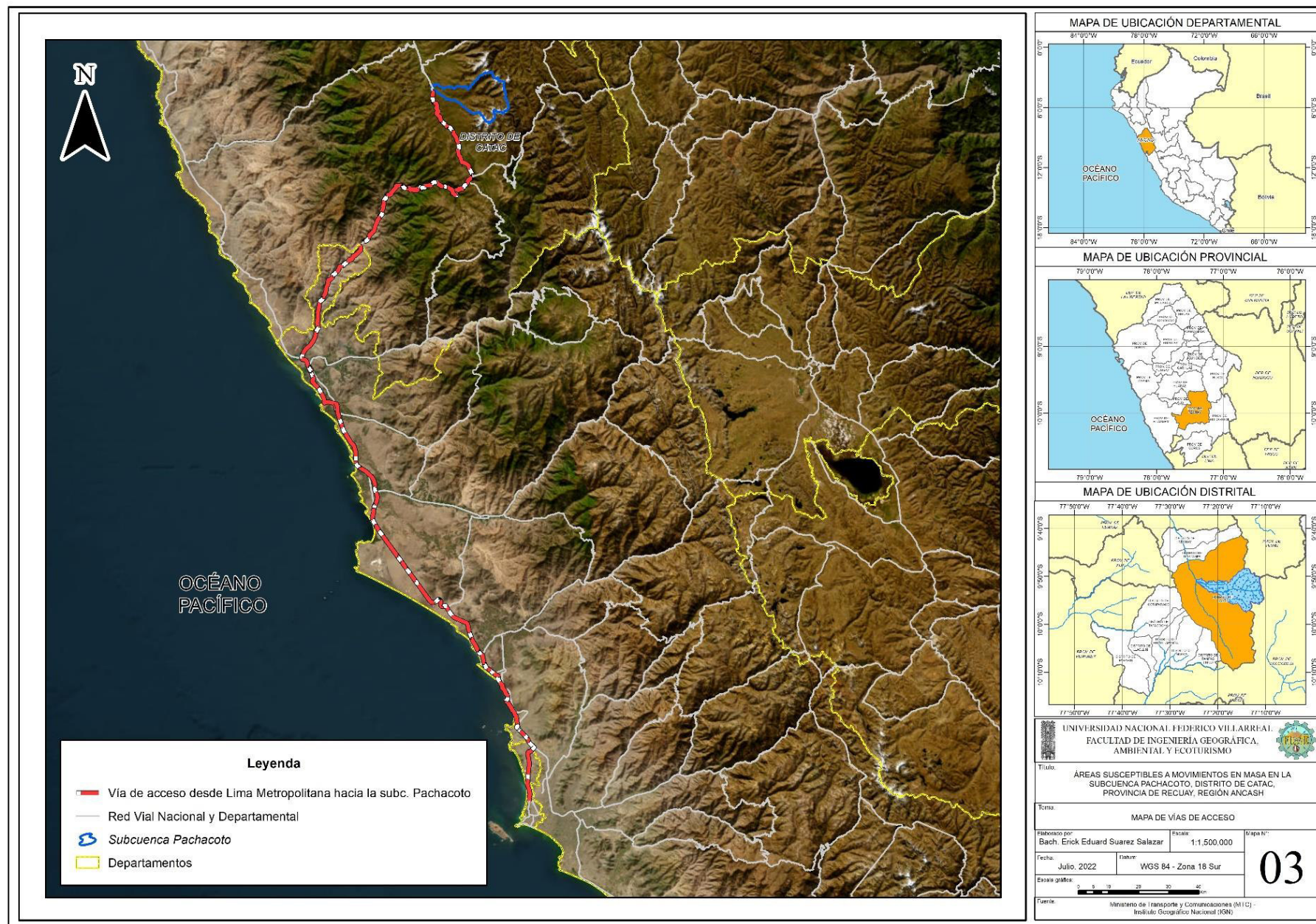
Investigador: Erick Eduard Suarez Salazar

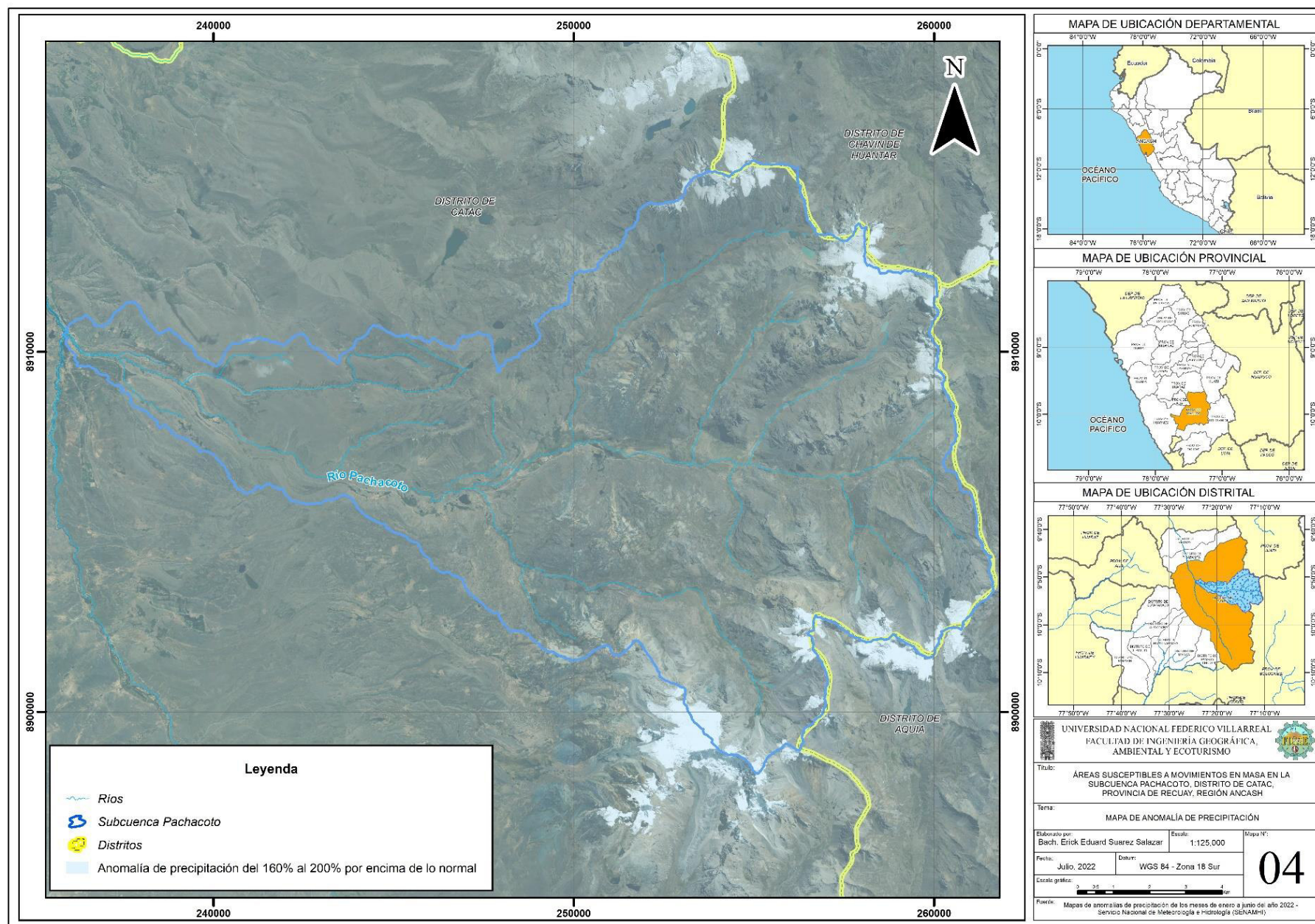
[illegible]

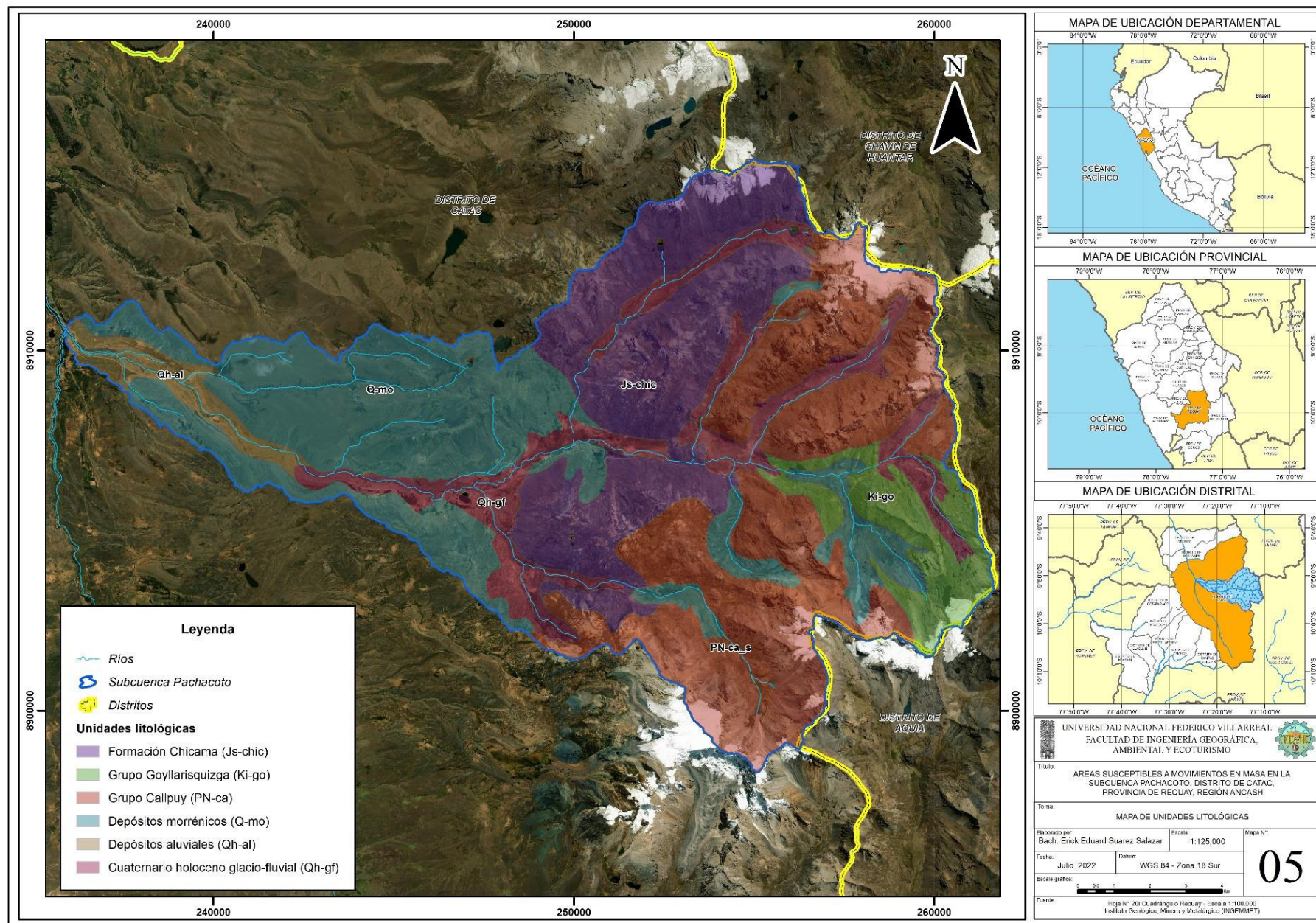
Anexo B: Mapas temáticos de la subcuenca Pachacoto

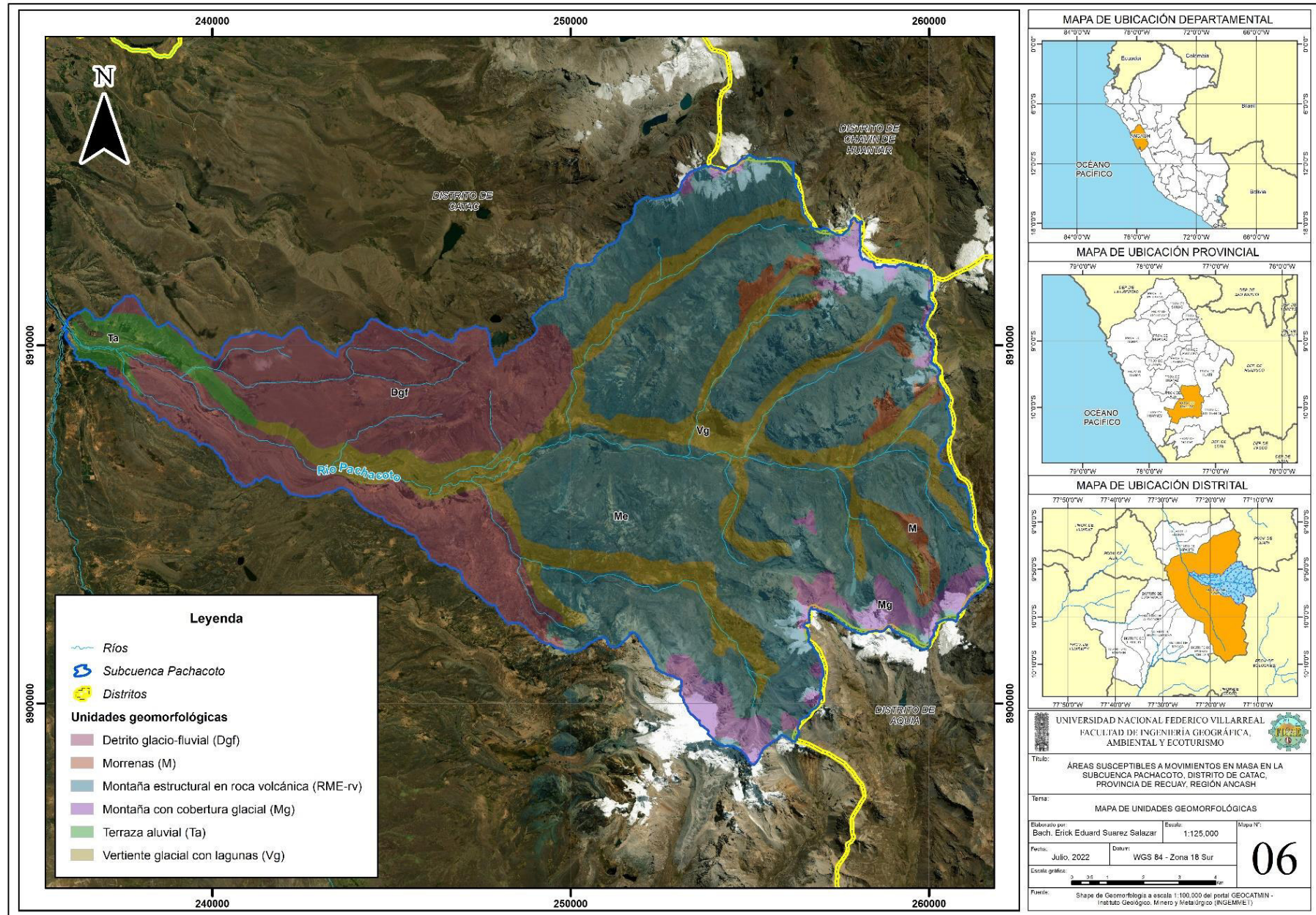


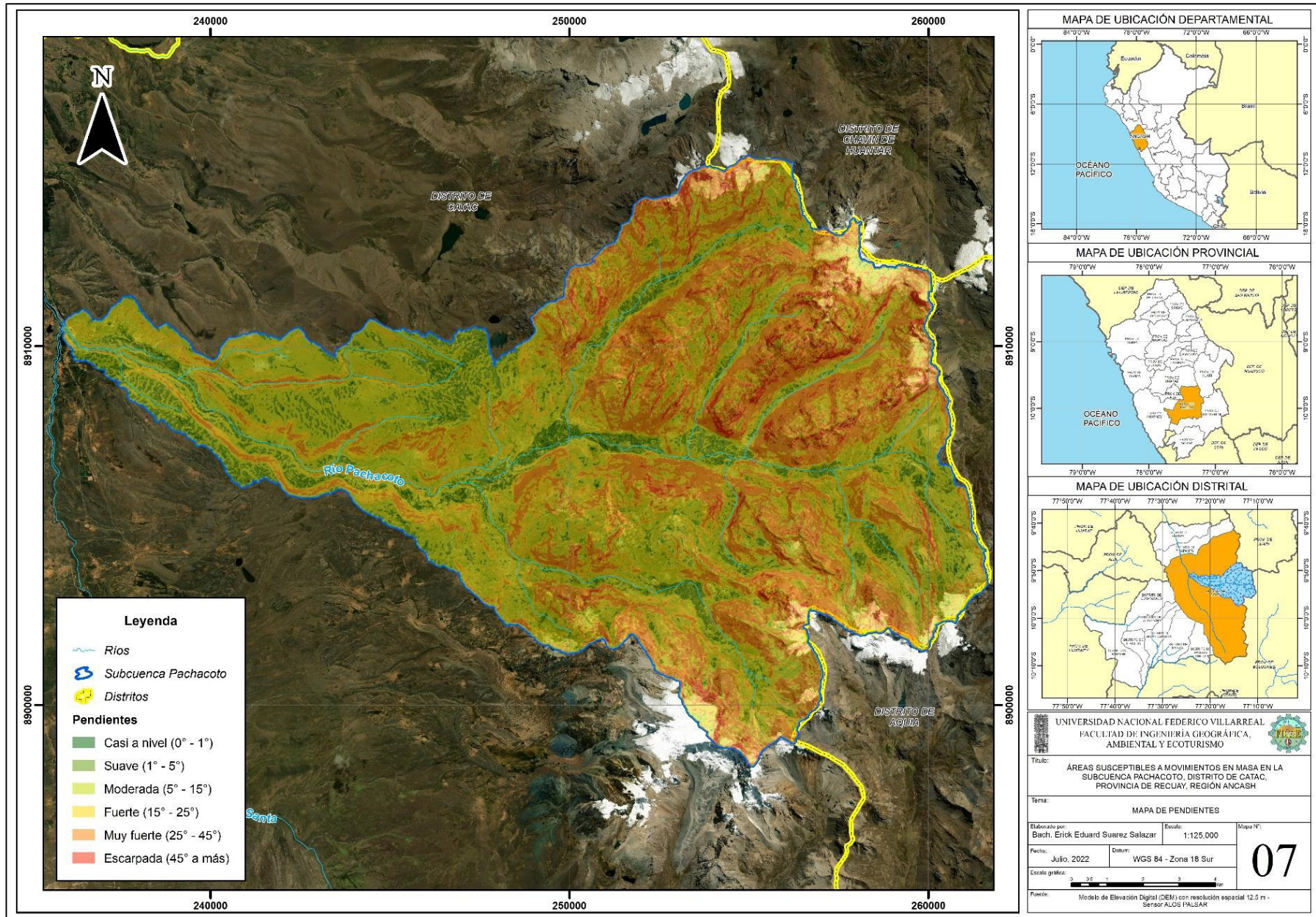


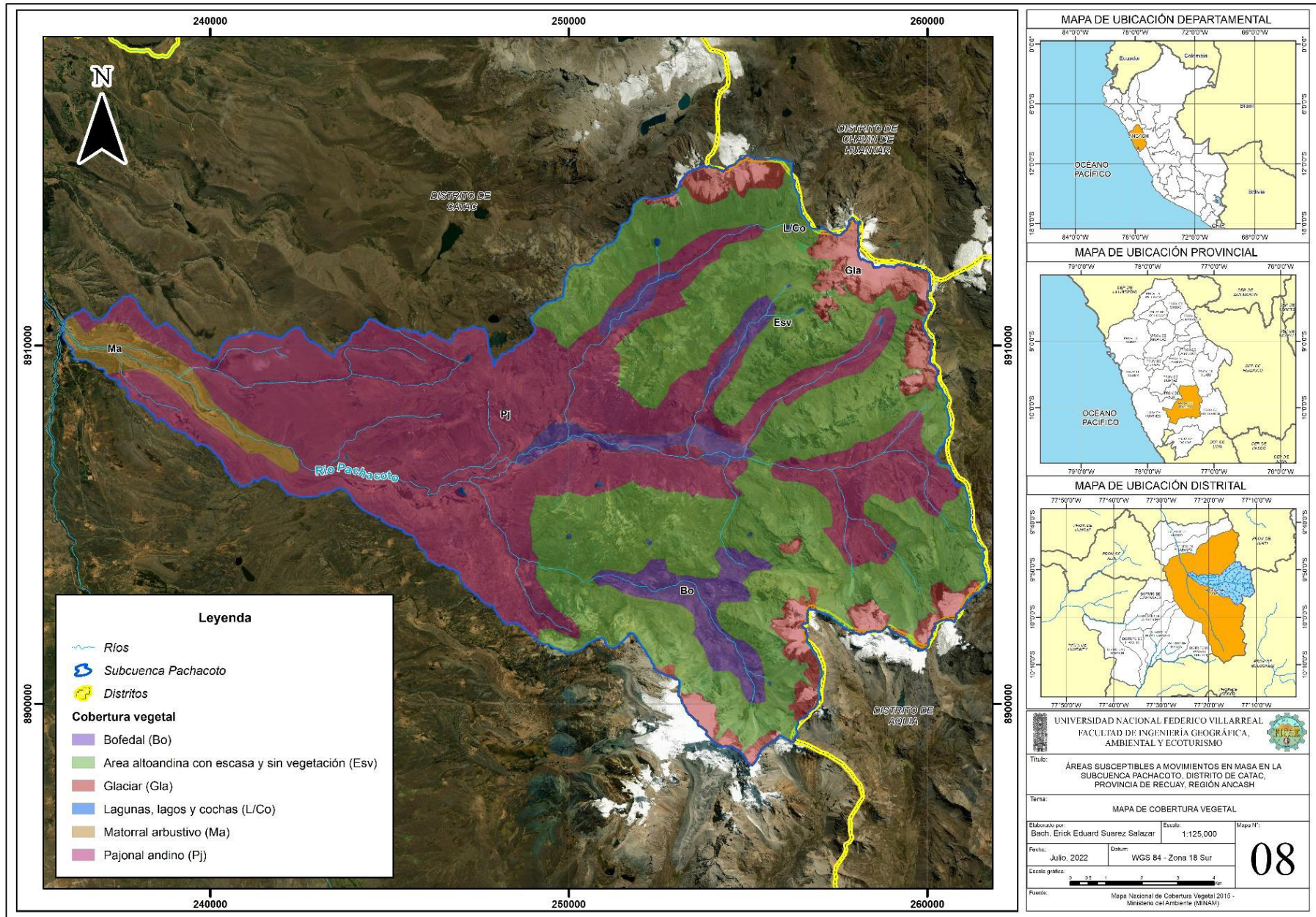


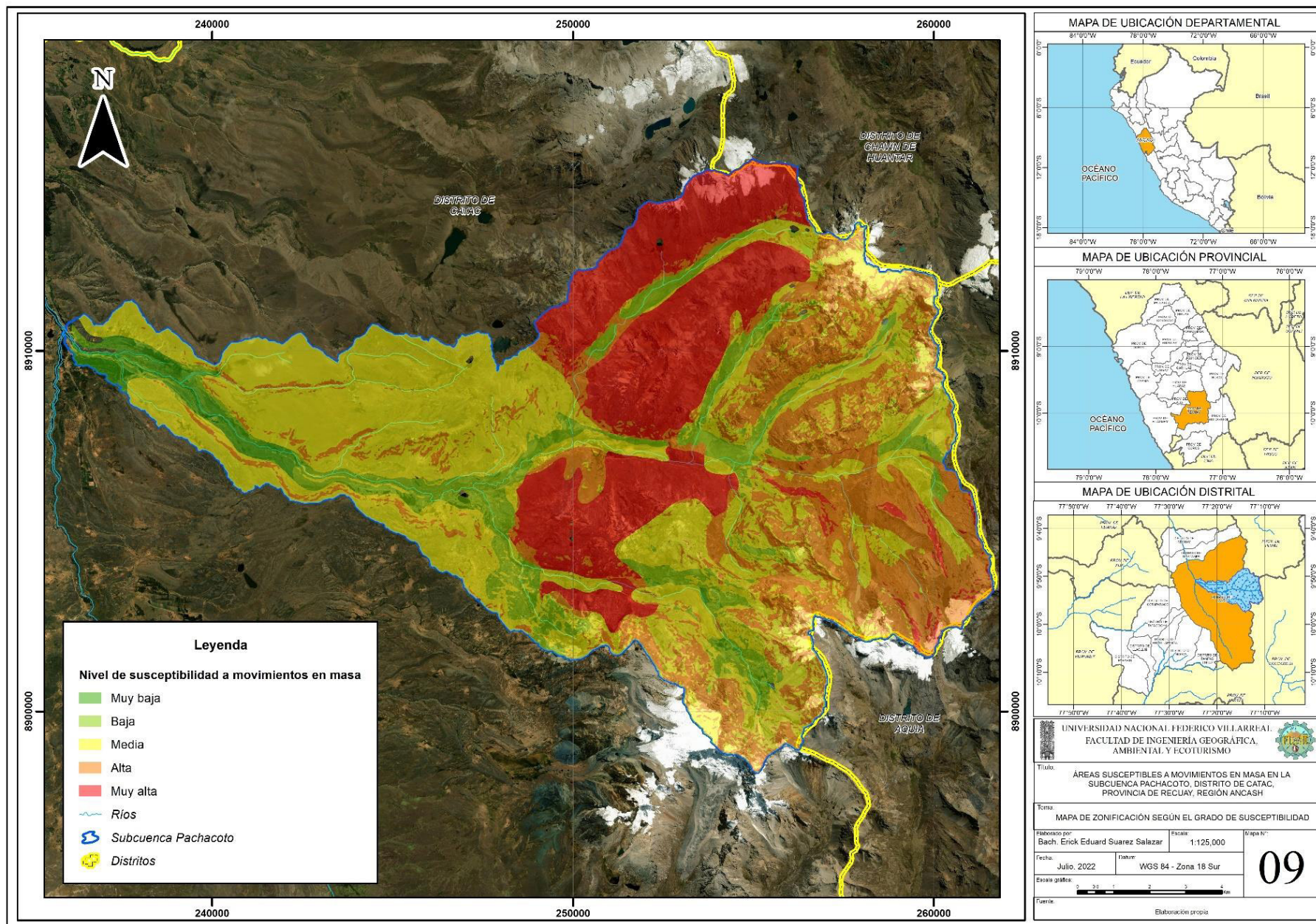












Anexo C: Fotografías de campo



Fotografía 1: Deslizamiento rotacional mediano con material litológico de color grisáceo



Fotografía 2: Deslizamiento rotacional y flujo de detritos en pendiente moderadamente elevada



Fotografía 3: Pequeños deslizamientos rotacionales



Fotografía 4: Flujo de detritos con pendiente elevada



Fotografía 5: Pequeños deslizamientos cercano



Fotografía 6: Materiales morrénicos y pequeños flujos de detritos



Fotografía 7: Pequeños deslizamientos continuos



Fotografía 8: Deslizamientos rotacionales en pendientes bajas

Anexo D: Inventario de movimientos en masa de la subcuenca Pachacoto

ID	Tipo de movimiento en masa	Coordenadas UTM (Datum: WGS-84, Zona 18S)		Altitud (m.s.n.m.)
		Este	Norte	
1	Deslizamiento	236161	8910003	3749.2
2	Deslizamiento	236161	8910003	3749.2
3	Deslizamiento	236161	8910003	3749.2
4	Deslizamiento	236754	8909832	3783.2
5	Deslizamiento	236845	8909821	3784.7
6	Deslizamiento	236880	8909817	3786.1
7	Deslizamiento	237119	8909772	3799.1
8	Deslizamiento	237424	8909607	3816.0
9	Deslizamiento	237424	8909607	3816.0
10	Deslizamiento	237424	8909607	3816.0
11	Flujo de detritos	238747	8909086	3858.0
12	Deslizamiento	238747	8909086	3858.0
13	Flujo de detritos	241761	8907051	3970.8
14	Flujo de detritos	243416	8906410	4072.3
15	Deslizamiento	247413	8906050	4182.1
16	Flujo de detritos	260469	8904266	4928.5
17	Deslizamiento	247413	8906050	4182.1
18	Deslizamiento	254629	8906325	4424.9
19	Deslizamiento	254613	8906321	4424.9
20	Deslizamiento	254582	8906310	4424.6